

Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen



30. Juni 2010

Universität Stuttgart
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik
Förderkennzeichen: 650023/2007

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Förderkennzeichen: 650021/2007

Technische Universität München
Lehrstuhl für Verkehrstechnik
Förderkennzeichen: 650022/2007

Technische Universität Braunschweig
Institut für Verkehr und Stadtbauwesen
Förderkennzeichen: 650020/2007



Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung

unterstützt und gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums
für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) im Rahmen
der Förderinitiative Mobilität 21

Inhalt

1	Berichtsaufbau	7
2	Kurzfassung	8
2.1	Einleitung	8
2.2	Verfahren der LSA-Steuerung	10
2.2.1	Regelbasierte Steuerung	10
2.2.2	Modellbasierte Steuerung	11
2.3	Methoden zur Erfassung und Auswertung	13
2.3.1	Verkehrliche Kenngrößen	14
2.3.2	Umweltbezogene Kenngrößen	16
2.3.3	Simulation	19
2.4	Testfelder und Ergebnisse	20
2.4.1	Bremerhaven	20
2.4.2	Hamburg	25
2.4.3	Virtuelles Testfeld	33
2.5	Evaluierung modellbasierter Steuerungsverfahren	39
2.6	Fazit und Handlungsempfehlungen	41
3	Zielsetzung des Vorhabens	48
3.1	Gesamtziel des Vorhabens	48
3.2	Bezug des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen	49
3.3	Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens	49
4	Verfahren der LSA-Steuerung	50
4.1	Klassifizierung der Verfahren	50
4.1.1	Übersicht	50
4.1.2	Regelbasierte Steuerung	55
4.1.3	Modellbasierte Steuerung	56
4.1.4	Steuerung von Knotenpunkten	60
4.1.5	Steuerung von Netzen	62
4.2	Modellbasiertes Steuerungsverfahren Balance	64
4.2.1	Grundlagen	64

4.2.2	Systemfunktionen	64
4.2.3	Systemtechnik	69
4.2.4	Anwendungsfälle und Wirkungen	69
4.3	Modellbasiertes Steuerungsverfahren Motion	70
4.3.1	Grundlagen	70
4.3.2	Systemfunktionen	71
4.3.3	Systemtechnik	75
4.3.4	Anwendungsfälle und Wirkungen	75
4.4	Modellbasiertes Steuerungsverfahren SCOOT	77
4.4.1	Grundlagen	77
4.4.2	Systemfunktionen	78
4.4.3	Systemtechnik	81
4.4.4	Anwendungsfälle und Wirkungen	81
4.5	Modellbasiertes Steuerungsverfahren UTOPIA/SPOT	81
4.5.1	Grundlagen	81
4.5.2	Systemfunktionen	82
4.5.3	Systemtechnik	84
4.5.4	Anwendungsfälle und Wirkungen	84
4.6	Steuerungsverfahren SCATS	85
4.6.1	Grundlagen	85
4.6.2	Systemfunktionen	86
4.6.3	Systemtechnik	88
4.6.4	Anwendungsfälle und Wirkungen	89
4.7	Weitere Steuerungsverfahren	89
5	Kenngößen der Verkehrs- und Umweltsituation und ihre Erfassung	90
5.1	Verkehrliche Kenngrößen	90
5.1.1	Grundlagen / Übersicht über Kenngrößen	90
5.1.2	Querschnittserfassung mit fest installierten Detektoren	95
5.1.3	Manuelle Querschnittserfassung	97
5.1.4	Kennzeichenerfassungssysteme	99
5.1.5	Fahrzeugwiedererkennung mittels Induktionsschleifensignatur	100
5.1.6	Messfahrzeuge	102

5.1.7	Kamerabasierte Erfassung momentaner Messgrößen	103
5.1.8	Abgeleitete Kenngrößen	104
5.1.9	Modellbasierte Erfassung der Kenngrößen (Simulationen)	109
5.1.10	Verfahren zur Beurteilung der Qualität	111
5.1.11	Allgemeine Empfehlungen zur Erfassung von verkehrlichen Kenngrößen	113
5.1.12	Methodische Vorgehensweise bei der Messung und Analyse der verkehrlichen Kenngrößen in den AMONES-Testfeldern Bremerhaven und Hamburg	129
5.1.13	Methodische Vorgehensweise bei der Simulation der verkehrlichen Kenngrößen	147
5.2	Umweltkenngößen	160
5.2.1	Grundlagen	160
5.2.2	Verfahren zur Messung immissionsbezogener Kenngrößen	182
5.2.3	Verfahren zur Modellierung immissionsbezogener Kenngrößen	185
5.2.4	Verfahren zur Beurteilung der Qualität	190
5.2.5	Allgemeine Empfehlungen zur Erfassung von Umweltkenngößen	190
5.2.6	Methodische Vorgehensweise bei der Analyse der umweltbezogenen Kenngrößen in den AMONES-Testfeldern Bremerhaven und Hamburg	195
6	Typisierung von Anwendungsfeldern	218
6.1	Randbedingungen	219
6.2	Verkehrssteuerung	220
6.3	Verkehrslage	220
6.4	Wirkungen	221
6.5	Ansatz zur Typisierung von Anwendungsfeldern für den Einsatz unterschiedlicher Steuerungsverfahren	222
6.5.1	Typisierung der Steuerungsverfahren	222
6.5.2	Typisierung der Anwendungsfelder	223
6.5.3	Einsatzbereiche modellbasierter Netzsteuerungen	223
7	Festlegung der Testfelder	225
7.1	Einleitung	225
7.2	Auswahlverfahren	225
8	Testfeld Bremerhaven	230
8.1	Verkehrsangebot	230

8.1.1	Merkmale des Verkehrsnetzes	230
8.1.2	Verkehrssteuerung	230
8.2	Verkehrsnachfrage	230
8.2.1	Merkmale der Verkehrsnachfrage	230
8.3	Umweltsituation	231
8.3.1	Umweltrelevante Merkmale	231
8.3.2	Umweltmesstechnik	232
8.4	Messszenarien	232
8.5	Ergebnisse	233
8.5.1	Bereits durchgeführte Untersuchungen Dritter	233
8.5.2	Auswertung verkehrlicher Kenngrößen	234
8.5.3	Auswertung umweltbezogener Kenngrößen	266
9	Testfeld Hamburg	288
9.1	Verkehrsangebot	288
9.1.1	Merkmale des Verkehrsnetzes	288
9.1.2	Verkehrssteuerung	289
9.2	Verkehrsnachfrage	289
9.2.1	Merkmale der Verkehrsnachfrage	289
9.3	Umweltsituation	290
9.3.1	Umweltrelevante Merkmale	290
9.3.2	Umweltmesstechnik	291
9.4	Messszenarien	291
9.5	Ergebnisse	292
9.5.1	Bereits durchgeführte Untersuchungen Dritter	292
9.5.2	Auswertung verkehrlicher Kenngrößen	293
9.5.3	Auswertung umweltbezogener Kenngrößen	317
10	Virtuelles Testfeld	342
10.1	Verkehrsangebot	342
10.1.1	Merkmale des Verkehrsnetzes	342
10.1.2	Verkehrssteuerung	343
10.2	Verkehrsnachfrage	348

10.3	Messszenarien	350
10.4	Ergebnisse	351
10.4.1	Allgemeines	351
10.4.2	Verlustzeiten im ÖPNV	351
10.4.3	Schwachverkehrszeit	352
10.4.4	Morgenspitze	352
10.4.5	Nebenverkehrszeit	353
10.4.6	Abendspitze	354
10.4.7	Zusammenfassung	354
11	Evaluierung modellbasierter Steuerungsverfahren	356
11.1	Evaluierung modellbasierter Steuerungsverfahren in den AMONES-Testfeldern	356
11.2	Stand und Sichtweise der Baulastträger	360
11.2.1	Stand der LSA-Steuerung	361
11.2.2	Sichtweise der Baulastträger	363
12	Fazit und Handlungsempfehlungen	366
13	Glossar	372
14	Literatur	376

1 Berichtsaufbau

Im Zuge der Bearbeitung zeigte sich, dass eine strikte Gliederung des Projektberichtes nach Arbeitspaketen (AP) das Leseverständnis beeinträchtigen würde. Aus diesem Grund entschieden sich die Projektpartner für eine Strukturierung nach sachlich-inhaltlichen Aspekten, was jedoch zur Folge hat, dass die Inhalte der einzelnen AP nun nicht mehr gebündelt darstellbar sind. Damit dennoch eine Zuordnung der Kapitelinhalte zu einzelnen AP und ein Abgleich zwischen den angebotenen und den erbrachten Leistungen der Partner möglich sind, wurden im Anhang die bei der Projektbegleitung des BMVBS eingereichten AP-Beschreibungen detailliert dargestellt und mit Verweisen auf die jeweiligen Berichtskapitel versehen.

Eine Kurzfassung des Projektberichts findet sich in Kapitel 2. Der Anhang des Berichts ist aus Gründen der Handhabbarkeit in ein separates Dokument ausgelagert. Dieser enthält sämtliche Daten der Erhebungen, den Simulationen und deren Auswertung. Ferner gibt es einen zweiten ca. 300-seitigen Anhang, der lediglich in elektronischer Form vorliegt und die Planungsunterlagen des virtuellen Testfelds enthält.

2 Kurzfassung

2.1 Einleitung

Lichtsignalanlagen (LSA) beeinflussen den Verkehrsablauf in Straßennetzen. Sie steuern den Verkehrsfluss und haben gegebenenfalls Einfluss auf die Routenwahl (Abbildung 1). Aus der Routenwahl der einzelnen Fahrzeuge und dem Verkehrsfluss resultieren Wirkungen. Für die Quantifizierung der Wirkungen können u.a. die Verlustzeit, die Anzahl der Halte, der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen herangezogen werden. Wichtiges Ziel einer Lichtsignalsteuerung ist es, die negativen Wirkungen des Verkehrsablaufs unter den gegebenen örtlichen Randbedingungen zu minimieren. Die Randbedingungen umfassen alle externen Eingangsgrößen, die durch die LSA-Steuerung nicht beeinflusst werden können, aber durch sie berücksichtigt werden müssen. Das Verkehrsnetz gibt die Lage der Kreuzungen und die Vermaschung vor, woraus Anforderungen an die Koordinierung entstehen. Die Nutzungen im Straßenumfeld können zu Anforderungen an die räumliche Verteilung der Haltevorgänge und Standzeiten führen, die lokale Lärm- und Schadstoffemissionen beeinflussen.

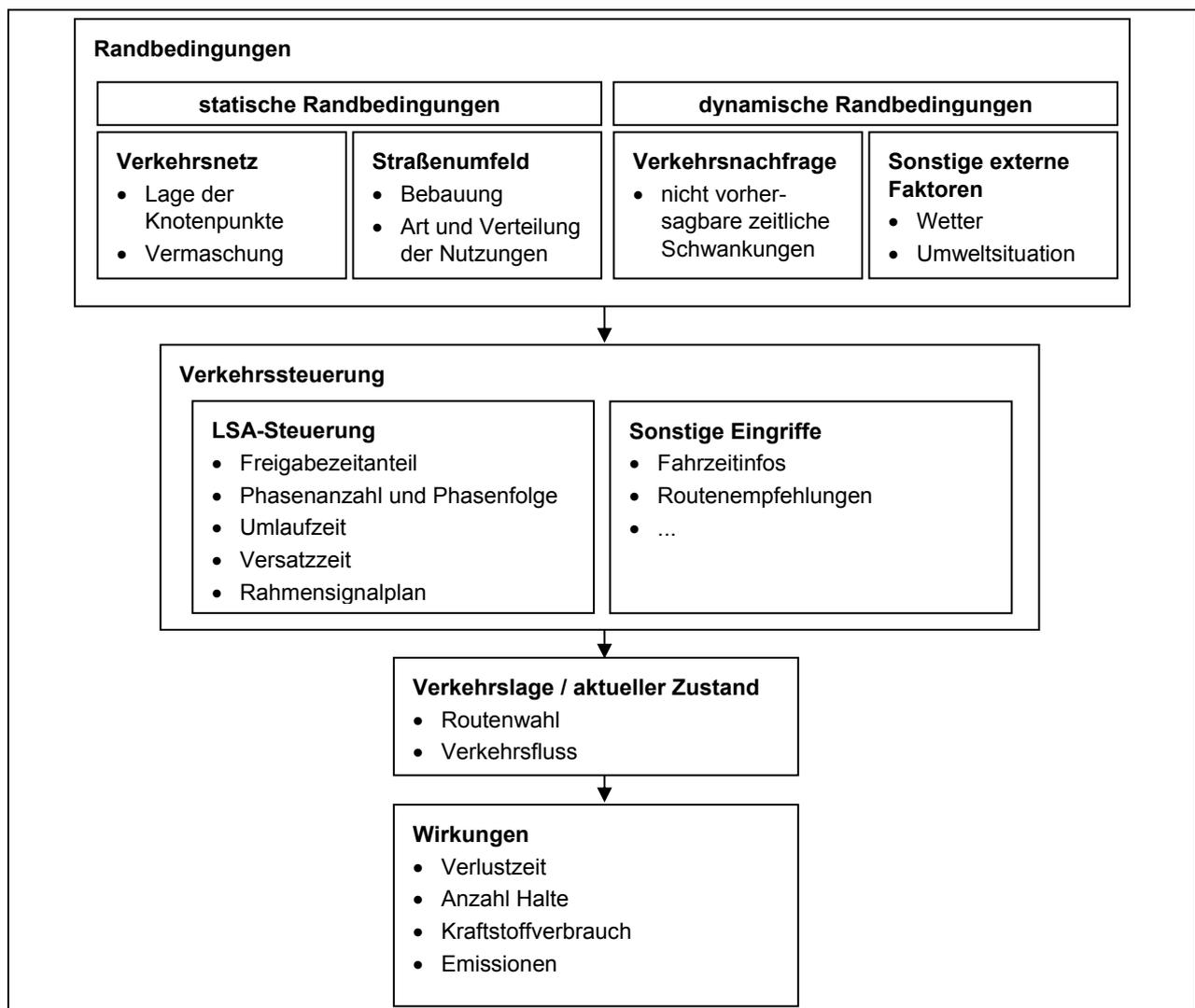


Abbildung 1: Wirkungszusammenhänge bei der Lichtsignalsteuerung.

Die Verkehrsnachfrage ist durch räumliche und zeitliche Schwankungen gekennzeichnet. Um diese Dynamik bei der Steuerung zu berücksichtigen, sind in Deutschland verkehrsabhängige Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen weit verbreitet. Gegenüber einer Festzeitsteuerung sollen sie in erster Linie den Verkehrsfluss in städtischen Netzen verbessern und die Bevorrechtigung von Fahrzeugen des öffentlichen Nahverkehrs sicherstellen. Der überwiegende Teil der Verfahren steuert einzelne Knotenpunkte. Verfahren mit netzweit wirkender Verkehrsabhängigkeit werden noch vergleichsweise selten eingesetzt.

Bei den lokal verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren handelt es sich in den meisten Fällen um regelbasierte Verfahren, die ein vorgegebenes Signalprogramm aufgrund aktueller Detektorwerte (z. B. Zeitlücken im Kfz-Strom oder Anmeldung eines ÖV-Fahrzeugs) modifizieren oder dieses auf der Grundlage einer vorgegebenen Logik dynamisch zusammenstellen. Bei hohen Verkehrsstärken führt die kontinuierliche Belegung der Detektoren jedoch dazu, dass die Steuerungslogik im Ergebnis einer Festzeitsteuerung entspricht. Dieses Defizit kann zum Teil dadurch überwunden werden, dass auf Netzebene durch eine regelbasierte Signalprogrammauswahl, die für die verkehrsabhängige Lokalsteuerung jeweils verbindlichen Rahmensignalpläne dynamisch ausgewählt werden. Modellbasierte Netzsteuerungen gehen hier noch einen deutlichen Schritt weiter, da sie die aktuelle Stärke der Verkehrsströme über mehrere Lichtsignalanlagen hinweg, im Idealfall für das gesamte gesteuerte Netz, kennen und prognostizieren und damit eine netzbezogene Optimierung der LSA-Steuerung ermöglichen.

Modellbasierte Netzsteuerungsverfahren wie z. B. BALANCE oder MOTION sind bis jetzt in Deutschland trotz erfolgreicher Pilotinstallationen noch nicht weit verbreitet und kommen derzeit nur in wenigen Teilnetzen zum Einsatz.

Rückmeldungen einer repräsentativen Befragung von deutschen Städten lassen die Schlussfolgerung zu, dass die wesentlichen Hemmnisse seitens der Baulastträger hohe Investitionskosten und Unsicherheiten bezüglich der erzielbaren Wirkungen und der Handhabbarkeit der Verfahren sind. Das Forschungsprojekt AMONES hat das Ziel, die letzten beiden Punkte und die folgenden Fragestellungen durch umfassende empirische Untersuchungen in zwei städtischen Testfeldern in Hamburg und Bremerhaven und ergänzende Simulationsstudien zu beantworten:

- Welche verkehrlichen Vorteile erzielen modellbasierte Steuerungsverfahren gegenüber herkömmlichen verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren insbesondere durch eine gute Koordinierung der Lichtsignalanlagen im Netz?
- Welche umweltbezogenen Wirkungen sind mit modellbasierten Steuerungsverfahren erreichbar? Welche Beiträge können zur Reduzierung und besseren räumlichen Verteilung von Luftschadstoffen und damit zur Einhaltung von Immissionsgrenzwerten (z. B. zur Feinstaubbelastung) in städtischen Straßennetzen geleistet werden?
- Welches Maß an Verbesserung ist bereits mit der systemtechnisch einfachen Möglichkeit der regelbasierten Signalprogrammauswahl bei geringen Investitionskosten zu erreichen?

- Welche Kenngrößen muss man erfassen und welche Messzeiträume sind notwendig, um zuverlässige Aussagen über die verkehrlichen und umweltbezogenen Wirkungen einer Steuerung zu machen?

2.2 Verfahren der LSA-Steuerung

Im Rahmen von AMONES werden die folgenden sechs Steuerungsverfahren unterschieden:

- Die *Festzeitsteuerung (FZS)* stellt eine zeitabhängige Signalprogrammauswahl für die einzelnen Knoten dar.
- Unter einer *lokalen Steuerung (regelbasiert LRS bzw. modellbasiert LMS)* wird hier eine verkehrsabhängige, lokale Signalprogrammanpassung verstanden.
- Bei der *netzweiten regelbasierten Steuerung (NRS)* kann es sich entweder um eine verkehrsabhängige Signalprogrammauswahl oder eine Signalprogrammbildung bzw. –anpassung handeln.
- Bei den modellbasierten Netzsteuerungen wird nochmals explizit unterschieden in die *netzweite modellbasierte Signalprogrammauswahl (NMSA)* und die *netzweite modellbasierte Steuerung (NMS)*, welche die Verfahren zur netzweiten verkehrsabhängigen Signalprogrammbildung bzw. –anpassung umfasst und in AMONES insbesondere durch die untersuchten Verfahren MOTION und BALANCE repräsentiert wird.

2.2.1 Regelbasierte Steuerung

Regelbasierte Steuerungsverfahren nutzen Kenngrößen, die direkt aus dem Verkehrsfluss gewonnen und über Plausibilitätsannahmen mit der Steuerungslogik verknüpft werden. Aus den gemessenen Kenngrößen werden mit Hilfe von logischen Bedingungen Rückschlüsse auf den Verkehrszustand im Zufahrtstrom gezogen, die dann ggfs. zu bestimmten Steuerentscheidungen führen. Bei der Umsetzung regelbasierter Steuerungsverfahren wird meist sekundlich der in Abbildung 2 dargestellte Ablauf durchlaufen.

Bei der Kenngrößenerfassung werden über Detektoren im Straßenraum verkehrliche Kenngrößen wie Zeitlücken und Belegungsgrade erfasst und ggfs. weitere, nicht direkt messbare Kenngrößen abgeschätzt. Letzteres können beispielsweise mittlere Wartezeiten oder Staulängen sein.

Im Block „Auswertung / Entscheidung“ werden dann - basierend auf bestimmten Bedingungen - festgelegte Steuerungsentscheidungen getroffen. Dazu wird ein Ablaufdiagramm durchlaufen, das auf logischen, zeitlichen und zustandsbezogenen Bedingungen sowie zugehörigen Aktionen beruht. Neben den erfassten Kenngrößen gehen in den Entscheidungsprozess Vergleichs- und Schwellenwerte wie beispielsweise maximale Zeitlückenwerte oder Belegungsgrade und Rahmenvorgaben wie erlaubte Freigabebereiche ein. Abschließend werden die getroffenen Steuerungsentscheidungen in Schaltbefehle umgesetzt.

Mit einem regelbasierten Steuerungsverfahren kann sowohl eine Signalprogrammanpassung (Freigabezeitanpassung, Phasenforderung, Phasentausch oder Versatzzeitanpassung) als auch eine Signalprogrammbildung realisiert werden. Die zugehörigen Entscheidungs- und Steuerungslogiken können jedoch schnell sehr komplex werden.

Moderne Steuergeräte beherrschen in der Regel mehrere der gängigen regelbasierten Steuerungsverfahren wie LISA+, VS-PLUS, PDM/TL und TRELAN/TRENDS.

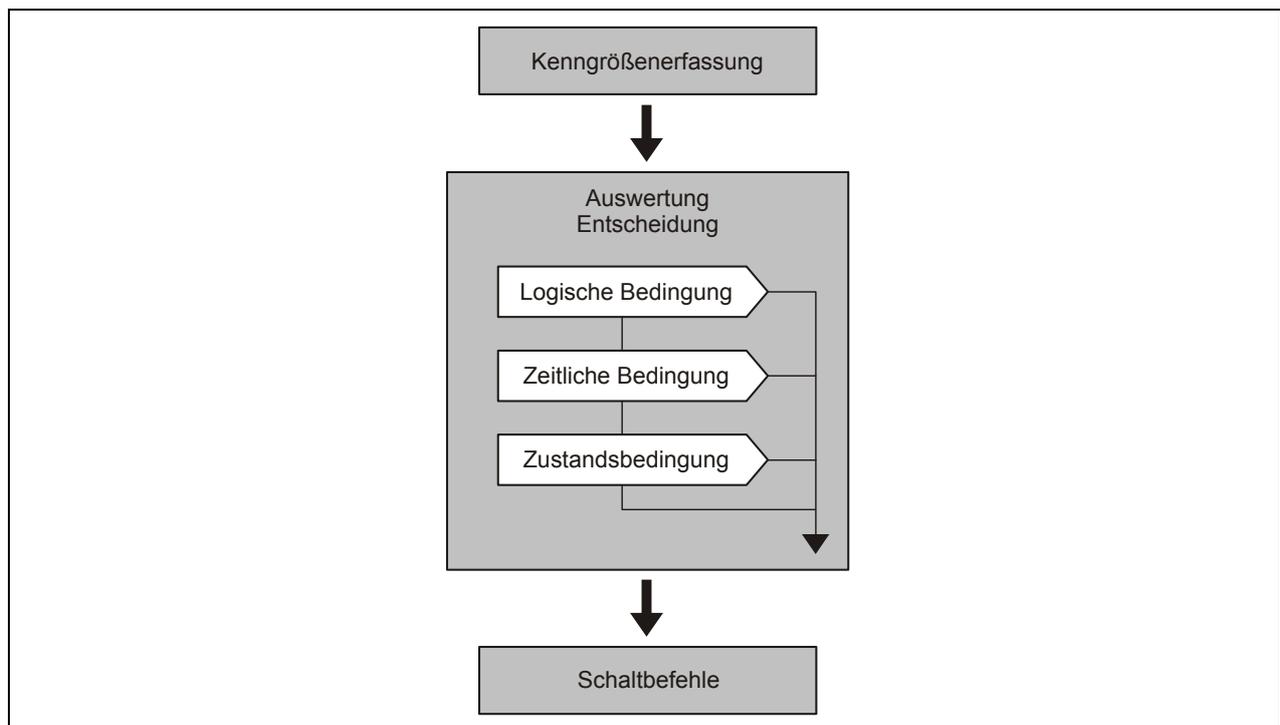


Abbildung 2: Regelbasierte Umsetzung eines Steuerungsverfahrens, nach RiLSA (FGSV [2010]).

2.2.2 Modellbasierte Steuerung

Grundlagen

„Die modellbasierte Umsetzung der Steuerungsverfahren basiert nicht direkt auf den erhobenen Kenngrößen, sondern auf den in einem Modell weiterverarbeiteten Werten.“ [FGSV 2010] Der wesentliche Unterschied zu logikbasierten Systemen ist der Einsatz von Verkehrsmodellen. Mit diesen werden aus den aktuellen Messdaten und unter Zuhilfenahme von historischen Messwerten der Verkehr und die damit in Verbindung stehenden Kenngrößen bis hin zu einem Zeithorizont prognostiziert. Basierend darauf wird die Steuerung dann in einem iterativen Prozess optimiert. (vgl. Abbildung 3).

Mit einem modellbasierten Steuerungsverfahren kann sowohl eine Signalprogrammanpassung (Freigabezeitanpassung, Phasenforderung, Phasentausch oder Versatzzeitanpassung) als auch eine Signalprogrammbildung realisiert werden.

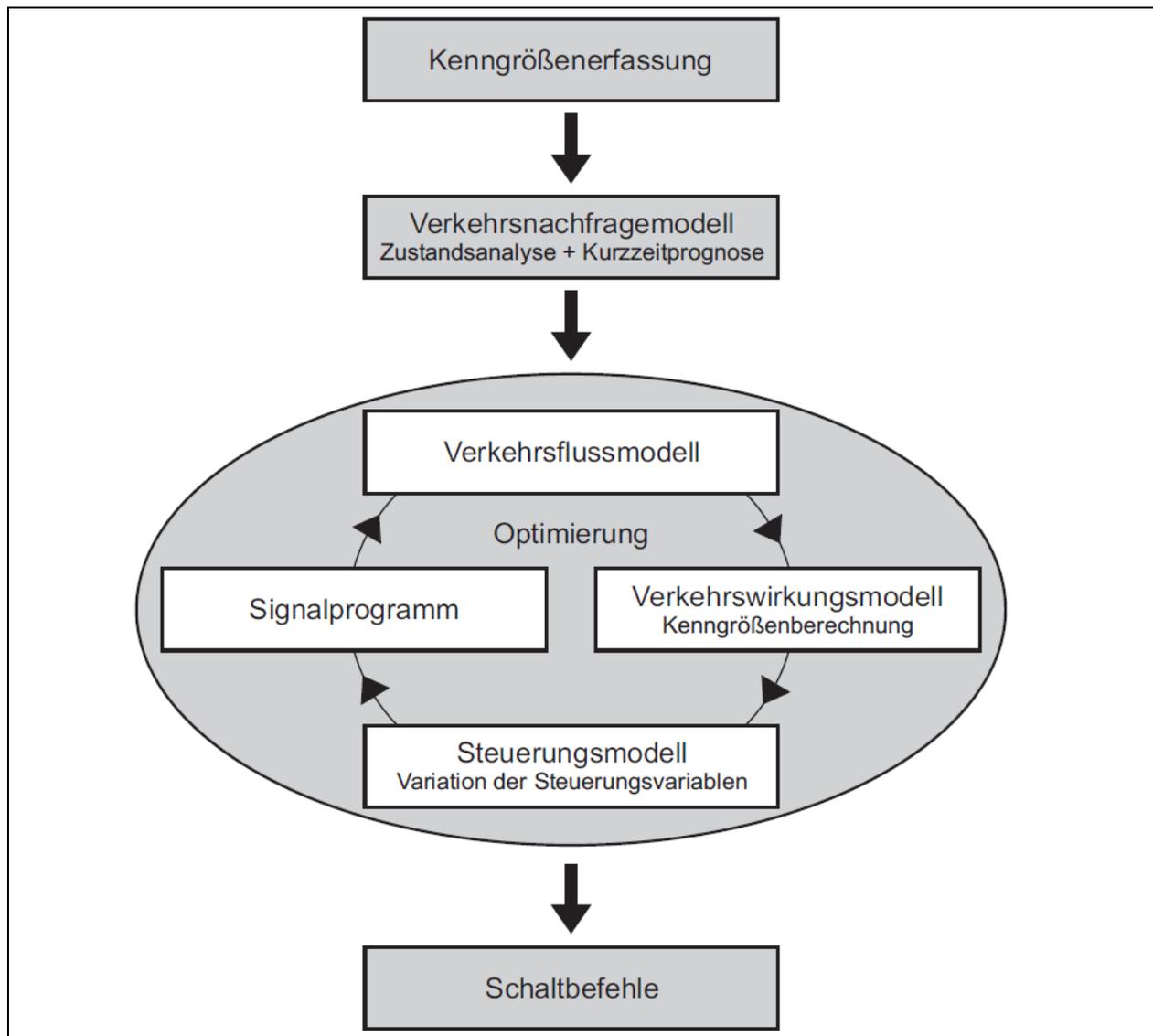


Abbildung 3: Modellbasierte Umsetzung eines Steuerungsverfahrens, nach RiLSA [FGSV 2010].

Kenngrößenerfassung

Der erste Schritt der Steuerung ist die Kenngrößenerfassung. Sie beinhaltet in Abhängigkeit der Art des Verkehrsflussmodells im Wesentlichen Detektordaten relevanter Zu- und Abflüsse sowie wichtiger netzinterner Ströme. Des Weiteren können Auslastungs- und Sättigungsgrade, Abbiegeströme, detaillierte Zuflussganglinien und Rückstaulängen, sowie zusätzliche Rahmenvorgaben des übergeordneten Verkehrsmanagements in die Erfassung einfließen.

Verkehrsnachfragemodell

Mit einem Verkehrsnachfragemodell werden die real gemessenen Daten vervollständigt. In der Regel werden aus den Daten der Detektoren und den aktuellen Schaltzuständen der Lichtsignalanlage eine Zustandsanalyse, sowie eine kurzfristige Prognose erstellt. Das Nachfragemodell liefert dabei Informationen über die Ströme im Netz, Strombelastungspläne und Stromhierarchien.

Verkehrsflussmodell und Verkehrswirkungsmodell

Das Verkehrsflussmodell bildet aus den oben genannten Eingangsdaten und den berechneten LSA-Steuerungsgrößen den Verkehrsablauf im Optimierungsintervall nach. Das Verkehrswirkungsmodell bewertet den ermittelten Verkehrsablauf. Bewertungskenngrößen können Wartezeiten, Anzahl der Halte, Fahrzeiten, Staulängen, Verkehrsstrom bezogene Auslastungsgrade, Verkehrszustände (Level of Service) oder Emissionen sein.

Die modellbasierten Steuerungen werden aufgrund ihrer Komplexität über ihre Modellparametrierung beschrieben. Zu den Verkehrsmodellparametern gehören Pulkauflösung, Zeitbedarfswert für die Fahrzeugströme im Knotenpunkt und Fahrzeiten bzw. Progressionsgeschwindigkeiten.

Steuerungsmodell (Optimierung)

Die Optimierung der Steuerungsgrößen erfolgt in der Regel über eine Zielfunktion. Dazu werden die im Verkehrsflussmodell ermittelten Kenngrößen (Wartezeit, Halte usw.) die jeweils auf Grundlage eines Steuerungsvorschlages ermittelt werden, mit einer festzulegenden Gewichtung zu einem Qualitätsindex (Performance Index) zusammengefasst.

Ein Testen aller möglichen Lösungen (vollständige Enumeration) ist mit zunehmender Netzgröße und Anzahl der einbezogenen Steuerungsgrößen nicht mehr möglich. Es werden daher Optimierungsalgorithmen und Optimierungsstrategien eingesetzt.

Weiterleitung der Schaltbefehle (Systemtechnik, Kompatibilität)

Die in der Zentrale ermittelten Steuerungsanweisungen mit dem besten Qualitätsindex werden an die Steuergeräte übermittelt. Die Steuergeräte der Lichtsignalanlagen müssen die vom Steuerungsverfahren generierten Schaltbefehle verstehen können, d.h. die Schnittstellen der Steuergeräte müssen zur Zentrale kompatibel sein.

2.3 Methoden zur Erfassung und Auswertung

In den AMONES-Testfeldern Bremerhaven und Hamburg wurde über jeweils zehn Tage der Verkehrsablauf erfasst. In diesem Zeitraum wurde das LSA-Steuerungsverfahren variiert:

- Festzeitsteuerung FZS (drei Tage)
- Lokal regelbasierte Steuerung LRS (drei Tage)
- Modellbasierte Netzsteuerung BALANCE/MOTION (vier Tage)

Zusätzlich wurden unter Nutzung der Mikrosimulationssoftware VISSIM der PTV AG Simulationen der realen Testfelder und eines virtuellen Testfeldes durchgeführt, in denen ebenfalls die genannten Steuerungsverfahren sowie weitere Szenarien untersucht wurden.

2.3.1 Verkehrliche Kenngrößen

Der Straßenverkehr ist die Menge der Ortsveränderungen, die von Personen mit Fahrzeugen oder zu Fuß im Straßennetz durchgeführt werden. Um den Verkehrszustand zu einem Zeitpunkt oder den Verkehrsablauf in einem Zeitraum quantifizieren zu können, sind Kenngrößen erforderlich, die die Wirkungen des Verkehrs auf die Verkehrsteilnehmer und auf die Netzbetreiber beschreiben. Im Idealfall werden diese Kenngrößen aus einer vollständigen Zustandsbeschreibung, d.h. den Trajektorien (Weg-Zeit-Verläufen) der Ortsveränderungen aller Verkehrsteilnehmer, berechnet. Die Praxis ist allerdings weit davon entfernt, diese Möglichkeit zu bieten. Grundsätzlich können heute Ortsveränderungen von Verkehrsteilnehmern mit GPS-Geräten genau erfasst werden. Eine kontinuierliche Erfassung aller Verkehrsteilnehmer ist mit dieser Technik aber derzeit noch nicht möglich. Um dem Idealfall möglichst nahe zu kommen, werden im Rahmen von AMONES die folgenden Erfassungsmethoden kombiniert:

- GPS-Messfahrzeuge
- Automatische Kennzeichenerfassung (Automatic Number Plate Recognition oder ANPR)
- Lokale Querschnittszählungen (manuell und Induktionsschleifen)

Die Trajektorien eines GPS-Messfahrzeuges liefern alle wesentlichen Kenngrößen für die Qualitätsbeurteilung einer LSA Steuerung (Fahrzeit, Wartezeit, Anzahl Halte), stellen aber nur eine kleine Stichprobe der Verkehrsteilnehmer dar. ANPR-Systeme (siehe auch Friedrich et al. [2009]) liefern Fahrzeiten für ein großes Kollektiv der Verkehrsteilnehmer und lösen das Problem der kleinen Stichprobengröße bei Messfahrten. Verkehrsstärken aus lokalen Querschnittszählungen erlauben eine Quantifizierung und Bewertung der erhobenen Kenngrößen. Eine Fusion dieser drei Datenquellen liefert die folgenden Ergebnisse (siehe auch Abbildung 4):

- Mittlere Fahrzeiten nach Relationen und Zeitraum
Aus den gefilterten ANPR-Fahrzeiten werden für jede beobachtete Relation mittlere Fahrzeiten für eine Stunde berechnet.
- Anzahl Halte nach Relation und Zeitraum
Die ANPR-Fahrzeiten ermöglichen in Kombination mit der Umlaufzeit und den GPS-Messfahrten eine Ableitung der mittleren Anzahl Halte.
- Durchgangsverkehrsstärken nach Relationen und Zeitraum
Die Durchgangsverkehrsanteile der ANPR-Fahrzeiten erlauben zusammen mit den lokalen Querschnittszählungen die Berechnung des Durchgangsverkehrs. Bei der Hochrechnung der beobachteten Verkehrsstärken jeder Relation auf die gezählte Grundgesamtheit kommt das Verfahren der Entropiemaximierung nach Willumsen [1978] zum Einsatz. Die Durchgangsverkehrsstärken auf den einzelnen Relationen ermöglichen die Quantifizierung und den Vergleich der Kenngrößen auf verschiedenen Relationen.

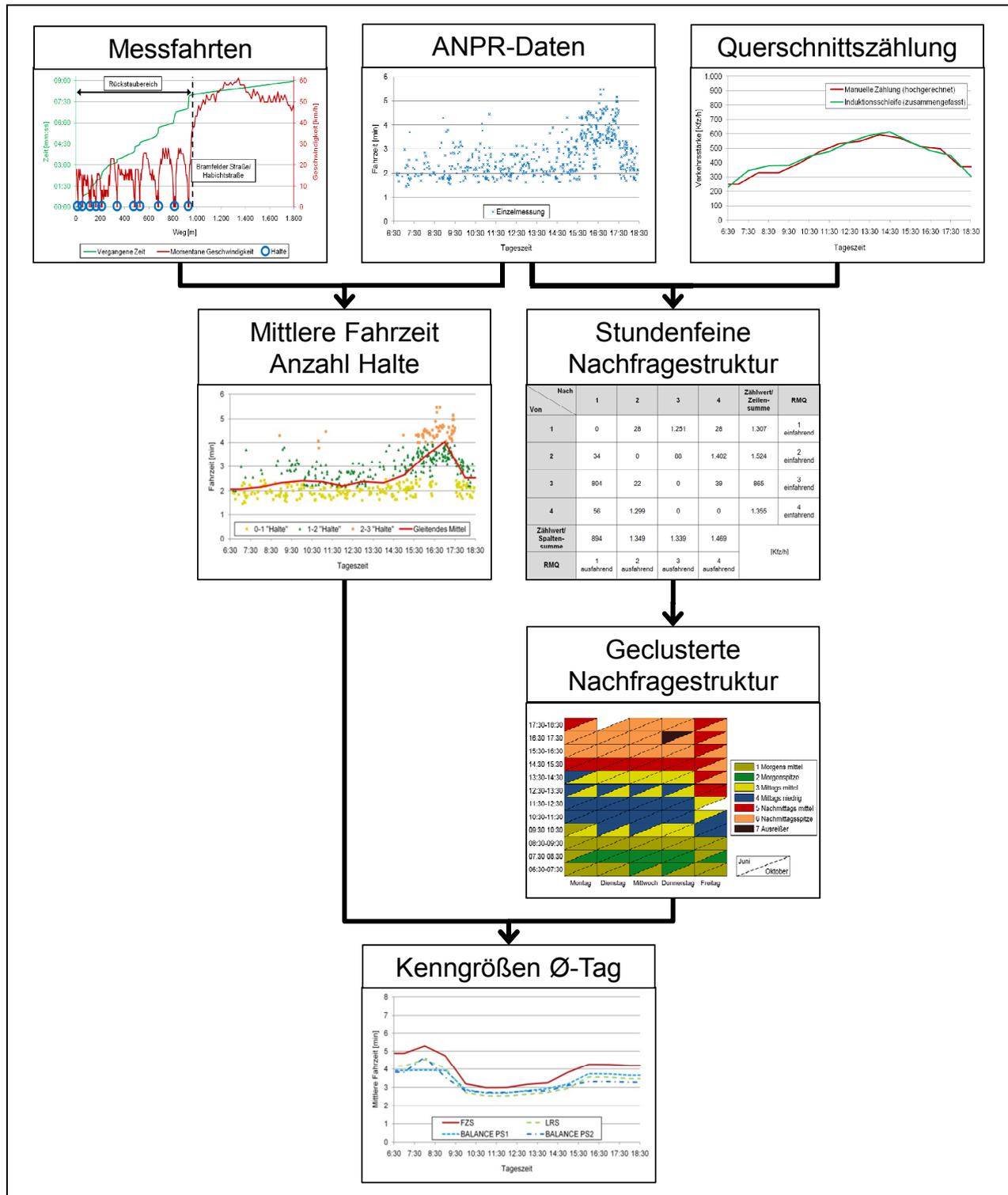


Abbildung 4: Workflow für die Verarbeitung der verkehrlichen Kenngrößen.

- Stundengruppen ähnlicher Verkehrsnachfragestruktur
 Basierend auf der durch den Durchgangsverkehr und den lokalen Verkehrsstärken bestimmten Verkehrsnachfragestruktur wird eine Clusterung durchgeführt (siehe dazu Jain Dubes [1988] oder Zahn [1971]), die eine auf dem GEH [UK Highway Agency 1996] aufbauende Distanzfunktion verwendet. Die Clusterung fasst Stunden mit ähnlicher Struktur

zusammen und ermöglicht einen Vergleich von Kenngrößen mit ähnlicher Verkehrsnachfragestruktur (z. B. „Morgenspitze“, „niedriger Morgenverkehr“, „Mittagsverkehr“, usw.).

- Ganglinien der mittleren Kenngrößen (Fahrzeiten, Anzahl Halte) für einen durchschnittlichen Tag nach LSA-Steuerungsverfahren

Das Ergebnis der Clusterung erlaubt die Bildung von durchschnittlichen Verkehrstagen, die eine direkte Gegenüberstellung der verschiedenen Steuerungsverfahren ermöglichen. Dafür werden die Kenngrößen jedes Steuerungsverfahrens, gewichtet nach den Clusteranteilen, zusammengefasst, so setzt sich der Zeitraum von 6:30-7:30 Uhr z. B. aus 75 % „Morgenspitze“ und 25 % „niedriger Morgenverkehr“ zusammen.

2.3.2 Umweltbezogene Kenngrößen

Zur Beantwortung der Frage, inwieweit die modellbasierte Netzsteuerung zur Einhaltung der Europäischen Luftqualitätsgrenzwerte für Feinstaub und Stickoxid beitragen kann, ist eine Betrachtung der *immissionsbezogenen* Wirkungen der LSA Steuerung erforderlich. Die Quantifizierung dieser Wirkungen gestaltet sich jedoch schwierig: So lassen sich mittels physikalischer Immissionsmessungen die Einflüsse des Verkehrs nicht isoliert, sondern nur in Kombination mit einer Vielzahl weiterer Einflüsse, die zum Teil in Wechselwirkung miteinander stehen, erfassen (Abbildung 5). Beispielhaft sei hier der Einfluss der Temperatur auf die Kaltstartemissionen des Verkehrs genannt. Zudem wird ein Großteil der eingesetzten Immissionsmesstechnik mit einer zeitlichen Auflösung von Stundenmittelwerten betrieben, so dass die hohe Varianz des Verkehrsflusszustands nicht ausreichend berücksichtigt wird.

Alternativ zur physikalischen Messung können die Wirkungen verkehrlicher Maßnahmen mittels Modellen quantifiziert werden. Neben günstigeren Betriebskosten und der hohen Transparenz ihrer Ergebnisse bieten Modelle den wesentlichen Vorteil, dass nicht nur punktuelle, sondern auch flächendeckende Aussagen bezogen auf ein ganzes Straßennetz möglich sind. Allerdings weisen die heutigen Modelle aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge, aber auch aufgrund ungenauer sowie zeitlich und/oder räumlich stark aggregierter Eingangsgrößen häufig Abweichungen zu physikalisch gemessenen Werten in einer Größenordnung von 20 % bis 40 % auf. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass Maßnahmen zur Verbesserung des Verkehrsflusses ein Reduktionspotenzial haben, das nur in der Größenordnung eines Bruchteils der Unsicherheit der Modelle liegt (vgl. z. B. Hirschmann, Fellendorf [2009]). Eine Bewertung der immissionsbezogenen Wirkungen der LSA-Steuerung mit gängigen Ansätzen und Eingangsgrößen erscheint daher nicht ausreichend.

Aus diesem Grund werden in AMONES zwei Ansätze verfolgt, um die umweltbezogenen Wirkungen der LSA Steuerung zu ermitteln (siehe auch Abbildung 6):

1. Ermittlung der *immissionsbezogenen Wirkungen an einem Umwelt-HotSpot*: Hierzu werden straßenseitige Immissionen, ebenso wie meteorologische und verkehrliche Kenngrößen zeitlich hoch aufgelöst (Messintervalle < 1 Minute) erfasst, um auch die Wirkungen kurzzeitiger Störungen im Verkehrsfluss bewerten zu können. Die maßgebenden Einflussgrößen auf die lokale Immissionsbelastung werden identifiziert und quantifiziert.

Sofern der Einfluss einer erfassten Verkehrsflusskenngröße (z. B. Anfahrvorgänge) in den gemessenen Immissionen erkennbar ist, werden immissionsbezogene Wirkungspotenziale der verbesserten Koordinierung durch die modellbasierte Steuerung abgeleitet.

2. Ermittlung der *emissionsbezogenen Wirkungen im gesamten Netz*: Hierzu werden die mit Emissionskennfeldern gekoppelten mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen hinsichtlich der motorbedingten Emissionen ausgewertet.

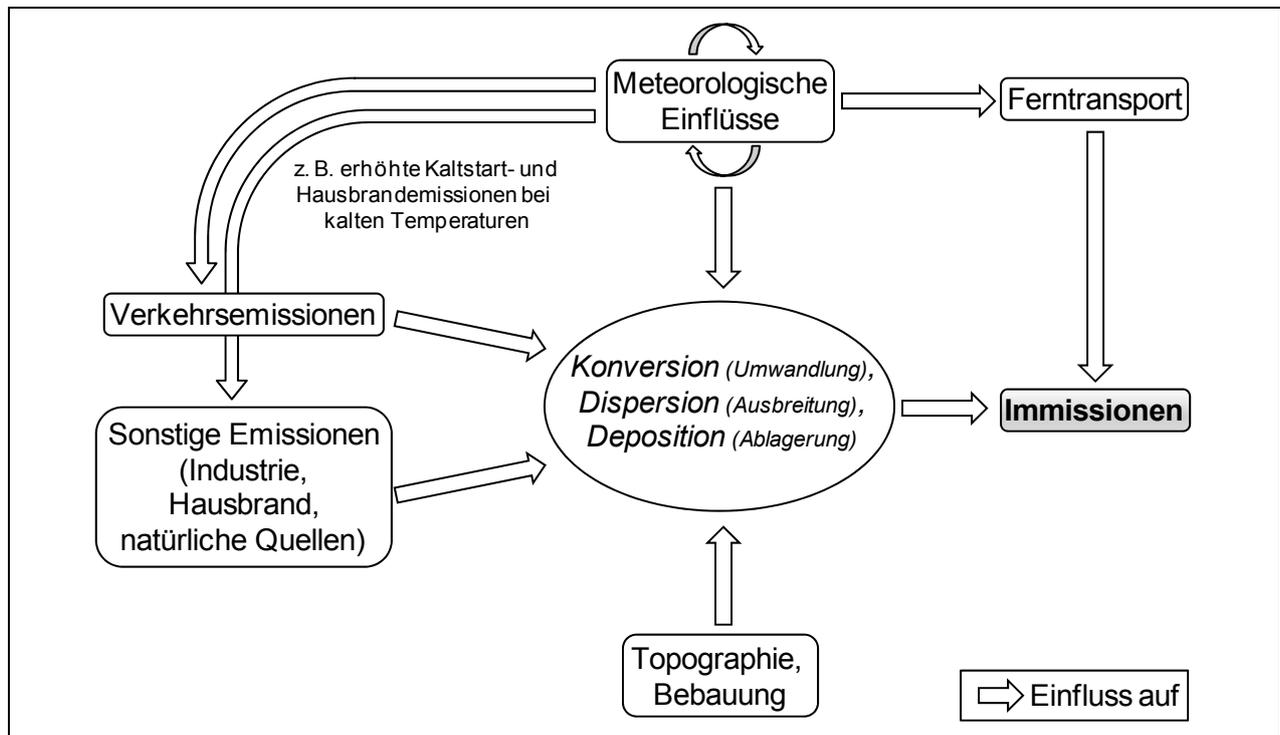


Abbildung 5: Einflüsse auf die Immissionsbelastung mit Luftschadstoffen.

Die lokalen Immissionen am HotSpot werden differenziert nach folgenden Wirkungszusammenhängen untersucht:

- Wirkungszusammenhänge, die sich *aus Änderungen im Tagesgang einzelner Verkehrskenngrößen ergeben*. Hier werden vor allem tageszeit- und wochentagbedingte Schwankungen der Verkehrsnachfrage und der Qualität des Verkehrsablaufs untersucht. Dabei muss aber einschränkend festgehalten werden, dass mit nur 10 Messtagen je Testfeld kein allgemein gültiges Modell für den Tagesgang der Immissionsbelastung entwickelt werden kann.
- Wirkungszusammenhänge, die *kurzzeitige Schwankungen von Verkehrskenngrößen im einzelnen Umlauf* (unabhängig vom Tagesgang) betreffen. Der praktische Nutzen der Kenntnis solcher kurzzeitiger oder hochfrequenter Wirkungszusammenhänge kann in Maßnahmen wie beispielsweise einer gezielten Grünzeitverlängerung für Fahrzeugpuls zur Vermeidung von einzelnen Immissionsspitzenbelastungen resultieren. Zur Untersuchung der kurzfristig erkennbaren Wirkungen werden die gemessenen Zeitreihen um den Tagestrend bereinigt und mit einer zeitlichen Auflösung von 5 bis 10 Minuten (je nach Umlaufzeit der LSA) untersucht.

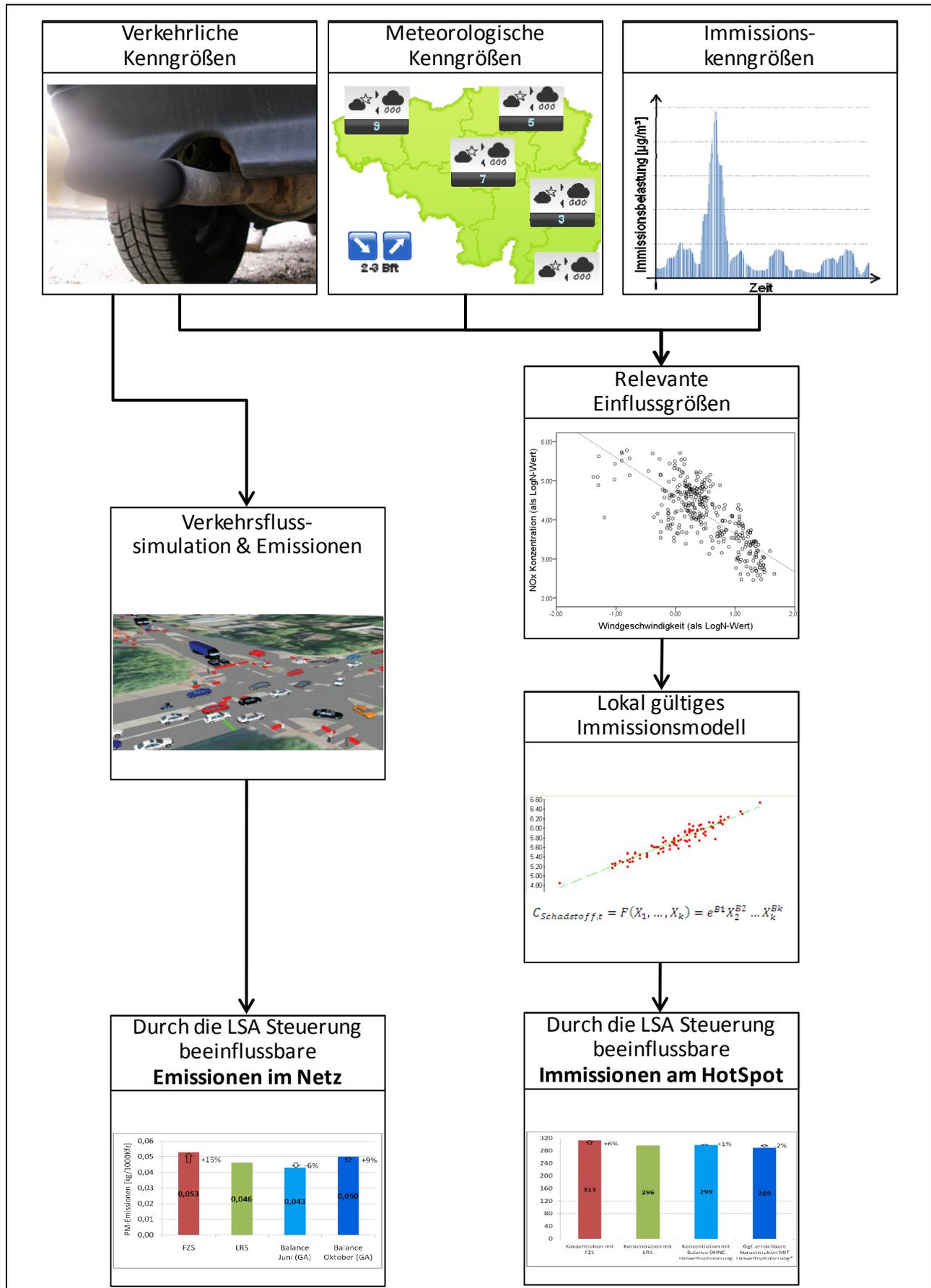


Abbildung 6: Workflow für die Verarbeitung der Umweltkenngrößen.

2.3.3 Simulation

Für die verkehrliche Bewertung werden in den Simulationsszenarien im Wesentlichen die Verlustzeiten und die Anzahl der Halte im gesamten Netz betrachtet. Die Halte und die daraus resultierenden Wartezeiten des Öffentlichen Personennahverkehrs werden dabei gesondert ausgewertet. „In einer Verlustzeitmessung wird über alle betrachteten Fahrzeuge auf einem oder mehreren Streckenabschnitten der mittlere Zeitverlust gegenüber der idealen Fahrt (ohne andere Fahrzeuge, ohne Signalisierung) ermittelt.“ [PTV 2008]. Es wird also die tatsächliche Fahrzeit mit der für das jeweilige Fahrzeug ermittelten Wunschgeschwindigkeit verglichen. Im Gegensatz zur Auswertung der realen Messungen wird hier allerdings keine einheitliche Wunschgeschwindigkeit angenommen, sondern die dem Fahrzeug in der Simulation tatsächlich zugewiesene Wunschgeschwindigkeit. Daraus ergeben sich für die Auswertung leichte Unterschiede im Absolutwert zwischen Simulation und realen Messungen.

Für die Betrachtung der Anzahl der Halte ist zunächst abzugrenzen, was von der Simulationssoftware als „Halt“ definiert wird: „Ein Halt ist dadurch definiert, dass ein Fahrzeug, was sich nicht im Stau befindet, die Eintrittsgeschwindigkeit der Staubedingung unterschreitet.“ und „Ein Fahrzeug erfüllt die Staubedingung, sobald es den Beginn-Wert unterschreitet und noch nicht wieder schneller fährt als der Wert, der bei Ende eingetragen ist.“ [PTV 2008] Für die Staubedingungen wurden die Standardeinstellungen aus VISSIM übernommen. Danach wird zunächst ein Halt gezählt, sobald ein Fahrzeug eine Geschwindigkeit von 5 km/h unterschreitet. Ein weiterer Halt für dasselbe Fahrzeug kann erst gezählt werden, wenn es zuvor eine Geschwindigkeit von 10 km/h wieder überschritten hat. „Für jedes ÖV-Fahrzeug wird jeder Halt, der nicht aufgrund eines Fahrgastwechsels oder wegen eines Stoppschildes stattfindet, mit Zeitdauer protokolliert.“ [PTV 2008]

Die eingesetzte VISSIM-Version ist mit Emissionskennfeldern verknüpft, die auf Messreihen der Universität Graz und des Volkswagen Konzerns beruhen. Emissionskennfelder beschreiben die Emissionen von Kraftfahrzeugen in Abhängigkeit von operativen Parametern wie der Drehzahl oder dem Luft-Kraftstoff-Verhältnis. In VISSIM werden die Pkw-Emissionen auf Grundlage der Geschwindigkeit und dem Produkt aus Beschleunigung und Geschwindigkeit und die Lkw-Emissionen auf Grundlage von Drehzahl und Leistung für eine definierte Flottenzusammensetzung modelliert [PTV 2005]. Ausgewertet werden schließlich die Emissionen und der Kraftstoffverbrauch in Kilogramm auf den Hauptrelationen und im gesamten Netz, differenziert nach Fahrzeugklassen und Kraftstoffkonzepten.

2.4 Testfelder und Ergebnisse

2.4.1 Bremerhaven

2.4.1.1 Beschreibung des Testfeldes

Abbildung 7 zeigt das Testfeld Bremerhaven, das aus der Columbusstraße in Nord-Süd-Richtung und der Lloydstraße in Ost-West-Richtung besteht. Entlang dieses ca. 1,6 km langen und vornehmlich zwei-streifigen Streckenzugs befinden sich insgesamt neun Lichtsignalanlagen, die seit Anfang 2008 mit dem verkehrsadaptiven Netzsteuerungsverfahren MOTION gesteuert werden.

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

- Festzeitsteuerung
- lokale regelbasierte Steuerung ohne ÖPNV Beschleunigung
- lokale regelbasierte Steuerung mit ÖPNV Beschleunigung

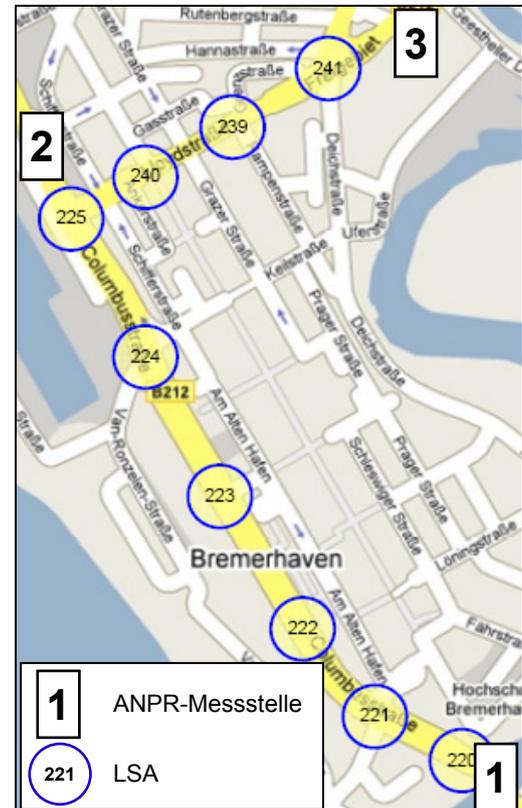


Abbildung 7: Netzplan Bremerhaven.

Für die Simulationen mit MOTION konnten, bis zum Ende des Projektes, 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 Umweltkenngößen im Rahmen von AMONES primär dem Erkenntnisgewinn in Bezug auf die Zusammenhänge zwischen Verkehrs- und Umweltkenngößen und auf die Optimierungspotenziale einer Verkehrssteuerung.

2.4.1.2 Ergebnisse - verkehrliche Kenngrößen

Erhebung

Der geringe Durchgangsverkehr zwischen den Messstellen 1 und 3 (Abbildung 7) erlaubt lediglich die Erhebung der Fahrzeiten entlang vier der theoretisch möglichen sechs Relationen. Tabelle 1 zeigt die Anzahl der von den ANPR-Systemen erhobenen Fahrzeiten und die GPS-

Fahrten, die zur Ableitung der Anzahl Halte und zur Plausibilisierung der Ergebnisse verwendet werden.

Relation	ANPR-Beobachtungen		GPS-Fahrten	
	Gesamt	Je Stunde	Gesamt	Je 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 1: Statistik der in Bremerhaven erhobenen Daten.

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. Abbildung 8 zeigt den Verlauf der mittleren Fahrzeiten differenziert nach Steuerungsverfahren über alle beobachteten Relationen für einen durchschnittlichen Tag.

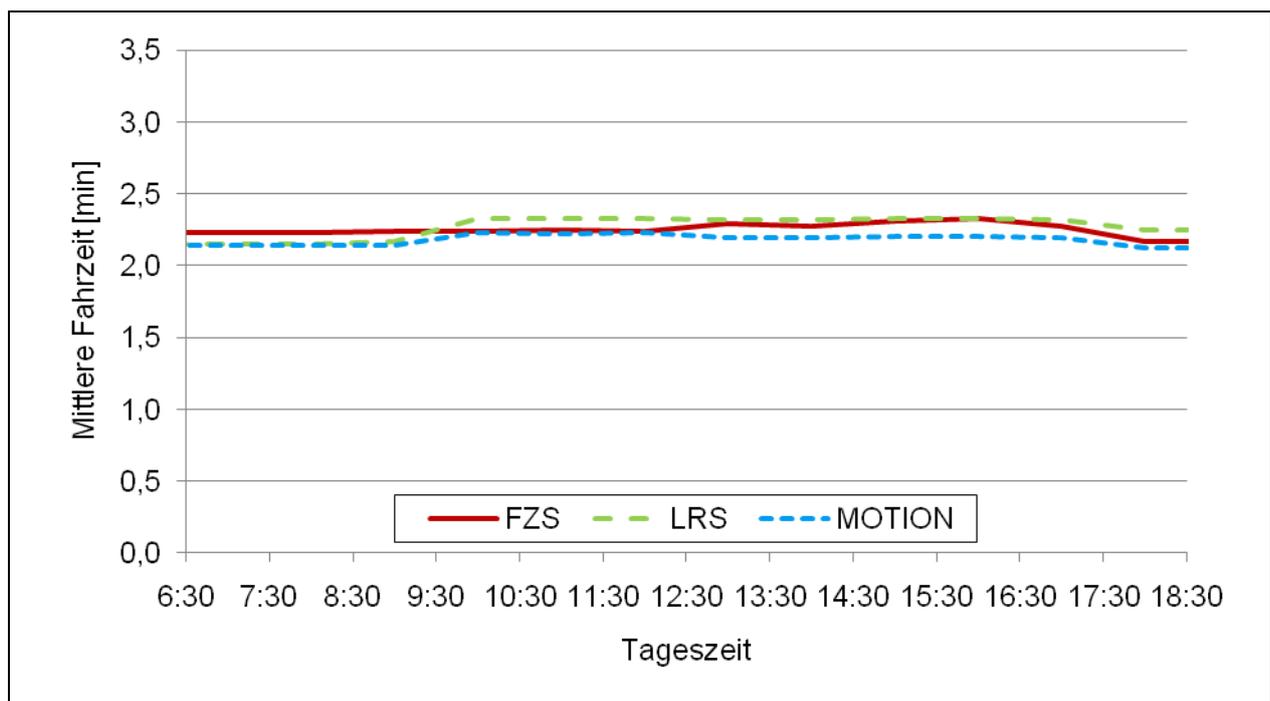


Abbildung 8: Mittlere Fahrzeiten für einen durchschnittlichen Tag in Bremerhaven.

Wie in Tabelle 2 dargestellt, zeigen sich zwischen der FZS und der LRS keine auffälligen Unterschiede. 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.

Steuerungsverfahren	Mittlere normierte Fahrzeit (LRS=100)	Mittlere normierte Anzahl der Halte (LRS=100)
Festzeitsteuerung	99	101
Lokal regelbasierte Steuerung (mit Priorisierung des ÖV)	100	100
MOTION (mit Priorisierung des ÖV)	96	85

Tabelle 2: Vergleich der normierten mittleren Kenngrößen Fahrzeit und Anzahl der Halte in Bremerhaven (LRS=100).

Simulation

Nachfolgend sind für die verschiedenen Steuerungsverfahren die mittlere Anzahl der Halte über den Tag (Abbildung 9) als Mittelwert der zehn durchgeführten Simulationsläufe dargestellt.

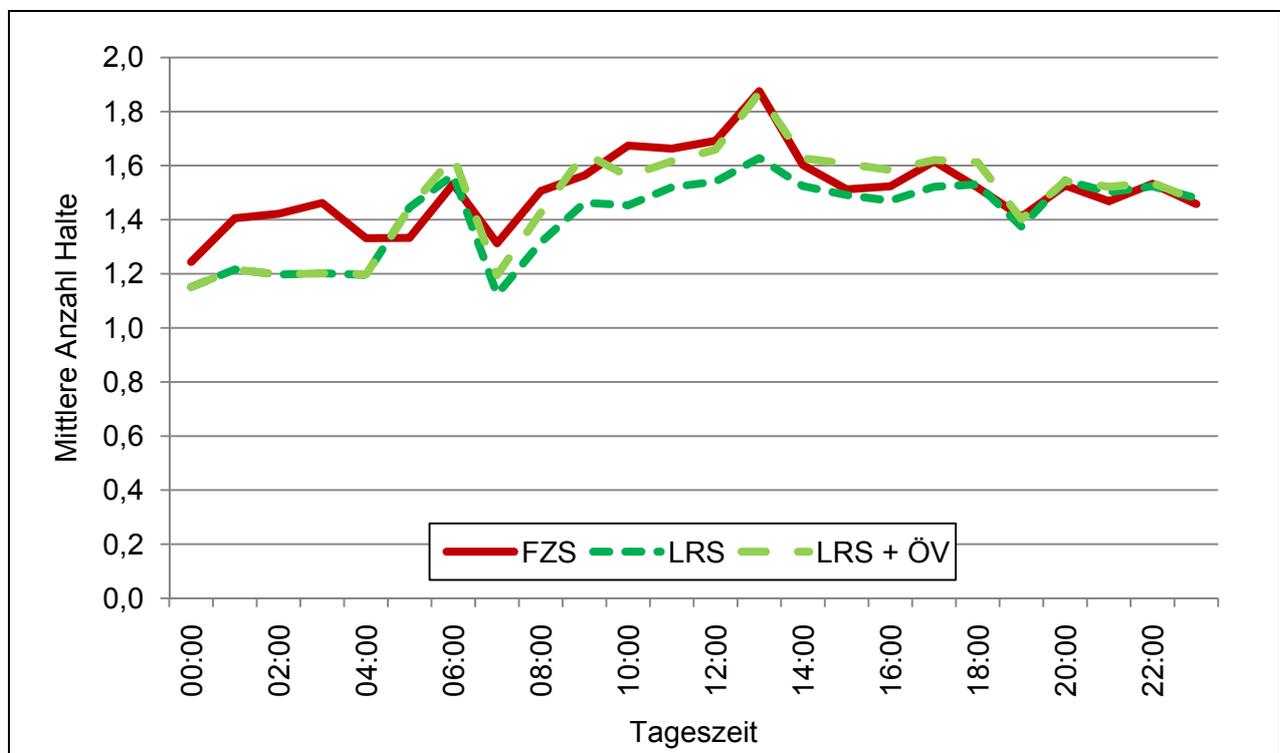


Abbildung 9: Durchschnittliche Anzahl Halte nach Steuerungsverfahren für das gesamte Netz.

Bis 5:00 Uhr und ab 22:00 Uhr sind die Ergebnisse für die lokale regelbasierte Steuerung mit und ohne Beschleunigung des ÖPNV deckungsgleich, da in dieser Zeit keine Busse verkehren. Die Steuerung ist daher, aufgrund der fehlenden Anfragen des ÖPNV, mit der Steuerung ohne ÖPNV identisch.

Die lokal regelbasierte Steuerung kann ihre Vorteile in Bremerhaven vor allem bei mittleren und sehr niedrigen Verkehrsstärken ausspielen. Bei hohen Verkehrsstärken kann aufgrund der Auslastung der Nebenströme von der Steuerung nicht sehr stark eingegriffen werden. Grund für die schlechteren Ergebnisse in den Nachstunden der lokalen regelbasierten Steuerung ist, dass bei geringer Nachfrage die Fahrzeugpuls sehr leicht auseinander brechen und eine Phase

aufgrund der Zeitlückensteuerung abgebrochen wird obwohl noch nicht alle Fahrzeuge die Haltelinie passiert haben. Bei sehr niedrigen Verkehrsstärken sind dagegen gar keine Pulks vorhanden, so dass dieser Effekt nicht eintreten kann.

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

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

Steuerungsverfahren	Mittlere normierte Verlustzeit (LRS mit ÖV=100)	Mittlere normierte Standzeit (LRS mit ÖV=100)	Mittlere normierte Anzahl Halte (LRS mit ÖV=100)
Festzeitsteuerung	96	95	99
Lokal regelbasierte Steuerung (ohne Priorisierung des ÖV)	92	90	93
Lokal regelbasierte Steuerung (mit Priorisierung des ÖV)	100	100	100

Tabelle 3: Vergleich der mittleren normierten Kenngrößen in der Simulation für das gesamte Netz (LRS mit ÖV=100).

2.4.1.3 Ergebnisse - umweltbezogene Kenngrößen

Erhebung

Tabelle 4 zeigt die in den verschiedenen lokalen Immissionsmodellen enthaltenen Prädiktoren, d. h. die Kenngrößen die für die Erklärung oder Vorhersage der Immissionen eine signifikante Bedeutung aufweisen. Wie unter 2.3.2 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 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 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 PM₁₀-Modellen ist der Schwerverkehrsanteil die maßgebende verkehrliche Kenngröße. Die relevanten meteorologischen Prädiktoren und ihre Vorzeichen sind fachlich plausibel.

Prädiktorkenngröße	NO _x		PM ₁₀		PM _{2,5}	
	nieder-frequent	hoch-frequent	nieder-frequent	hoch-frequent	nieder-frequent	hoch-frequent
Windgeschwindigkeit	-/-	-/-				
Windrichtung	+/+	+/+				
Windvektor (Geschw. X Richtung)			+/+	+/+	+/+	+/+
Luftdruck			/+		/+	
Wasserdampf-Verhältnis	-/-					
Ozon-Konzentration	-/-					
PM ₁₀ -Hintergrund			+/+		+/+	
Verkehrsstärke		+/+		+/+		+/+
Durchfahrten	+/+					
SV-Anteil			+/+		+/	

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

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 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.

Simulation

Da die Simulationen mit MOTION keine plausiblen Ergebnisse lieferten und die Hauptzielsetzung bei der Untersuchung der umweltbezogenen Kenngrößen das Aufzeigen der Verbesserungspotentiale von modellbasierten Netzsteuerung sind, ist die Ergebnisanalyse der umweltbezogenen Kenngrößen nicht möglich und entfällt deshalb an dieser Stelle.

2.4.2 Hamburg

2.4.2.1 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 (siehe Abbildung 10). Die Hauptrelationen verlaufen dabei entlang der Bramfelder Straße (gelb) und der Habichtstraße (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.

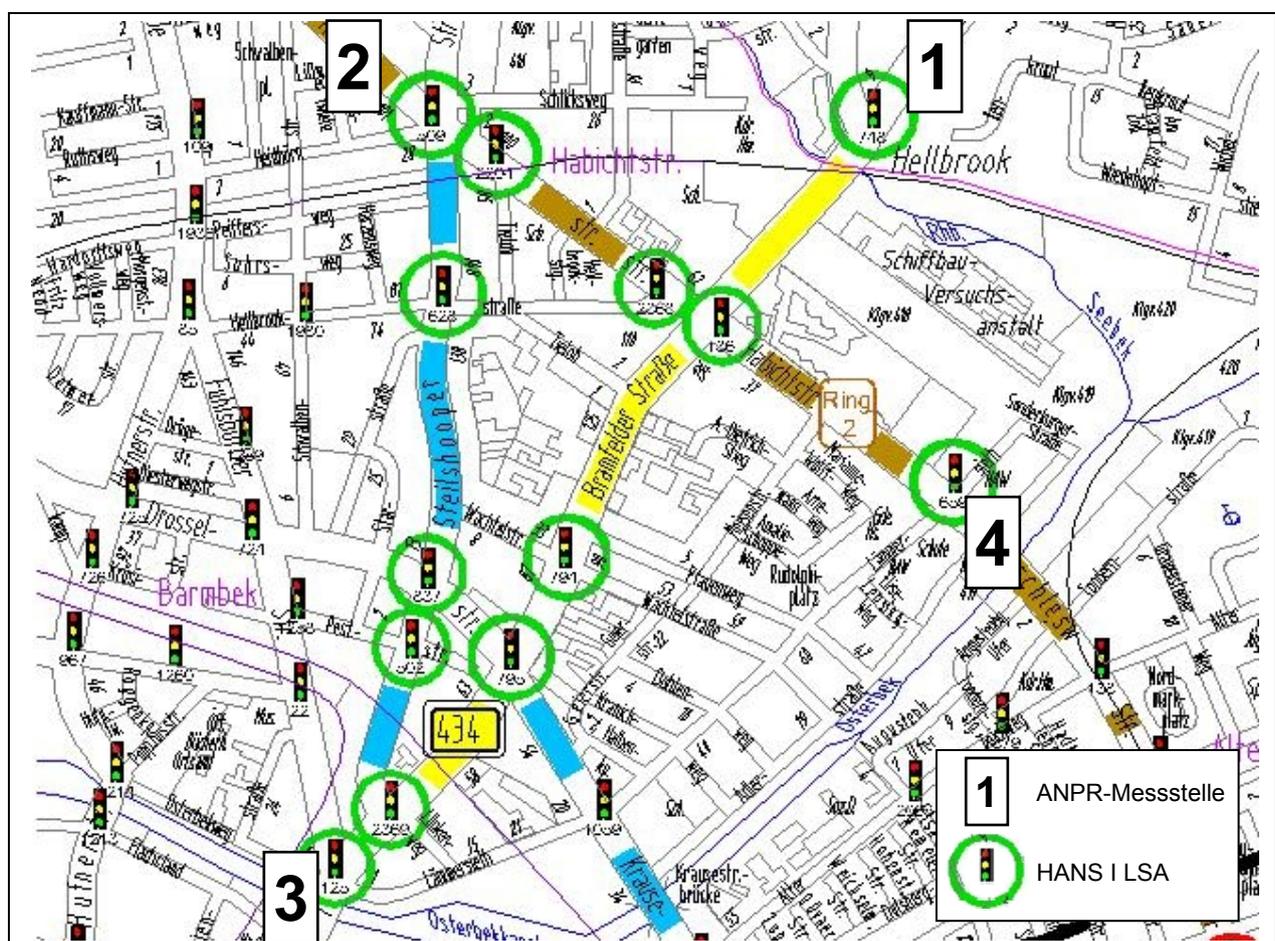


Abbildung 10 Netzplan Hamburg, Steuerungsgebiet HANS I.

Die zehntägigen Erhebungen wurden in der ersten Juniwoche und der zweiten Oktoberwoche 2008 durchgeführt (wie in Bremerhaven von Montag bis Freitag, 6:30-18:30 Uhr). Aufgrund unterschiedlicher BALANCE Parametersätze wurden vier Steuerungsszenarien untersucht. Dabei fallen drei Tage auf eine Festzeitsteuerung, drei Tage auf eine lokal 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 Szenarien 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 (NO₂: 50-60 %; PM₁₀: 22 %), so dass verkehrliche Maßnahmen ein Verbesserungspotenzial zumindest für NO₂ in einer messbaren Größenordnung erwarten lassen.

2.4.2.2 Ergebnisse - verkehrliche Kenngrößen

Erhebung

Die vier ANPR-Messstellen (Abbildung 10) erlauben die Erhebung der Fahrzeiten von zwölf Relationen. Wie Tabelle 5 zeigt, weisen die Geradeaus-Beziehungen entlang der Bramfelder Straße und der Habichtstraße die höchsten Verkehrsstärken auf.

Relation	Abbiege- beziehung	ANPR-Beobachtungen		GPS-Fahrten	
		Gesamt	Je Stunde	Gesamt	Je 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 5: Statistik der in Hamburg erhobenen Daten.

Die Verkehrsstärken an den relevanten Eingangsquerschnitten des Untersuchungsgebiets liegen in Hamburg zwischen 16.000 und 24.000 Kfz/Tag. Während der Morgen- und der Nachmittagsspitze treten regelmäßig Störungen im Verkehrsfluss auf. Abbildung 11 zeigt den Verlauf der mittleren Fahrzeiten differenziert nach Steuerungsverfahren über alle beobachteten Relationen für einen durchschnittlichen Tag.

Wie in Tabelle 6 dargestellt, zeigen sich zwischen LRS und BALANCE im Verlauf eines gesamten Tages von 6:30-18:30 Uhr keine auffälligen Unterschiede. Werden hingegen nur die Morgenstunden von 6:30-9:30 Uhr betrachtet, schneiden die beiden BALANCE-Verfahren besser ab. Der Verlauf der Kenngrößen in Abbildung 11 zeigt, dass über die Mittagszeit die lokal regelbasierte Steuerung die besten Kenngrößen aufweist und BALANCE PS2 schließlich 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 abrechen oder überspringen kann. Die Verkehrsnachfrage in der Hauptverkehrszeit überschreitet die Kapazität, sodass das Ausnutzen dieser Eingriffsmöglichkeit mit messbaren Verbesserungen verbunden ist.

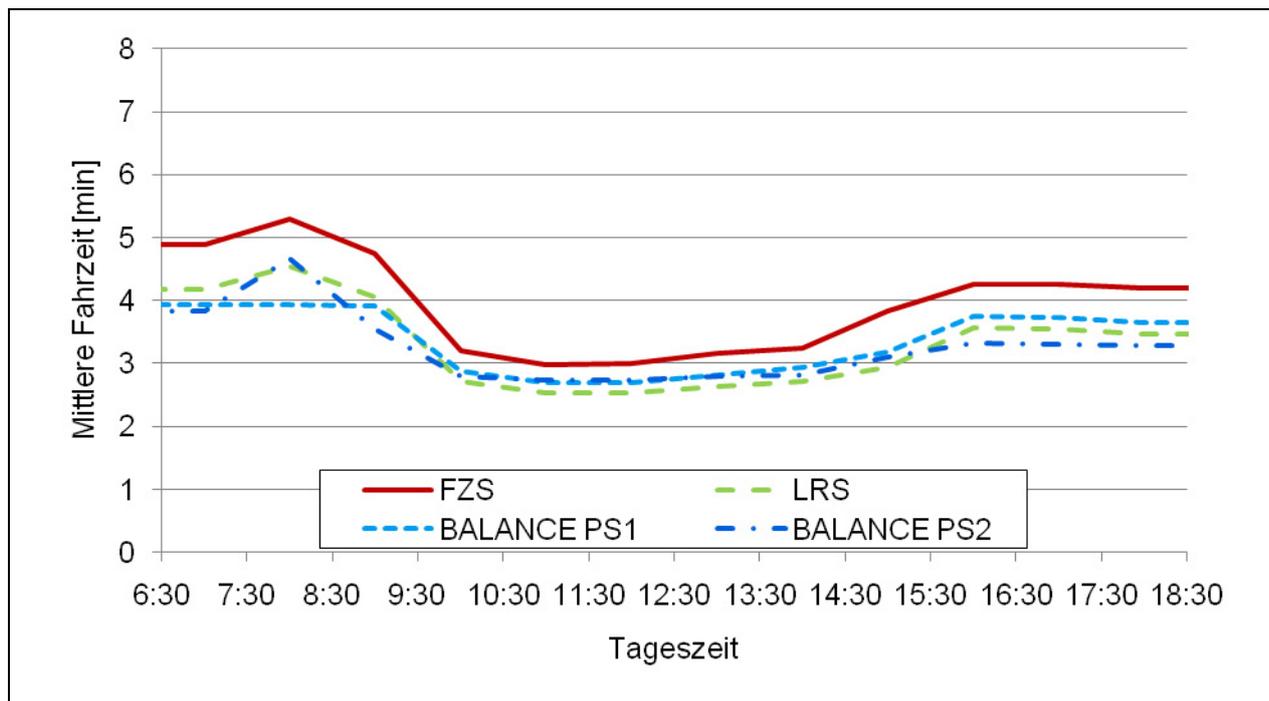


Abbildung 11: Mittlere Fahrzeiten für einen durchschnittlichen Tag in Hamburg.

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

Tabelle 6: Vergleich der normierten mittleren Kenngrößen Fahrzeit und Anzahl der Halte in Hamburg (LRS=100).

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 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

Der wesentliche Vorteil der Simulation gegenüber der Messung liegt darin, dass in der Simulation nicht nur die Fahrzeuge auf den mittels Messtechnik erfassten Relationen sondern alle Fahrzeuge im Netz in die Auswertung einbezogen werden konnten. Zudem bietet die Simulationsumgebung die Möglichkeit zur Untersuchung zusätzlicher Szenarien.

In einem ersten Schritt wurde zunächst die Simulationsumgebung gemäß der in „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ [FGSV 2006] beschriebenen Vorgehensweise kalibriert. Als Zielkenngrößen wurden dabei die Verkehrsstärken und Fahrzeiten aus den Feldmessungen verwendet. Anschließend wurden die verschiedenen Szenarien simuliert, wobei zur Schaffung einer hinreichenden statistischen Aussagekraft in der Regel 20 Simulationsläufe pro Szenario und Steuerungsvariante durchgeführt wurden.

Die Simulationsergebnisse werden hier am Beispiel des Szenarios A verdeutlicht, welches in der Spitzenstunde eine um 19 % höhere Nachfrage in der östlichen Zufahrt 4 gegenüber dem Mittelwert der über alle Messtage erhobenen Nachfrage aufweist (weshalb die Ergebnisse nicht direkt mit den Ergebnissen aus der Erhebung vergleichbar sind).

Da die Simulationen insgesamt sehr rechenaufwändig waren, wurde für die meisten Szenarien nur der Zeitraum zwischen 6:30 Uhr und 9:30 Uhr betrachtet, welcher im Wesentlichen die morgendliche Spitzenstunde einschließt. Wie Abbildung 11 zeigt, ist dies der Zeitbereich, in dem bei den Messungen die größten 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 im Szenario A 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 in diesem stark ausgelasteten Szenario noch eine deutliche Verringerungen der Verlustzeiten bewirken (Tabelle 7).

Je nach Optimierungsverfahren und Parametereinstellung verschiebt BALANCE die auftretenden Verlustzeiten unterschiedlich stark auf die einzelnen Relationen (Abbildung 12), wodurch vom Planer steuernd eingegriffen werden kann. Leider sind die Auswirkungen der Parametrierung und des Optimierungsverfahrens nicht direkt vorhersehbar, so dass der Bearbeiter sich hier an eine geeignete Lösung herantasten muss. Da sich bei ungeeigneten Parametern auch extreme Verschlechterungen für einzelne Verkehrsströme ergeben können, ist dazu die Nutzung einer Simulation unbedingt zu empfehlen.

In allen betrachteten Szenarien kann BALANCE gegenüber der LRS eine deutliche Verringerung der Verlustzeiten (netzweit um 7% bis 19%) sowie der Anzahl Halte (netzweit um

5% bis 16%) bewirken. Die dazu erforderlich Parametrierung ist jedoch nicht transparent und variiert zwischen den verschiedenen Szenarien. Sie ist daher nicht einfach durchzuführen.

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

Tabelle 7: Vergleich der mittleren normierten Verlustzeit pro Kfz im Simulationsszenario A (LRS=100).

Die Ergebnisse aus Szenario A belegen außerdem, dass es für eine umfassende Bewertung nicht ausreicht, lediglich einen Teil der Verkehrsströme zu betrachten (Tabelle 7). Während man aufgrund der Daten für die vier Hauptrelationen hier wohl den Parametersatz 2 favorisieren würde, zeigt die netzweite Betrachtung auf, dass PS 1 die bessere Wahl wäre. Wirkungsbetrachtungen für das Gesamtnetz lassen sich nur in Simulationsstudien durchführen.

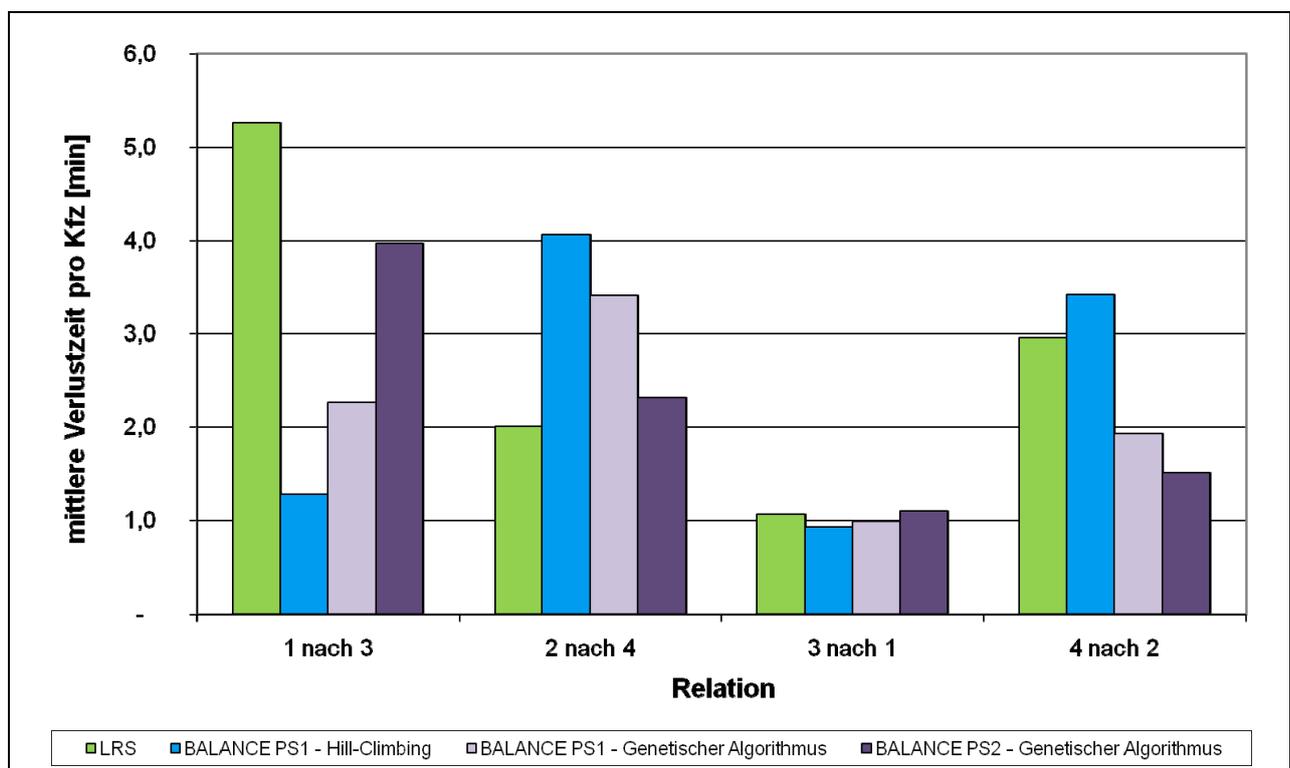


Abbildung 12: Vergleich der mittleren Verlustzeiten pro Kfz auf den vier Hauptrelationen im Simulationsszenario A.

2.4.2.3 Ergebnisse - umweltbezogene Kenngrößen

Erhebung

Tabelle 8 zeigt die in den verschiedenen lokalen Immissionsmodellen enthaltenen Kenngrößen mit signifikantem Erklärungsbeitrag an den gemessenen Immissionszeitreihen. Wie unter 2.3.2 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 Tabelle 8 als „niederfrequent“ und letztere als „hochfrequent“ bezeichnet.

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

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

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 Prädiktoren 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 etwa 40 bis 50 % der Varianz bei einem relativen Fehler von etwa 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 Koordinierung 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. Abbildung 13 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 Koordinierung“ am lokalen Umwelt-HotSpot, d. h. einem Verkehrsablauf (nahezu) ohne Halte in der untersuchten Zufahrt.

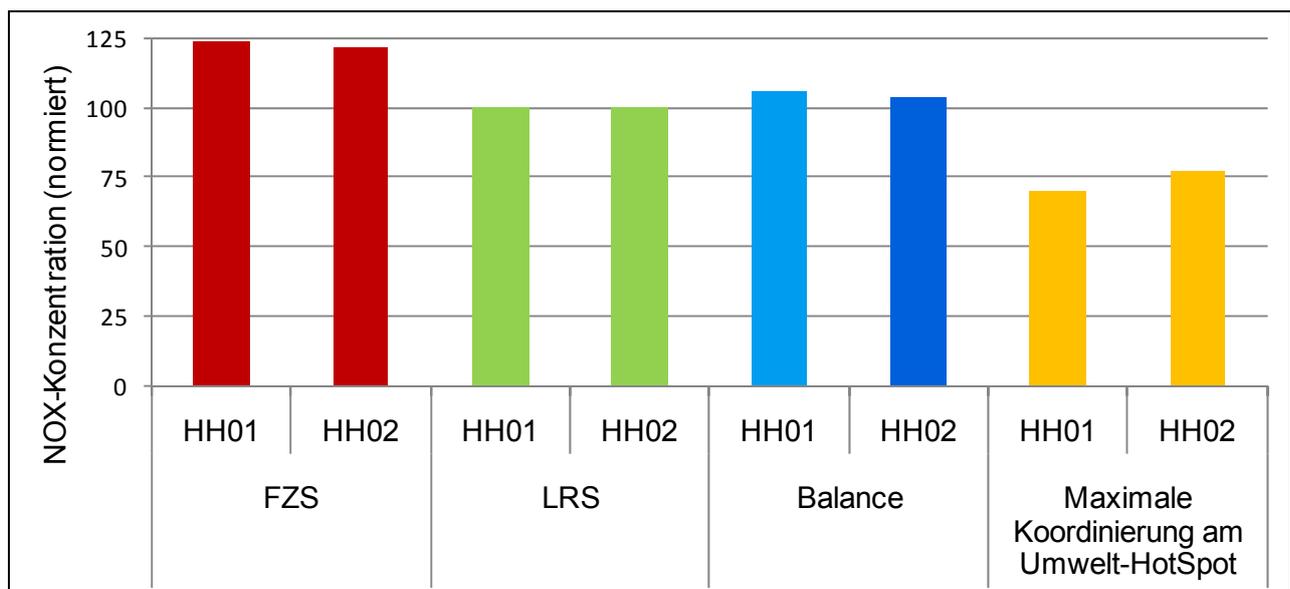


Abbildung 13: Wirkungen der LSA-Steuerungsverfahren am Messquerschnitt Hamburg Habichtstraße, basierend auf Messungen vom 2.6. bis 6.6.2008 (Messwoche HH01) und vom 6.6. bis 10.6.2008 (Messwoche HH02) und normiert auf die lokal regelbasierte Steuerung (LRS=100).

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. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass eine LSA-Steuerung mit Fokus auf die Optimierung von Umweltkenngrößen gerade in diesen Zeiträumen zur Einhaltung von Luftqualitätsgrenzwerten und zur Minderung negativer gesundheitlicher Wirkungen beitragen kann.

Simulation

Das netzbezogene Wirkungspotenzial der adaptiven Netzsteuerung im Testfeld Hamburg wird anhand der VISSIM-Mikrosimulation bewertet. Abbildung 14 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.

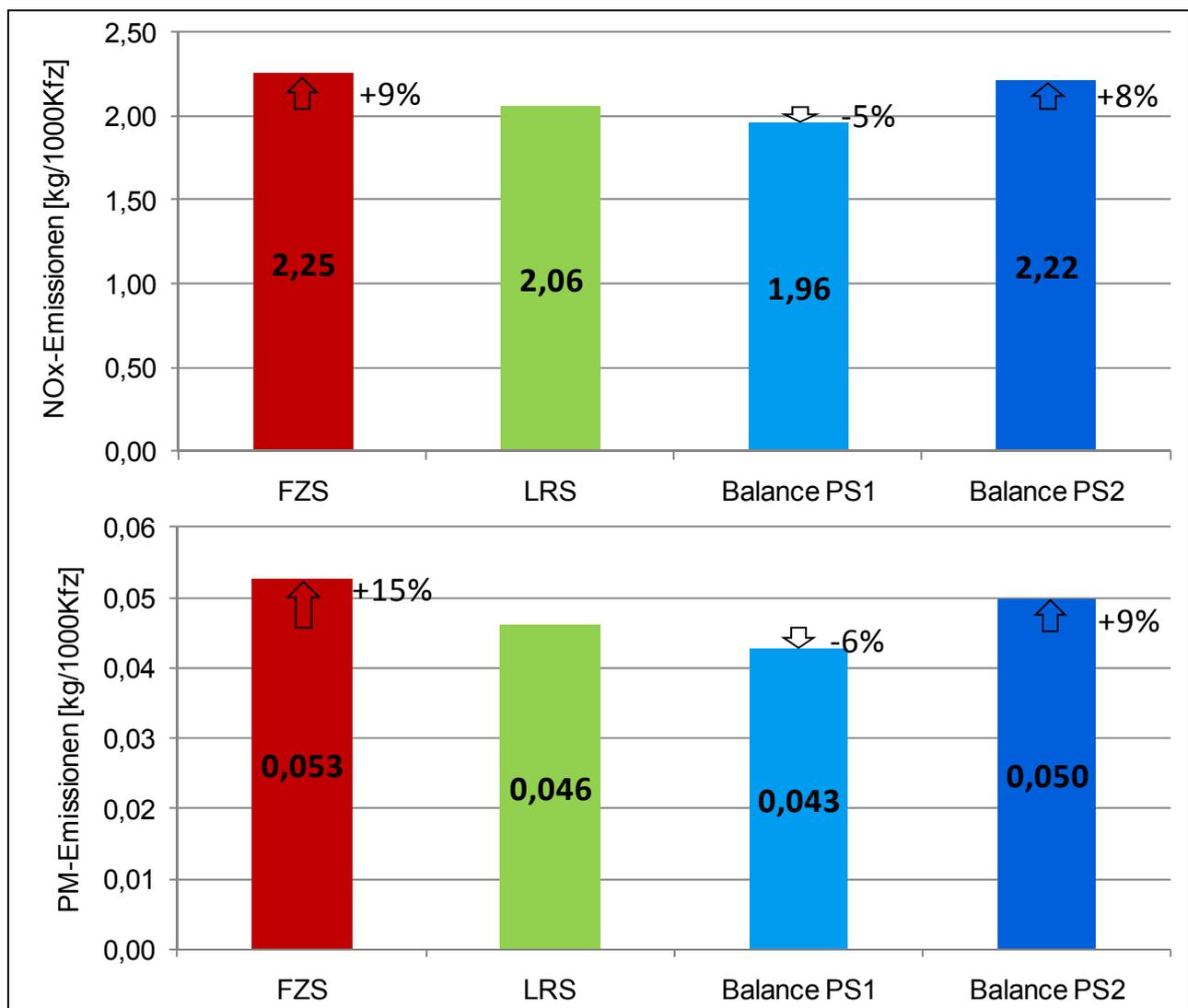


Abbildung 14: Netzbezogene PM- und NO_x-Emissionen der untersuchten LSA-Steuerungsverfahren im Vergleich (LRS=100 %).

Die Netzauswertung zeigt, dass die modellbasierte Steuerung mit dem Parametersatz 1 die Emissionen im Vergleich zur regelbasierten Steuerung unabhängig vom betrachteten Schadstoff reduzieren kann. Darüber hinaus wird aber auch hier die Relevanz der Parametrierung deutlich – die auf Grundlage der mit dem zweiten Parametersatz ermittelten Emissionen liegen in einer Größenordnung mit der Festzeitsteuerung.

2.4.3 Virtuelles Testfeld

2.4.3.1 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 auch Steuerungsgebiete in der Wirklichkeit (besonders in Deutschland) nicht existent, so dass folgende Szenarien 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 (Abbildung 15)

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

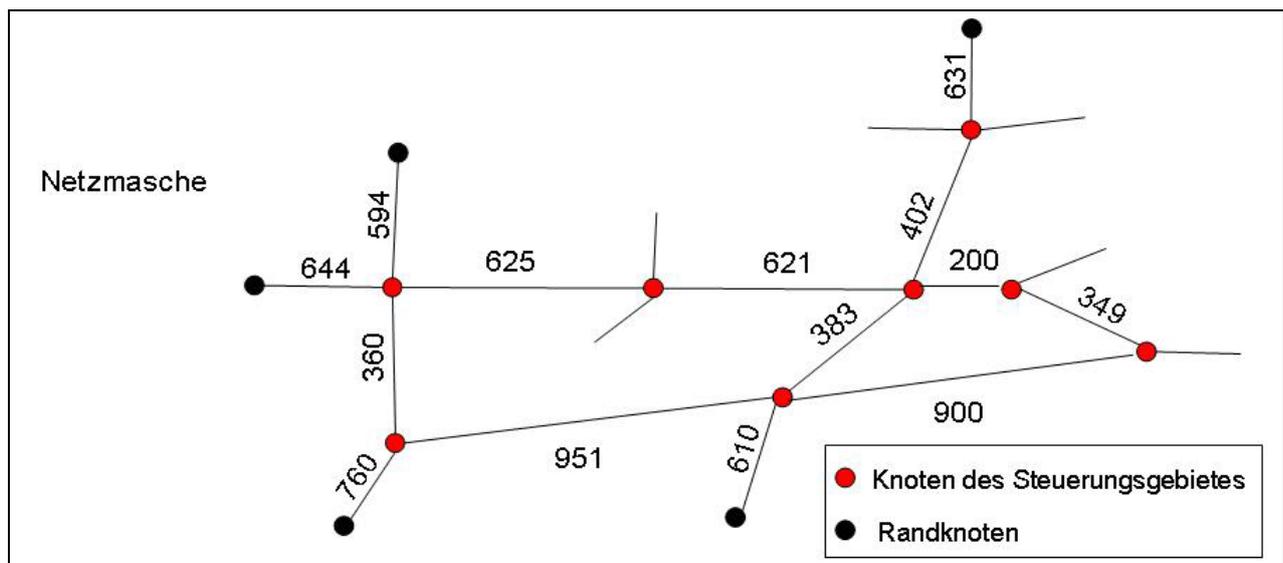


Abbildung 15: Netzmasche des Virtuellen Testfeldes mit Angabe der Streckenlängen in Metern.

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 Schaffung der Schnittstellen zur Anbindung der modellbasierten Steuerungsverfahren an VISSIM durch die Hersteller kam es zu nicht vorhersehbaren Problemen und zeitlichen

Verzögerungen. Außerdem zeigte es sich im Laufe des Projektes, dass die Versorgung der Systeme sowie die Kalibrierung der Simulationen deutlich aufwändiger waren, als vor Projektbeginn absehbar. Aus diesem Grund konnten im virtuellen Testfeld nicht alle der ursprünglich geplanten Simulationsszenarien umgesetzt werden.

Erste Ergebnisse liegen für die Netzmasche (Netzvariante 3) und die Steuerungsszenarien FZ, 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 (FZ)

Für die Festzeitsteuerungen werde 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 Koordination erfolgt für 4 Linienzüge jeweils auf das Freigabezeitende (Abbildung 16).

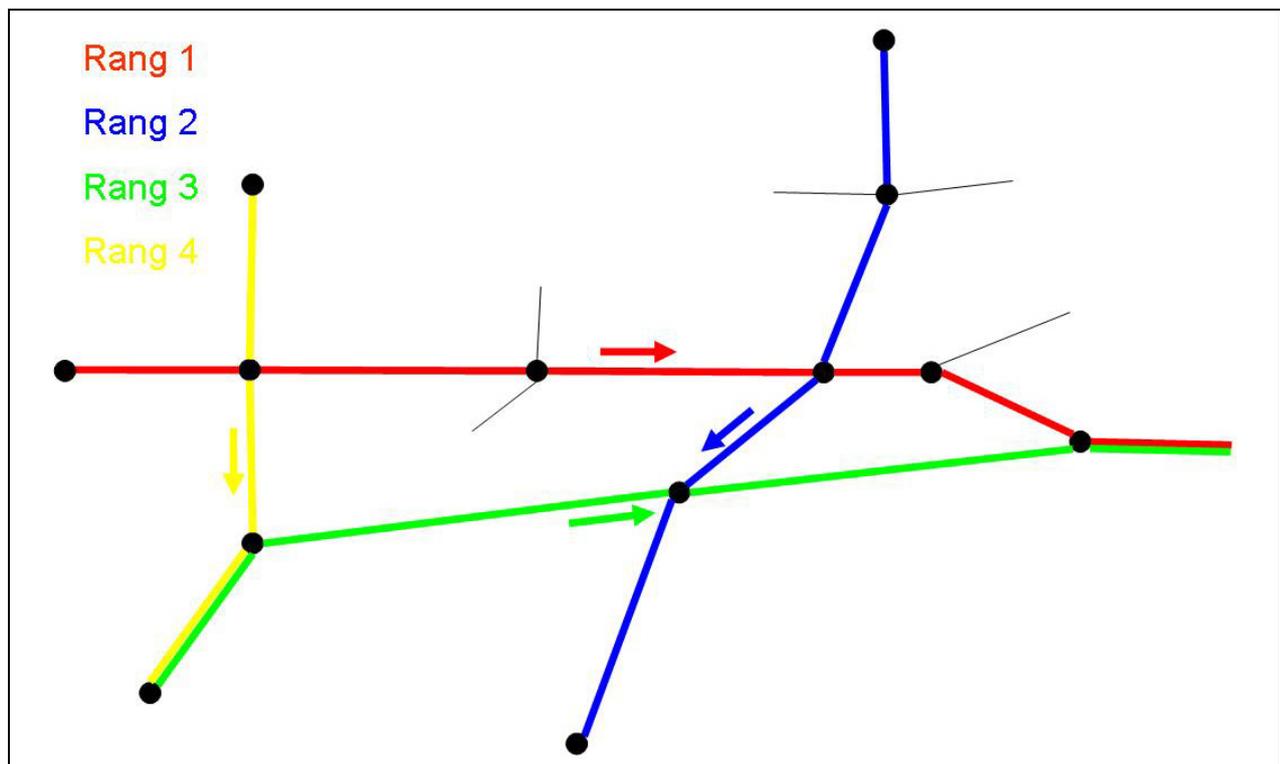


Abbildung 16: Beispiel für die Hierarchie der Linienzüge für die Grundnachfrage im Signalprogramm der Morgenspitze.

Lokal regelbasierte Steuerung (LRS)

Die koordinierten Festzeitprogramme bilden gleichzeitig die Rahmenpläne für die LRS. Die Umsetzung erfolgt regelbasiert. Als Eingriffsmöglichkeit der lokalen Steuerung ist eine Freigabezeitzeitanpassung mittels einer Zeitlückensteuerung für jede Phase vorgesehen. 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. 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 Dauerrahmen.

Netzsteuerung BALANCE

BALANCE erhält von den lokalen TRENDS-Steuerungen der einzelnen Knotenpunkte minütlich die aggregierten Messwerte der Detektoren übermittelt. Alle 5 Minuten optimiert BALANCE auf Basis dieser Messwerte die Rahmensignalpläne für die einzelnen Knoten im Hinblick auf die eingestellte Zielfunktion. Das Optimierungsergebnis verschickt BALANCE in Form von so genannten 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 5s kleiner und 10s 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 während des Tages 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 (siehe Abbildung 17). 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 Prozent. 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 Uhr bis 20 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.

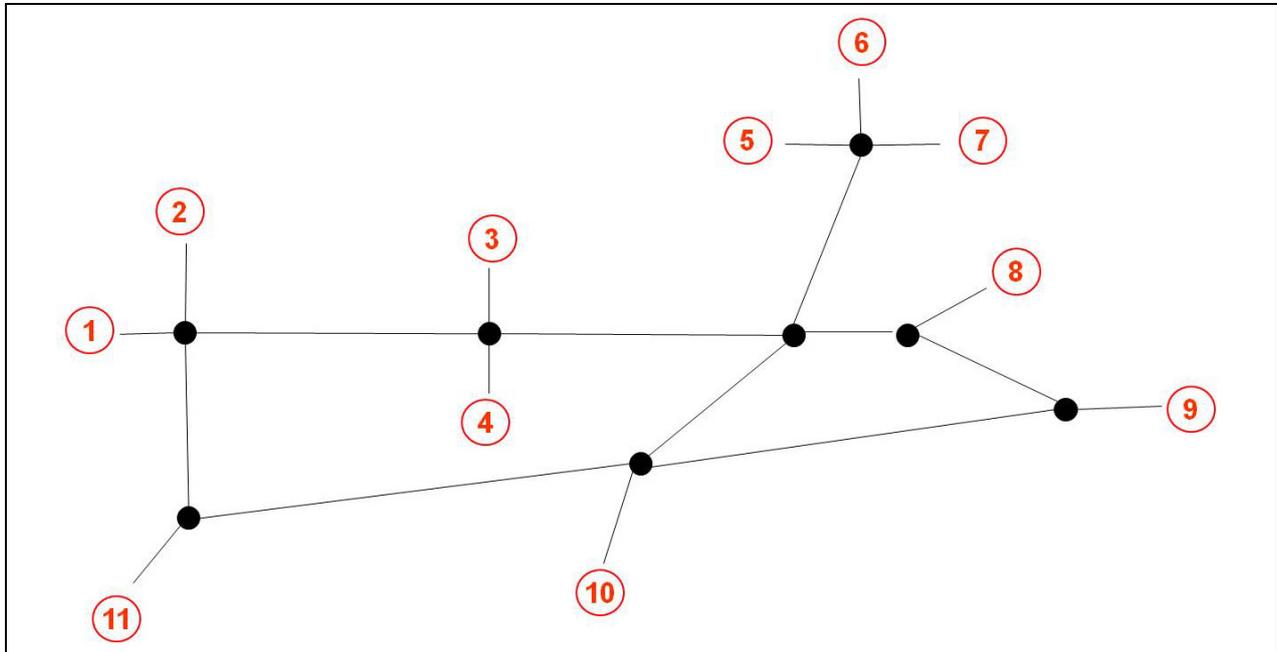


Abbildung 17: Übersicht über die Zufahrten des Gesamtnetzes.

2.4.3.2 Simulationsergebnisse

Verlustzeiten im ÖPNV

Bei LRS und BALANCE liegen die Verlustzeiten im Szenario ohne ÖPNV-Beschleunigung im Mittel etwa um den Faktor 1,75 höher als mit (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.

Steuerungsszenario	Mittlere Verlustzeit pro Bus [s]		
	Fahrrichtung Nord nach Süd	Fahrrichtung Süd nach Nord	Mittel über beide Fahrrichtungen
FZ	86	66	75
LRS mit ÖPNV-Beschleunigung	52	38	44
LRS ohne ÖPNV Beschleunigung	94	64	77
BALANCE mit ÖPNV-Beschleunigung	55	40	46
BALANCE ohne ÖPNV Beschleunigung	98	70	82

Tabelle 9: Mittlere Verlustzeiten des ÖPNV.

Verlustzeiten im MIV

Abbildung 18 zeigt das Verhältnis der Verlustzeiten zwischen den verschiedenen Steuerungsszenarien im Tagesverlauf, dargestellt als mittlere Verlustzeit normiert auf das Steuerungsszenario LRS mit ÖPNV-Beschleunigung.

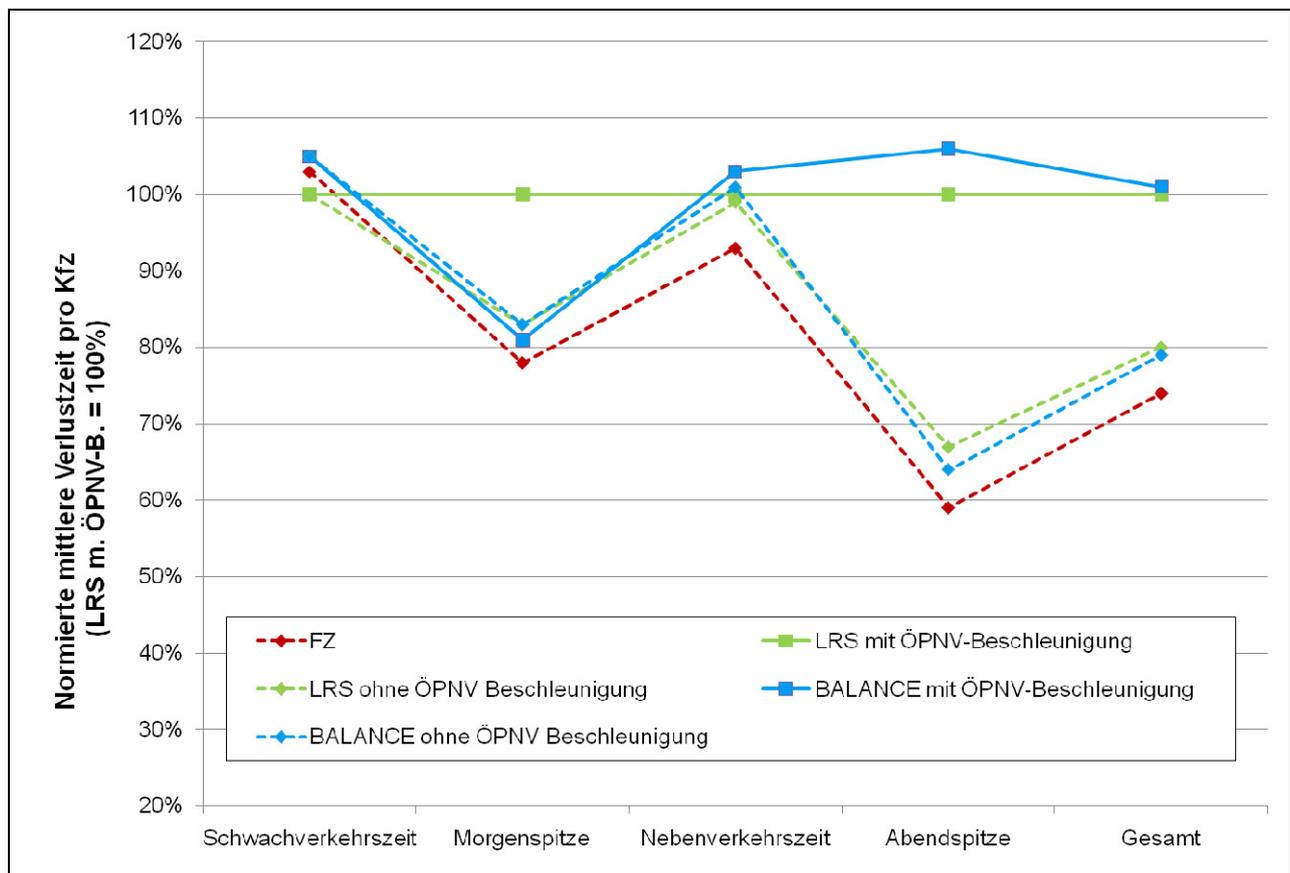


Abbildung 18: Vergleich der mittleren Verlustzeiten im Tagesverlauf.

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

In der *Schwach-* und in der *Nebenverkehrszeit* zeigen sich zwischen den verschiedenen verkehrsabhängigen 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 Steuerungsszenarien zu beobachten (Tabelle 10). Bei der dort geschalteten Umlaufzeit von 90s (40 Umläufe pro Stunde) greift im Mittel in jedem dritten Umlauf die ÖPNV-Beschleunigung. Bei der LRS führt dies zu einem Anstieg der Verlustzeiten um etwa 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 geringfügige Verbesserung ist statistisch nicht signifikant). Da auch die LRS auf der gut geplanten FZ aufsetzt, besteht in der Variante ohne ÖPNV-Beschleunigung offensichtlich wenig Optimierungspotential für eine Netzsteuerung.

Steuerungsszenario	Normierte mittlere Verlustzeit pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)	Normierte mittlere AnzahlHalte pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)
FZ	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

Tabelle 10: Mittlere Verlustzeiten und mittlere Anzahl Halte in der Morgenspitze.

In der *Abendspitze* treten verglichen mit den anderen Tagesabschnitten die größten Verlustzeiten auf. Auch die Ergebnisse der verschiedenen Steuerungsszenarien 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.

Steuerungsszenario	Normierte mittlere Verlustzeit pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)	Normierte mittlere AnzahlHalte pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)
FZ	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 Halte in der Abendspitze.

Mit Ausnahme der FZ treten in der Abendspitze in allen Steuerungsszenarien 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.

Bei genauerer Analyse zeigt sich, dass es bei den Szenarien mit ÖPNV-Beschleunigung in einigen Simulationsläufen zu größeren Rückstaus an dem nördlich der Zufahrt 10 gelegenen

Knoten kommt. Diese führen dann zu einem starken Anstieg der Verlustzeiten, die im Extremfall doppelt so hoch werden können wie die mittlere Verlustzeit. Hier besteht Nachbesserungsbedarf an der lokalen Steuerung.

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 Algorithmus) durchgeführt werden konnten. Die Erfahrungen aus dem Testfeld Hamburg legen nahe, dass hier noch Potential besteht.

2.5 Evaluierung modellbasierter Steuerungsverfahren

Im Vergleich der netzweiten modellbasierten Steuerungsverfahren (NMS) mit der lokal regelbasierten Steuerung (LRS) und der Festzeitsteuerung (FZS) zeigen sich weder in den Felduntersuchungen und Simulationsstudien für die Testfelder in Hamburg und in Bremerhaven noch in den Simulationsstudien im virtuellen Testfeld eindeutige Ergebnisse hinsichtlich der Bewertungskriterien Verlustzeiten und Anzahl der Halte.

In der Tendenz ergeben sich in den realen Testfeldern gegenüber dem Referenzverfahren LRS kleine Vorteile für die NMS, die jedoch über den Tagesverlauf nicht durchgängig nachgewiesen werden konnten. Darüber hinaus wird mit der FZS in Bremerhaven eine vergleichbare Verkehrsqualität erreicht wie mit den beiden verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren. Ein deutlicher systematischer Abstand bezüglich der Verkehrsqualität besteht lediglich für die FZS im Testfeld Hamburg. Die FZS führt dort aufgrund der zyklischen Freigabe eines Linksabbiegers am zentralen Knotenpunkt, der bei den verkehrsabhängigen Steuerungen nur bei Bedarf bedient wird, zu deutlich längeren Fahrzeiten und einer höheren Anzahl von Halten.

Die detaillierte Auswertung der in der Felduntersuchung und in der Simulation für die realen Testfelder ermittelten Daten zeigt, dass es mit den NMS zeitweise gelingt, deutliche Verbesserungen zu erzielen, diese Verbesserungen aber im Tagesverlauf auch Zeitbereichen gegenüber stehen, in denen die Verkehrsqualität auf ein schlechteres Niveau als bei der LRS zurück fällt. Dies weist darauf hin, dass offensichtlich Verbesserungspotenziale von bis zu 20 % Reduzierung der Verlustzeiten mit Hilfe von modellbasierten Steuerungsverfahren erzielt werden können, die Verfahren jedoch noch nicht ausgereift genug sind, dieses Potenzial durchgängig zu nutzen.

Im virtuellen Testfeld sind drei Steuerungsverfahren ohne ÖPNV-Bevorrechtigung und zwei Verfahren mit ÖPNV-Bevorrechtigung für identische Nachfragesituationen untersucht worden. Der Vergleich anhand der mittleren Verlustzeit der Busse zeigt sehr deutlich das große Beschleunigungspotenzial der ÖPNV-Bevorrechtigung, mit der die Verlustzeiten der Busse um etwa 40 % reduziert werden können.

Die Verbesserung der Fahrzeiten der ÖPNV-Busse durch die Bevorrechtigung steht jedoch insbesondere bei höherer Auslastung in einem offensichtlichen Zielkonflikt zu der Verkehrsqualität des übrigen Kfz-Verkehrs. So steigen die Verlustzeiten des Kfz-Verkehrs in der stark belasteten Abendspitze bei der LRS mit ÖPNV-Bevorrechtigung um 67 % gegenüber der FZS an. In der Gegenüberstellung aller Steuerungsverfahren mit bzw. ohne ÖPNV-Bevorrechtigung zeigt sich diese Wechselwirkung für die Abendspitze in ähnlicher Größenordnung.

Lediglich in der Morgenspitze wird diese Systematik einmal von BALANCE mit ÖPNV-Bevorrechtigung durchbrochen. In diesem Steuerungsszenario erzielt BALANCE für den Kfz-Verkehr vergleichbar gute Ergebnisse wie die Steuerungsverfahren ohne ÖPNV-Bevorrechtigung. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass bei einer gelungenen Integration der ÖPNV-Bevorrechtigung in die Netzsteuerung die negativen Auswirkungen auf den Kfz-Verkehr weitgehend vermieden werden können. BALANCE mit ÖPNV-Bevorrechtigung kann diese Verbesserung jedoch nicht systematisch nachweisen und schneidet in der Abendspitze mit dem ungünstigsten Ergebnis ab. Ein grundsätzliches Potenzial zum Ausgleich von Störungen lässt sich jedoch aus den Ergebnissen für modellbasierte Verfahren vermuten.

Die Steuerungsverfahren ohne ÖPNV-Bevorrechtigung erzielen im virtuellen Testfeld hinsichtlich der Verlustzeiten von ÖPNV-Bussen und übrigen Kfz in allen Nachfrageszenarien eine vergleichbare Verkehrsqualität. Im Gegensatz zur allgemeinen Erwartung schneidet die FZS nicht schlechter sondern überwiegend besser als die beiden verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren ohne ÖPNV-Bevorrechtigung ab. Dies ist sicherlich der vorab getroffenen Anpassung der Freigabezeiten entsprechend der bekannten Verkehrsnachfrage geschuldet, zeigt jedoch, dass bei der LRS mit derselben Voranpassung der Rahmensignalprogramme an die Verkehrsnachfrage eine darüber hinaus gehende Anpassung an kurzfristige Schwankungen eher kontraproduktiv wirkt.

Die Synthese der Auswertungen zeigt, dass mit einer guten Anpassung der Freigabezeiten an die Verkehrsnachfrage auch für längere Zeiträume bereits ein gutes Ergebnis erzielt wird, dass eine weitergehende Nachfrageanpassung durch die NMS, aufgrund der schwierigen Verkehrslagemodellierung, bislang zu keinen durchgängigen Verbesserungen führt und kurzfristige Freigabezeitanpassungen an stochastische Schwankungen durch die LRS eher kontraproduktiv wirken, wenn ihnen ein zu großer Spielraum eingeräumt wird. Für bestimmte Situationen, in denen eine Reaktion auf die Anforderung einzelner Fahrzeuge oder Verkehrsteilnehmer erforderlich ist, kann die LRS jedoch wesentliche Vorteile bieten. In gleicher Weise ist die LRS für die ÖPNV-Bevorrechtigung ohne Alternative.

Die ÖPNV-Bevorrechtigung führt zu eindeutig geringeren Verlustzeiten für ÖPNV-Fahrzeuge, ist aber in der Regel mit einer signifikanten Verschlechterung für den übrigen Kfz-Verkehr verbunden. Offensichtlich besteht im Grundsatz die Möglichkeit, mit modellbasierten Steuerungsverfahren die ÖPNV-Bevorrechtigung ohne wesentlichen Nachteil für den übrigen Kfz-Verkehr zu integrieren und Störungen auszugleichen. Da dies in den Untersuchungen jedoch nicht systematisch gelungen ist, wird hier noch ein Entwicklungspotenzial für die modellbasierten Verfahren gesehen.

2.6 Fazit und Handlungsempfehlungen

Monitoring der Wirkung

Die Erfassung von Kenngrößen für eine umfassende Bewertung erfordert die Fusion verschiedener Datenquellen.

Zur Erfassung der verkehrlichen Wirkungen (Fahrzeit, Anzahl Halte) haben sich die Kombination von Messfahrten mit GPS-Geräten (wenige Fahrzeuge werden exakt erfasst) und einer Kennzeichenerfassung mit ANPR-Systemen (für viele Fahrzeuge wird die Fahrzeit exakt erfasst) bewährt. Messfahrten allein genügen nur für kleinere Untersuchungen um eine ausreichende statistische Sicherheit zu erhalten. Hierfür sind je nach Erhebungsgebiet zwischen 20 und 80 Messfahrten pro Relation, Szenario und Tageszeitblock erforderlich. Zusätzlich sind lokale Verkehrsstärken notwendig, um die gemessenen Wirkungen zu quantifizieren. Die mikroskopische Simulation erweist sich als leistungsfähige Ergänzung der Feldversuche, ist aber sehr aufwändig.

Zur Erhebung kollektiver Fahrzeiten sind weniger aufwändige Methoden zu entwickeln.

Die im Rahmen von AMONES verwendeten Erhebungsmethoden haben einen sehr hohen Planungs- und Personalaufwand und erfordern den Einsatz teurer Geräte. Dies betrifft insbesondere die Messung der Fahrzeiten mit ANPR-Systemen. Im Bereich der Fahrzeitmessung werden derzeit andere Verfahren (Induktionsschleifensignaturen, Bluetooth) entwickelt, die vielversprechende Verbesserungen in diesen Bereichen erwarten lassen.

Für die Qualitätssicherung ist ein regelmäßiges Monitoring notwendig.

Für die Qualitätssicherung von Lichtsignalanlagen ist ein Qualitätsmanagement erforderlich, dass zum einen die Detektorinfrastruktur und zum anderen die verkehrlichen Wirkungen regelmäßig überprüft. Die Qualität einer verkehrsabhängigen Steuerung wird unmittelbar von der Qualität der gemessenen Eingangsdaten beeinflusst. Die verkehrlichen Wirkungen sind komplex und die Randbedingungen einer Lichtsignalanlage können sich im Laufe der Zeit ändern. Deswegen ist es notwendig regelmäßig Detektoren und Wirkungen zu prüfen. Dies gilt insbesondere bei Eingriffen in die Steuerung in Form von Vorher-/Nachher-Untersuchungen.

Verkehrliche Wirkungen

Die Anpassung des Signalprogrammrahmens an die aktuelle Verkehrsnachfrage ist wesentlich.

Die Ergebnisse aus den Felduntersuchungen und Simulationen, insbesondere diejenigen, die im virtuellen Testfeld ermittelt werden konnten, zeigen, dass eine Anpassung des Signalprogrammrahmens an die aktuelle Verkehrsnachfrage gerade bei höherer Auslastung am besten geeignet ist, die vorhandene Kapazität zu nutzen. In diesem Sinne hat die FZS mit einer tageszeitlich guten Anpassung an die Verkehrsnachfrage überraschend gute Ergebnisse erzielt. Vor diesem Hintergrund ist zu empfehlen, dass bei Neuprojektierungen oder Überarbeitungen von Lichtsignalsteuerungen die Erfassung der Nachfragestrukturen und die Erarbeitung von gut angepassten Festzeitsteuerungen bzw. Rahmensignalplänen im Vordergrund stehen sollten.

Modellbasierte Steuerungsverfahren haben das größte Potenzial, benötigen aber eine aufwändige Kalibrierung.

Modellbasierte Steuerungsverfahren (NMS) haben das größte Potenzial, die vorhandene Kapazität bestmöglich zu nutzen, da sie den Rahmensignalplan im Grundsatz am feinsten an die variable Verkehrsnachfrage anpassen können. Für einige Zeitbereiche konnte dies sowohl in den Felduntersuchungen wie auch in den Simulationen eindrucksvoll nachgewiesen werden. Aufgrund der Schwierigkeit der Kurzfristprognosen der Verkehrsnachfrage sowie der präzisen Verkehrslagemodellierung gelingt diese Anpassung jedoch offensichtlich noch nicht durchgängig. Für den Einsatz von NMS bedeutet dies, dass eine aufwändige Kalibrierung und Validierung der Steuerung für gute Ergebnisse von großer Bedeutung ist. Für die Weiterentwicklung der modellbasierten Steuerungsverfahren wird empfohlen, das Augenmerk insbesondere auf die Verkehrslagemodellierung und die Kurzfristprognose unter dem Gesichtspunkt der Robustheit zu richten.

Lokale regelbasierte Steuerungsverfahren wirken bei der Anpassung an die Verkehrsnachfrage eher kontraproduktiv, können jedoch auf spezielle Anforderungen am besten reagieren.

Einerseits haben die Untersuchungen gezeigt, dass bei der LRS mit einer genauen Voranpassung der Rahmensignalprogramme an die Verkehrsnachfrage eine darüber hinaus gehende Anpassung an kurzfristige Schwankungen kontraproduktiv wirkt. Andererseits kann die LRS jedoch wesentliche Vorteile für bestimmte Situationen bieten, in denen eine Reaktion auf die Anforderung einzelner Fahrzeuge oder Verkehrsteilnehmer erforderlich ist. In gleicher Weise ist die LRS für die ÖPNV-Bevorrechtigung ohne Alternative. Die LRS sollte aus diesem Grund nicht für die Nachfrageanpassung sondern ausschließlich die Behandlung von besonderen einzelnen Anforderungen wie z. B. die Bedarfsphasenanforderung für Linksabbieger im Testfeld Hamburg eingesetzt werden. Durch eine solche Reduktion können die Signalprogramme auch einfacher und im Sinne des Qualitätsmanagements transparenter gestaltet werden.

ÖPNV-Bevorrechtigung ist mit modellbasierten Verfahren in Verbindung mit lokaler regelbasierter Steuerung realisierbar.

Für die ÖPNV-Bevorrechtigung ist die LRS ohne Alternative. Sie kann in Verbindung mit der NMS und FZS verwendet werden. Der Zielkonflikt zwischen der Beschleunigungswirkung für die ÖPNV-Fahrzeuge und der Verkehrsqualität für den übrigen Kfz-Verkehr ist dabei zu beachten. Die weitere Entwicklung der NMS sollte darauf gerichtet sein, deren in den Untersuchungen deutlich gewordenen Potenziale zum Ausgleich des Zielkonflikts zu verstetigen.

Ein einfacher Einstieg in die Nachfrageanpassung und geeignete Strategien für die Migration zu modellbasierten Steuerungsverfahren erscheinen sinnvoll.

Aus verkehrlicher Sicht ist die Anpassung der Rahmensignalprogramme an die variable Verkehrsnachfrage zielführend und sollte von den Betreibern der Lichtsignalanlagen angestrebt werden. Hierfür erscheinen Strategien, die eine Migration vom Bestandssystem über offline auch hinsichtlich der Netzkoordinierung optimierte Festzeitsteuerungen vorsehen, sehr geeignet. Die Auswahl der Programme kann im einfachsten Fall tageszeitabhängig oder mit zunehmendem Anspruch regelbasiert bzw. modellbasiert erfolgen. Über eine solche Migrationsstrategie werden Hemmnisse, die mit der Anschaffung neuer Systemtechnik verbunden sind, sowie auch Risiken, die aus der Einführung neuer anspruchsvoller Steuerungsverfahren resultieren, minimiert.

Umweltwirkungen**Eine Reduzierung der straßenseitigen Luftschadstoffimmissionen infolge einer angepassten LSA-Steuerung ist nachweisbar.**

Die Wirkungen einer reduzierten Verkehrsstärke, z. B. aufgrund einer Zuflussdosierung, und einer reduzierten Anzahl Halte in einer Knotenpunktzufahrt, z. B. aufgrund einer verbesserten Koordinierung, sind in straßenseitig gemessenen NO_x - und PM_x -Immissionen nachweisbar. Mit kurzzeitigen Eingriffen, z. B. gezielte Grünzeitverlängerungen, können kurzzeitige lokale Reduktionen der NO_x -Konzentration in einer Größenordnung von über 10 % realisiert werden; mit einer dauerhaft verbesserten Koordinierung erscheinen sogar deutlich höhere Reduktionspotenziale realisierbar. Für die PM_{10} - und $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration erzielen kurzzeitige Maßnahmen eine vernachlässigbare Reduktion von unter 5 %. Aufgrund der chemisch-physikalischen Eigenschaften von Partikeln erscheinen mittel- und langfristige Maßnahmen geeigneter. Je nach lokalem Verursacheranteil des Verkehrs sind mittels Zuflussdosierung oder Beschränkungen für den Schwerverkehr Reduktionspotenziale in einer Größenordnung von 5-10 % der Gesamtbelastung realisierbar.

Eine modellbasierte Netzsteuerung kann im Vergleich zu regelbasierten Verfahren bei der Reduzierung verkehrsbedingter Umweltwirkungen von Vorteil sein.

Bei entsprechender Parametrierung kann eine modellbasierte Netzsteuerung die Emissionen des Straßenverkehrs im gesamten Netz signifikant reduzieren. In Bezug auf die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte an Umwelt-HotSpots können modellbasierte Verfahren erweitert werden, um zeitlich und räumlich differenziert zur Reduzierung der Immissionen beizutragen. Dies kann

z. B. durch eine Veränderung der Zielfunktion der modellbasierten Steuerung für bestimmte Netzabschnitte in Abhängigkeit der relevanten meteorologischen Parameter und der Hintergrundbelastung der jeweiligen Schadstoffe geschehen.

Die immissionsbezogenen Wirkungen verkehrlicher Maßnahmen hängen ebenso wie die Immissionen selbst, stark von meteorologischen Randbedingungen ab.

In beiden Testfeldern wurde ein erheblicher Einfluss meteorologischer Kenngrößen und insbesondere der lokal gemessenen Windgeschwindigkeit auf die untersuchten Immissionskenngrößen festgestellt. Bei bestimmten meteorologischen Situationen, z. B. bei hohen Windgeschwindigkeiten und damit einhergehender guter Durchlüftung, ist der Einfluss des Verkehrs ebenso wie das Minderungspotenzial etwaiger Maßnahmen auf die Immissionsbelastung messtechnisch nur schwach erkennbar.

Wissenslücken bei der Erhebung umweltrelevanter Verkehrskenngrößen sind zu schließen.

Dies betrifft zum einen weitere Forschung hinsichtlich der Einflussgrößen auf die nicht-motorbedingte Partikelbelastung, die sich in ihren Eigenschaften deutlich von den weiteren untersuchten Immissionskenngrößen unterscheidet. Zum anderen betrifft dies Untersuchungen hinsichtlich der Eignung gängiger Kenngrößen zur Qualität des Verkehrsablaufs als Eingangsgrößen für die Immissionsmodellierung (z. B. die Eignung der Kenngröße „Anzahl Halte“ gegenüber der Kenngröße „Rückstaulänge“).

Zusammenhänge zwischen Verkehrskenngrößen und alternativen Messgrößen der Partikelkonzentration sind zu untersuchen.

Die Messgröße „Partikelanzahlkonzentration“ ist besser geeignet als die Messgröße „Partikelmassenkonzentration“, um die gesundheitlichen Wirkungen des Straßenverkehrs und entsprechender Minderungsmaßnahmen zu bewerten. Es ist zudem absehbar, dass diese Messgröße stärker mit den motorbedingten Partikelemissionen des Straßenverkehrs korreliert. Detaillierte Untersuchungen zu den Zusammenhängen zwischen Verkehrskenngrößen und Partikelanzahlkonzentration erscheinen daher sinnvoll.

Geeignete Detektionsverfahren zur Erhebung der umweltrelevanten Verkehrskenngrößen sind zu entwickeln.

Insbesondere im Bereich von Umwelt-HotSpots ist eine möglichst genaue Abschätzung der Umweltwirkungen verkehrlicher Maßnahmen empfehlenswert. Eine Detektion der Kenngröße „Verkehrsstärke“ ist hierfür nicht ausreichend. Bestehende Detektionsverfahren, z. B. die videobasierte Erfassung, sind ggfs. weiterzuentwickeln, um den Verkehrsablauf und die Verkehrszusammensetzung im Bereich von Umweltmessstellen in hoher Qualität zu erfassen. Diese hochwertige Datengrundlage kann zur Erhöhung der Aussagekraft gängiger Emissions- und Immissionsmodellierungen eingesetzt werden.

Modellbasierte Steuerungsverfahren sollten dynamisch auf bestimmte Umweltsituationen reagieren können.

Die Wirkungen einer Lichtsignalsteuerung in Form einer Zuflussdosierung und/oder einer verbesserten Koordinierung sollten in Abhängigkeit des Grenzwertüberschreitungsrisikos und der Betroffenheit bestimmter Gebiete gezielt und zeitlich sowie räumlich differenziert eingesetzt werden, um die Umweltbelastung des Straßenverkehrs zu mindern. Eine situationsabhängige Gewichtung der Zielgrößen der modellbasierten Steuerung kann dies grundsätzlich ermöglichen.

Handhabbarkeit**Die Evaluierung von LSA-Steuerungen mittels mikroskopischer Simulation ist aufwändig aber sehr empfehlenswert.**

Die Kalibrierung eines Mikrosimulationsszenarios mit mehreren Knoten und komplexer LSA-Steuerung ist aufwändig und schwierig. Sie setzt zudem eine umfangreiche und geeignete empirische Datengrundlage voraus. Nach erfolgreicher Kalibrierung können jedoch mit der Mikrosimulation unterschiedliche Steuerungsszenarios verglichen und statistische signifikante Unterschiede zwischen diesen nachgewiesen werden. Ein Vergleich unterschiedlicher Steuerungsszenarios im realen Straßenraum ist dagegen oftmals nur sehr eingeschränkt möglich. Während bei einer empirischen Messung aus Aufwandsgründen in der Regel nur die Fahrzeuge auf wenigen Relationen betrachtet werden können, ermöglicht es die Simulation zudem, die Wirkungen der Steuerung auf alle Fahrzeuge im Untersuchungsnetz zu betrachten.

Die Parametrierung (Versorgung) der modellbasierten Verfahren ist sehr aufwendig und schwer zu durchschauen. Dies wird von potentiellen Anwendern als eindeutige Barriere für eine mögliche Nutzung gesehen.

Die Parametrierungsmöglichkeiten der modellbasierten Steuerungsverfahren sind sehr komplex. Dadurch ergibt sich prinzipiell die Möglichkeit, über eine Vielzahl von Stellschrauben das System optimal an die eigenen Bedürfnisse anzupassen. Auf der anderen Seite besteht aber auch der Zwang, die Parameter zunächst mit sinnvollen Werten zu versehen. Zudem sind die Auswirkungen von Änderungen an den einzelnen Parametern in den aktuellen Systemen oft nur schwierig bzw. nicht vollständig vorhersehbar. Somit sind auch erfahrene Anwender bei der Parametrierung auf die Hilfe der Hersteller und auf ein „Ausprobieren“ zur Ermittlung der optimalen Einstellungen angewiesen. Hier sind die Hersteller gefragt, die Akzeptanz und die Nutzbarkeit der Verfahren durch Verbesserungen bei der Transparenz bzgl. der Wirkungen von Parametereinstellungen und durch eine bessere Dokumentation zu erhöhen.

Einsatzbereich und Implementierungsstrategien

Bei der Einführung eines neuen LSA-Steuerungsverfahrens sind eine strukturierte Vorgehensweise und die Durchführung begleitender Untersuchungen zur Wirkungsermittlung empfehlenswert.

Um die Wirkungen einer Steuerung im Vorfeld abschätzen und im Anschluss nachweisen zu können, wird ein strukturiertes Vorgehen mit Simulationsstudie und empirischer Vorher-Nachher-Untersuchung empfohlen. Nachfolgende Auflistung stellt eine aus fachlicher Sicht sinnvolle Vorgehensweise dar:

- Analyse der Ist-Situation:
 - Randbedingungen klären (vorhandene Infrastruktur, Verkehrsmanagement, ÖPNV)
 - Charakterisierung der Nachfrage- und Netzstruktur
 - ggfs. Segmentierung/Strukturierung des Netzes
 - Vorher-Messung
- Wahl des geeigneten Steuerungsverfahrens (evtl. verschiedene je nach Strukturierung, evtl. Stufenlösungen vorsehen)
- Wirkungsabschätzung und Vorparametrierung (Simulation)
- Installation, Inbetriebnahme mit intensiver Begleitung
- Nachher-Messung
- Regelmäßige Qualitätsüberwachung

Empfehlungen zur Auswahl geeigneter Steuerungsverfahren.

Basierend auf den Ergebnissen aus den drei Testfeldern, Erkenntnissen aus der Literatur und Erfahrungen von Herstellern und Anwendern lassen sich zu den in Kapitel 6 aufgeführten Typisierungskriterien folgende Empfehlungen zur Auswahl eines LSA-Steuerungsverfahrens ableiten:

Steuerungsverfahren	FZS	LRS	LMS	NRS	NMSA	NMS
Nachfragestruktur						
• Tageszeitabhängige Variabilität	+	+	+	+	/	/
• Räumliche Variabilität	-	o	o	+	+	+
• Situationsabhängige Variabilität (z. B. bei Veranstaltungen)	-	-	o	o	o	+
• Regelmäßige Überstauung mehrerer Zufahrten eines Knotenpunktes	o	o	+	o	o	+
Netzstruktur						
• Keine Alternativrouten (geringe Vermaschung)	+	+	+	/	/	/
• Vorhandene Alternativrouten (hohe Vermaschung)	-	o	+	+	+	+
• Vorhandene Rückstauräume mit unterschiedlicher Betroffenheit (in Bezug auf die Umweltbelastung) oder unterschiedlichem Grenzwertüberschreitungsrisiko	-	-	-	+	+	+
Ziele der Steuerung						
• Umweltkriterien sollen berücksichtigt werden	-	o	+	o	+	+
• Situationsabhängige Optimierung spezifischer Kenngrößen (Anzahl Halte, Wartezeit, ÖV-Wartezeit)	-	o	+	o	o	+
Gewünschte Funktionalitäten						
• Anpassung der LSA-Steuerung an übergeordnete Strategien einer Verkehrsleitzentrale (z. B. Schaltung strategiekonformer Haupttrouten)	-	o	o	+	+	+
• Situationsabhängige Zuflussdosierung durch Pfortneranlagen (z. B. bei bestimmten umweltbezogenen Randbedingungen)	-	-	-	+	+	+
• Situationsabhängige ÖV-Priorisierung	-	+	+	+	+	+
„+“ geeignet	„o“	bedingt geeignet	„-“	nicht geeignet	„/“	nicht erforderlich

Tabelle 12: Empfehlungen zur Auswahl geeigneter Steuerungsverfahren.

3 Zielsetzung des Vorhabens

3.1 Gesamtziel des Vorhabens

Verkehrsabhängige Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen sind in Deutschland weit verbreitet. Gegenüber einer Festzeitsteuerung sollen sie in erster Linie den Verkehrsfluss in städtischen Netzen verbessern und die Bevorrechtigung von Fahrzeugen des Öffentlichen Nahverkehrs sicherstellen. Der überwiegende Teil der Verfahren bezieht sich auf die Steuerung von einzelnen Knotenpunkten. Verfahren mit netzweit wirkender Verkehrsabhängigkeit werden noch vergleichsweise selten eingesetzt.

Bei den (lokalen) verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren handelt es sich in den meisten Fällen um regelbasierte Verfahren, die ein vorgegebenes Signalprogramm aufgrund aktueller Detektorwerte (z. B. Zeitlücken im IV-Strom oder Anmeldung eines ÖV-Fahrzeugs) modifizieren oder dieses auf der Grundlage einer Logik dynamisch zusammenstellen. Bei hohen Verkehrsstärken führt die kontinuierliche Belegung der Detektoren jedoch dazu, dass die Steuerungslogik im Ergebnis einer Festzeitsteuerung entspricht. Dieses Defizit kann zum Teil dadurch überwunden werden, dass auf Netzebene durch eine regelbasierte Signalprogrammauswahl, die für die verkehrsabhängige Lokalsteuerung jeweils verbindlichen Rahmensignalpläne dynamisch ausgewählt werden. Modellbasierte Netzsteuerungen gehen hier noch einen deutlichen Schritt weiter, da sie die aktuelle Stärke der Verkehrsströme über mehrere Lichtsignalanlagen hinweg, im Idealfall für das gesamte gesteuerte Netz, kennen und prognostizieren und damit eine netzbezogene Optimierung der LSA-Steuerung ermöglichen.

Modellbasierte Netzsteuerungsverfahren wie MOTION und BALANCE haben sich bis jetzt in Deutschland trotz erfolgreicher Pilotinstallationen noch nicht durchsetzen können und kommen derzeit nur in wenigen Teilnetzen zum Einsatz. Die wesentlichen Hemmnisse für eine breite Umsetzung der Verfahren sind zum einen die von den Baulasträgern vermutete Schnittstellenproblematik und damit verbundene hohe Investitionskosten sowie Unsicherheiten bezüglich herstellerunabhängiger Systemerweiterungen, sowie zum anderen unzureichende Kenntnisse über die erzielbaren verkehrlichen und umweltbezogenen Wirkungen adaptiver Netzsteuerungen. Hier setzt das Forschungsvorhaben an. Durch umfassende empirische Untersuchungen in zwei städtischen Testfeldern und ergänzende Simulationsstudien sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Welche verkehrlichen Vorteile erzielen modellbasierte Steuerungsverfahren gegenüber herkömmlichen verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren insbesondere durch eine gute Koordinierung der Lichtsignalanlagen im Netz?
- Welche umweltbezogenen Wirkungen sind mit modellbasierten Steuerungsverfahren erreichbar? Welche Beiträge können zur Reduzierung und besseren räumlichen Verteilung von Luftschadstoffen und damit zur Einhaltung von Immissionsgrenzwerten (z. B. zur Feinstaubbelastung) in städtischen Straßennetzen geleistet werden?
- Welches Maß an Verbesserung ist bereits mit der systemtechnisch einfachen Möglichkeit der regelbasierten Signalprogrammauswahl bei geringen Investitionskosten zu erreichen?

- Welche Kenngrößen muss man in welcher Qualität messen und welche Messstellen und Messzeiträume sind notwendig, um zuverlässige Aussagen über die verkehrlichen und umweltbezogenen Wirkungen einer Steuerung zu machen?

3.2 Bezug des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen

Das Vorhaben greift bereits entwickelte Verfahren zur modellbasierten Steuerung auf, welche gegenüber der herkömmlichen verkehrsabhängigen Steuerung erhebliche Innovationen darstellen, sich aber bisher nicht verbreiten konnten. Durch nachvollziehbare Demonstration der Wirkungen dieser Verfahren, Erarbeitung von Konzepten zur effizienten Wirkungsermittlung im Anwendungsfall sowie Erarbeitung von stufenweisen Implementierungskonzepten sollen wesentliche Umsetzungshemmnisse abgebaut werden (zu den Umsetzungshemmnissen vergleiche „Leitfaden Verkehrstelematik“, Boltze/Schäfer/Wolfermann [2005]). Andererseits stellt der Einsatz der modellbasierten Steuerung zur Regelung der Umweltbelastung einen weitgehend neuen Ansatz dar, der wesentlichen zusätzlichen Nutzen verspricht und damit zur Verbreitung modellbasierter Steuerungsverfahren motivieren kann.

Durch klare Belege für die Wirkungen modellbasierter Steuerungsverfahren, Aufzeigen zusätzlicher Nutzen im Bereich der Umweltwirkungen sowie Konzepte zur stufenweisen Umsetzung soll die Verbreitung des Einsatzes modellbasierter Steuerungsverfahren erheblich vorangebracht werden.

3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens

Mit dem Vorhaben werden die folgenden Arbeitsziele verfolgt:

- Entwicklung einer effizienten Methodik zur Ermittlung der verkehrlichen und umweltbezogenen Wirkungen verkehrsabhängiger Steuerungen.
- Quantifizierung und Vergleich der Wirkungen von Festzeitsteuerung, regelbasierter und modellbasierter Steuerung der Lichtsignalanlagen in Straßennetzen durch langfristige Messung verkehrlicher und umweltbezogener Kenngrößen in Feldversuchen.
- Entwicklung von Kriterien, die es Städten ermöglichen, festzustellen, unter welchen Umständen der Einsatz einer modellbasierten Steuerung gegenüber einer regelbasierten sinnvoll ist und welche Wirkungen zu erwarten sind.
- Aufstellung von Empfehlungen für eine stufenweise Einführung von netzweiten modellbasierten Steuerungen.

4 Verfahren der LSA-Steuerung

4.1 Klassifizierung der Verfahren

4.1.1 Übersicht

Um Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen (LSA) zu klassifizieren, werden die Bezeichnungen regelbasiert und modellbasiert verwendet:

- Regelbasierte Steuerungsverfahren (Kapitel 4.1.2) nutzen Kenngrößen, die direkt aus dem Verkehrsfluss gewonnen und über Plausibilitätsannahmen mit der Steuerungslogik verknüpft werden. Üblicherweise verwendete Kenngrößen sind die Verkehrsstärke, die Dauer von Zeitlücken, der Belegungsgrad oder die An- bzw. Abmeldung eines ÖV-Fahrzeugs. Aus den gemessenen Kenngrößen werden mit Hilfe von logischen Bedingungen Rückschlüsse auf den Verkehrszustand im Zufahrtsstrom gezogen.
- Modellbasierte Steuerungsverfahren (Kapitel 4.1.3) nutzen für die Anpassung der Steuerungsvariablen nicht die erhobenen Messwerte, sondern Kenngrößen des Verkehrszustands, die in einem Modell online berechnet werden. Modellbasierte Steuerungsverfahren benötigen neben dem Verkehrsmodell auch ein Steuerungsmodell, das die Freiheitsgrade der Steuerung beschreibt. Ein Optimierungsalgorithmus testet systematisch die möglichen Steuerungseinstellungen und bewertet sie auf der Basis der modellierten Wirkungen, die in einer Zielfunktion zusammengefasst und gewichtet werden. Ein modellbasiertes Steuerungsverfahren ist allgemeingültig für Knotenpunkte bzw. Verkehrsnetze formuliert und wird durch Konfigurationsdaten den individuellen Umgebungen angepasst.

Die Bezeichnungen regelbasiert und modellbasiert sind nur bedingt zutreffend. Eine regelbasierte Steuerung geht immer auch von einer Modellvorstellung aus, bei der die Realität in einem Modell vereinfacht wird. Und eine modellbasierte Steuerung kann auch Regeln beinhalten, z. B. wenn eine Fuzzy-Optimierung durchgeführt wird.

Unabhängig von den bisherigen Definitionen werden die folgenden Kriterien zur Klassifizierung von LSA Steuerungsverfahren in regelbasierte und modellbasierte Verfahren vorgeschlagen und beispielhaft angewendet:

1. Steuerung (open loop) oder Regelung (closed loop)
2. Optimierung einer Zielfunktion
3. Prognose des Verkehrszustands
4. Verwendung eines Verkehrsflussmodells
5. Verwendung eines Verkehrsnachfrage- und Routenwahlmodells

Die Kriterien sind nicht voneinander unabhängig. So kann z. B. die Optimierung einer Zielfunktion die Prognose des Verkehrszustandes erfordern.

4.1.1.1 Steuerung (open loop) oder Regelung (closed loop)

Der Begriff Steuerung bezeichnet im Allgemeinen den Vorgang einer Veränderung, der nicht zufällig, sondern kontrolliert verläuft. Dahinter steht die Annahme einer willkürlichen Kraft, die das zu steuernde Objekt meist direkt bewegt oder kontrolliert. Im englischen Sprachgebrauch ist zu beachten, dass Steuerung und Regelung mit dem Begriff control übersetzt werden und die Differenzierung durch die Zusätze open loop bzw. closed loop erfolgt.

Steuerung wird in der Systemtheorie (Regelungstechnik) als Gegensatz zur Regelung verstanden, die stets mit Rückkopplung der kontrollierten Größe auf den Regler einhergeht. Im Gegensatz zum Regelkreis im Sinne der Regelungstechnik fehlt in der Steuerung der Rückkopplungsweig. Kennzeichen der Regelung ist somit ein geschlossener Wirkungsablauf.

„Das Regeln, die Regelung, ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.“ (DIN 19226)

In Abbildung 19 sind die Grundelemente eines Regelkreises dargestellt. Die Regelstrecke beschreibt das zu regelnde System, dessen Zustand über die Regelgröße x quantifiziert werden kann. Bei der Regelung wird die Regelgröße x fortlaufend gemessen und mit einem vorgegebenen Sollwert (Führungsgröße w) verglichen. Besteht zwischen diesen beiden Größen eine Differenz (Regelabweichung $e = w - x$), so wird abhängig von der gemessenen Differenz durch einen Regler ein Verstellvorgang eingeleitet, welcher die Regelgröße mit der Führungsgröße wieder in Übereinstimmung bringen soll. Losgelöst von der Definition einer Führungsgröße ist die Extremwertregelung, deren Zielsetzung es ist, die Regelgröße zu minimieren oder zu maximieren. Der Regler beeinflusst die Regelstrecke über Stellrichtungen gemäß der an ihrem Eingang wirkenden Stellgröße y .

In Abbildung 20 ist der Regelkreis für die Beeinflussung des Verkehrsablaufs in einem Netz mit LSA Steuerung dargestellt. Die Ausprägung des Verkehrsablaufes in einem Straßennetz ist von einer Reihe äußerer Einflussgrößen abhängig, die in zwei Gruppen untergliedert werden können:

- *Stellgrößen*, die die Lichtsignalanlagen beeinflussen (Umlaufzeit, Grünzeitaufteilung, Phasenfolge, Phasenanzahl, Versatzzeit). Diese Stellgrößen können innerhalb eines zulässigen Wertebereichs gewählt werden, der technischen, physischen und betrieblichen Einschränkungen unterworfen ist.
- *Störungen*, deren Werte messbar (z. B. Verkehrsstärke), erkennbar (z. B. Wetter, Unfall) oder für einen bestimmten Zeithorizont in der Zukunft prognostizierbar sind, aber nicht beeinflusst werden können.

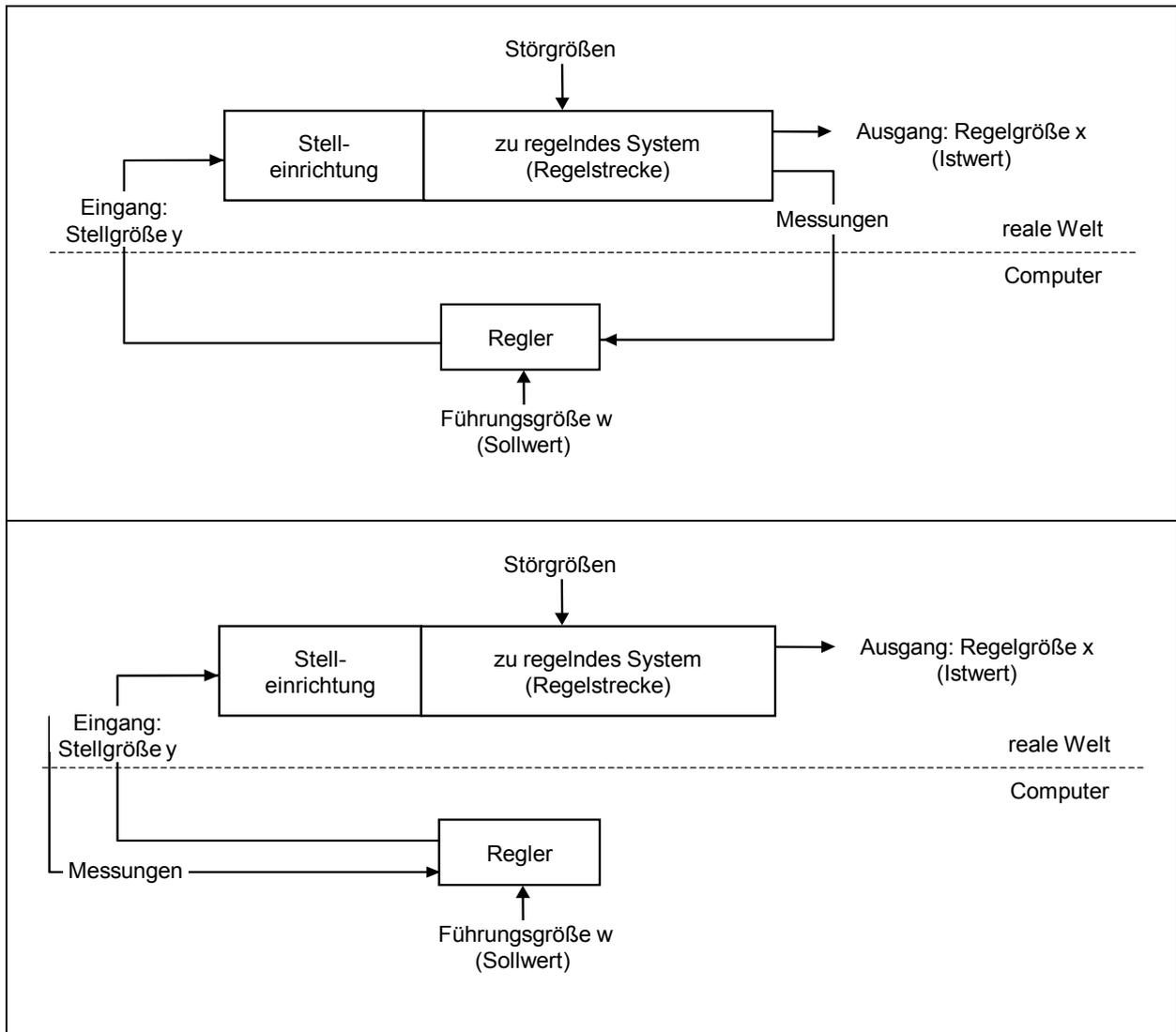


Abbildung 19: Allgemeine Darstellung eines geschlossenen (oben) und eines offenen (unten) Regelkreises.

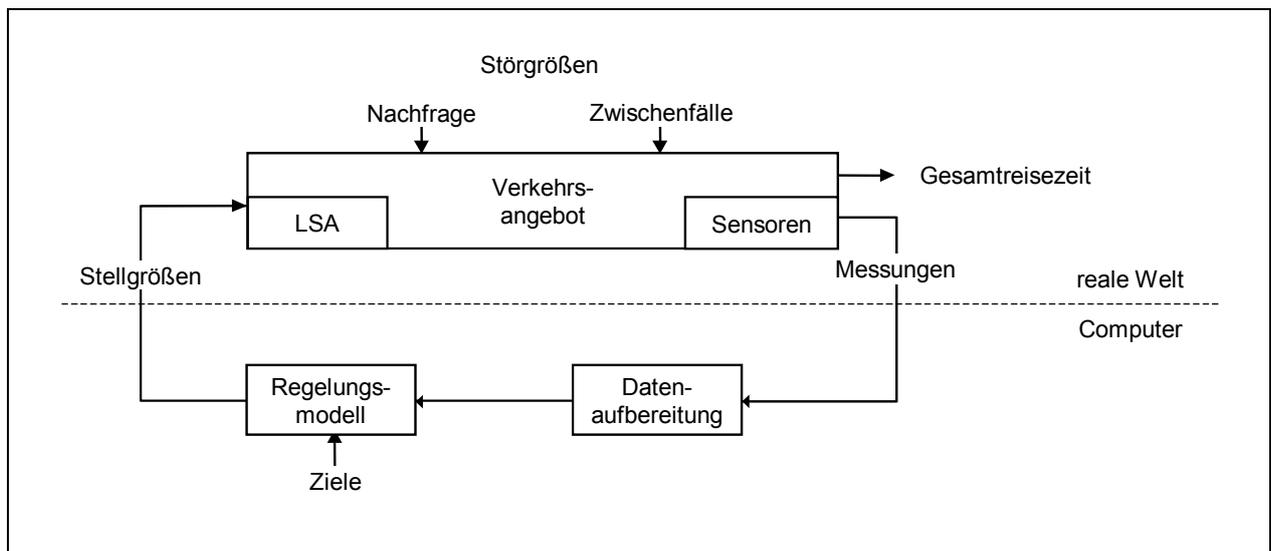


Abbildung 20: Regelkreis im Verkehr.

Um die Leistungsfähigkeit einer LSA zu messen, müssen die Kenngrößen der Zielfunktion (Performance Index) erfasst werden. Wenn diese Kenngrößen nicht direkt gemessen werden können, besteht die Aufgabe der Datenaufbereitung darin, die Messdaten, die von den Sensoren (z. B. Induktionsschleifen) eingehen, so aufzubereiten und zu vervollständigen, dass sie von nachgeschalteten Regelungsmodellen verarbeitet werden können. Kern des Regelkreises ist der Regler bzw. das Regelungsmodell, das die Stellgrößen auf der Basis der vorhandenen Messungen, Annahmen oder Voraussagen in Echtzeit so festlegt, dass die vorgegebenen Ziele trotz der verschiedenen Störungen möglichst gut erreicht werden.

Die Trennung zwischen open und closed loop oder Steuerung und Regelung ist, für Systeme die den Verkehr betrachten, im Rahmen der systemtheoretischen Definitionen nicht eindeutig zu ziehen. Der ereignisdiskrete Charakter vieler Messgrößen (Anforderungsdetektor) und die binären Stellgrößen (grün/rot) machen es schwierig, die klassischen Klassifikationen für die kontinuierlichen Systeme der Mechanik oder der Verfahrenstechnik anzuwenden. Die Existenz einer Rückkopplung verwischt sich mit steigendem Abstand zwischen Sensor und Regelstrecke, obwohl sich Änderungen im Verkehr stromabwärts und stromaufwärts ausbreiten. Im Rahmen der folgenden Betrachtungen soll die verkehrsabhängige Steuerung einer LSA als Beispiel für einen geschlossenen Regelkreis dienen. Ein offener Regelkreis wird durch eine Rampenzuflussregelung, bei der nur Messwerte stromaufwärts der Zufahrt gemessen werden, repräsentiert. Die Unterscheidung definiert sich hier durch die Distanz zwischen Sensor und Regelstrecke.

Wenn wichtige Kenngrößen wie z. B. die Fahrzeit, die zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer LSA erforderlich sind, nicht direkt gemessen werden können, müssen Sie z. B. mit einem Verkehrsflussmodell abgeleitet werden.

4.1.1.2 Optimierung einer Zielfunktion

Bei der Optimierung können folgende Variablen einer LSA Steuerung variiert werden:

- Umlaufzeit
- Versatzzeit (bei Netzsteuerung)
- Phasenfolge
- Phasenanzahl
- Freigabezeitaufteilung

Die Zielfunktion kann folgende Komponenten in einem Performance Index zusammenfassen:

- Anzahl der Halte
- Fahrzeit bzw. Wartezeiten, ggfs. gewichtet nach Verkehrsmittel
- Staulänge
- Verkehrsstärke
- Kraftstoffverbrauch
- Emissionen

4.1.1.3 Prognose des Verkehrszustands

Der gesamte Verkehrszustand oder die für eine Optimierung relevanten Kenngrößen der Zielfunktion können für einen Prognosehorizont prognostiziert werden. Die Prognose berücksichtigt dabei die aktuelle Nachfragesituation und die Systemzustände der LSA bis zum Prognosehorizont. Um die Wirkungen einer spezifischen Nachfragesituation und unterschiedlicher LSA-Systemzustände zu ermitteln, eignen sich insbesondere Verkehrsflussmodelle. Man kann sich aber für einzelne Kenngrößen (z. B. die Verkehrsstärke oder die Rückstaulänge) auch eine Trendextrapolation oder eine Regression vorstellen.

4.1.1.4 Verwendung eines Verkehrsflussmodells

Ein Verkehrsflussmodell ist ein Modell, das die Ortsveränderung von Fahrzeugpuls, Einzelfahrzeugen oder Fußgängern entlang einer Route beschreibt. Sie unterscheiden sich in der Modellierung der Interaktion zwischen den Fahrzeugen und der Interaktion zwischen Fahrzeug und Umwelt. Ein Warteschlangenmodell kann auch als ein Verkehrsflussmodell aufgefasst werden.

Verkehrsflussmodelle ermöglichen es, die Kenngrößen Fahrzeit und Zahl der Halte unter Berücksichtigung des Systemzustands der LSA zu ermitteln.

4.1.1.5 Verwendung eines Verkehrsnachfrage- und Routenwahlmodells

Da sich die Verkehrsstärke auf den Routen in einem Verkehrsnetz im Laufe eines Tages ändert, benötigt ein Verkehrsflussmodell zeitabhängige Abbiegeanteile oder Routenbelastungen. Sie können auf der Grundlage von Messwerten der Verkehrsstärke mit einem Verfahren zur Schätzung der Quelle-Ziel-Beziehungen bestimmt werden.

4.1.1.6 Fazit

Ein modellbasiertes Netzsteuerungsverfahren definiert sich durch Optimierung einer Zielfunktion. Für den Optimierungsprozess der Stellgrößen ist es notwendig, die Auswirkungen und die Verkehrslage unter Verwendung eines Verkehrsflussmodells zu prognostizieren und zu bewerten. Die Verwendung eines Verkehrsnachfrage- oder Routenwahlmodells ist für diesen Vorgang nicht zwingend erforderlich und bildet deshalb keine Trennlinie zwischen regelbasierten und modellbasierten Netzsteuerungsverfahren. Gleiches gilt für die Unterscheidung zwischen open und closed loop oder Steuerung und Regelung. Beide Netzsteuerungsverfahren sind, aufgrund der Rückkopplungen zwischen den einzelnen Knotenpunkten im systemtheoretischen Sinn, als Regelung zu verstehen.

4.1.2 Regelbasierte Steuerung

Wie bereits oben beschrieben, nutzen regelbasierte Steuerungsverfahren Kenngrößen, die direkt aus dem Verkehrsfluss gewonnen und über Plausibilitätsannahmen mit der Steuerungslogik verknüpft werden. Aus den gemessenen Kenngrößen werden mit Hilfe von logischen Bedingungen Rückschlüsse auf den Verkehrszustand im Zufahrtstrom gezogen, die dann ggfs. zu bestimmten Steuerentscheidungen führen.

Bei der Umsetzung regelbasierter Steuerungsverfahren wird meist sekundlich der in Abbildung 21 dargestellte Ablauf durchlaufen (vgl. [FGSV 2010], S. 37 ff.).

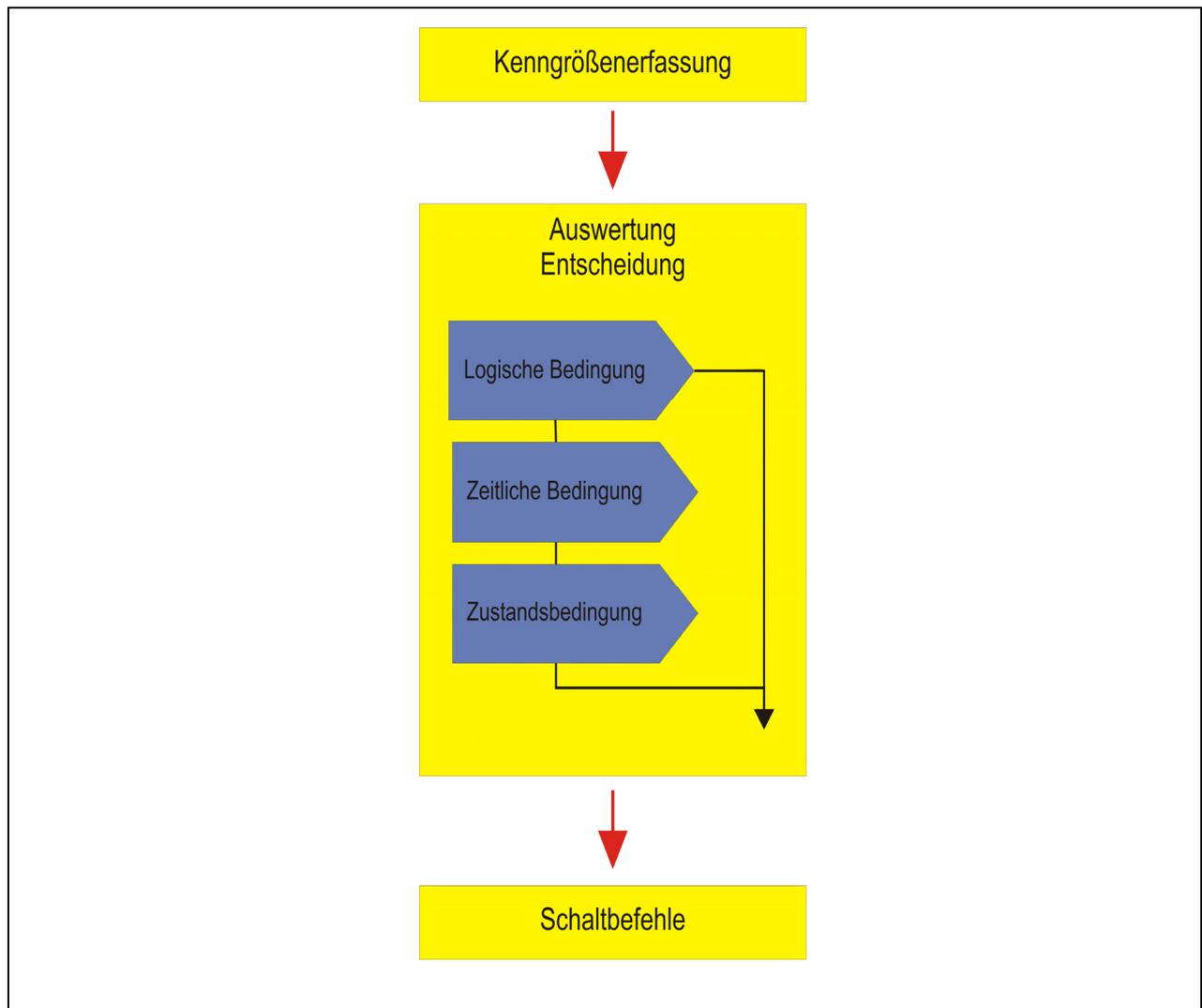


Abbildung 21: Regelbasierte Umsetzung eines Steuerungsverfahrens, nach FGSV [2010].

Bei der Kenngrößenenerfassung werden über Detektoren im Straßenraum verkehrliche Kenngrößen wie Zeitlücken und Belegungsgrade erfasst und ggfs. weitere, nicht direkt messbare Kenngrößen über Modelle abgeschätzt. Letzteres können beispielsweise mittlere Wartezeiten oder Staulängen sein.

Im Block „Auswertung / Entscheidung“ werden dann - basierend auf bestimmten Bedingungen - festgelegte Steuerungsentscheidungen getroffen. Dazu wird ein Ablaufdiagramm durchlaufen, das auf logischen, zeitlichen und zustandsbezogenen Bedingungen sowie zugehörigen Aktionen beruht. Neben den erfassten Kenngrößen gehen in den Entscheidungsprozess Vergleichs- und Schwellenwerte wie beispielsweise maximale Zeitlückenwerte oder Belegungsgrade und Rahmenvorgaben wie erlaubte Freigabebereiche ein. Abschließend werden die getroffenen Steuerungsentscheidungen in Schaltbefehle umgesetzt.

Mit einem regelbasierten Steuerungsverfahren kann sowohl eine Signalprogrammanpassung (Freigabezeitanpassung, Phasenanforderung, Phasentausch oder Versatzzeitanpassung) als auch eine Signalprogrammbildung realisiert werden. Die zugehörigen Entscheidungs- und Steuerungslogiken können jedoch schnell sehr komplex werden.

In der Praxis erfolgt die Erstellung der Steuerungslogiken daher meist mit softwaretechnischer Unterstützung durch geeignete Verkehrsingenieurs-Arbeitsplatzwerkzeuge wie z. B. CROSSIG, LISA+ oder P2. Diese werden dann vorab in geeigneten Mikrosimulationsumgebungen wie AIMSUN, NIONSTOP oder VISSIM getestet. Die getesteten und per Simulation geprüften Logiken können dann direkt an das Steuergerät übertragen werden. Voraussetzung hierfür ist natürlich, dass Verkehrsingenieur-Arbeitsplatz und Steuergerät zueinander kompatibel sind, d. h., sie beherrschen dieselben Steuerungsverfahren, so dass die Versorgungsdaten zwischen beiden Systemen ausgetauscht werden können. Moderne Steuergeräte beherrschen in der Regel mehrere der gängigen Steuerungsverfahren wie LISA+, VS-PLUS, PDM/TL und TRELAN/TRENDS.

4.1.3 Modellbasierte Steuerung

4.1.3.1 Grundlagen

Der Unterschied zu logikbasierten Systemen ist der Einsatz von Verkehrsmodellen auf deren Ergebnissen die Optimierung der Steuerung basiert.

„Die modellbasierte Umsetzung der Steuerungsverfahren basiert nicht direkt auf den erhobenen Kenngrößen, sondern auf den in einem Modell weiterverarbeiteten Werten.“ [FGSV 2010]

Aus den aktuellen Messdaten und unter zu Hilfenahme von historischen Messwerten werden der Verkehr und die damit in Verbindung stehenden Kenngrößen mittels geeigneter Verkehrsmodelle bis hin zu einem Zeithorizont (in der Regel etwa 5-15 Minuten) prognostiziert. Modellbasierte Steuerungsverfahren können sowohl zur Steuerung auf Knotenpunktsebene, als auch zur Steuerung in Streckenzügen und Verkehrsnetzen eingesetzt werden. Verschiedene Realisierungen solcher Netzsteuerungsverfahren werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

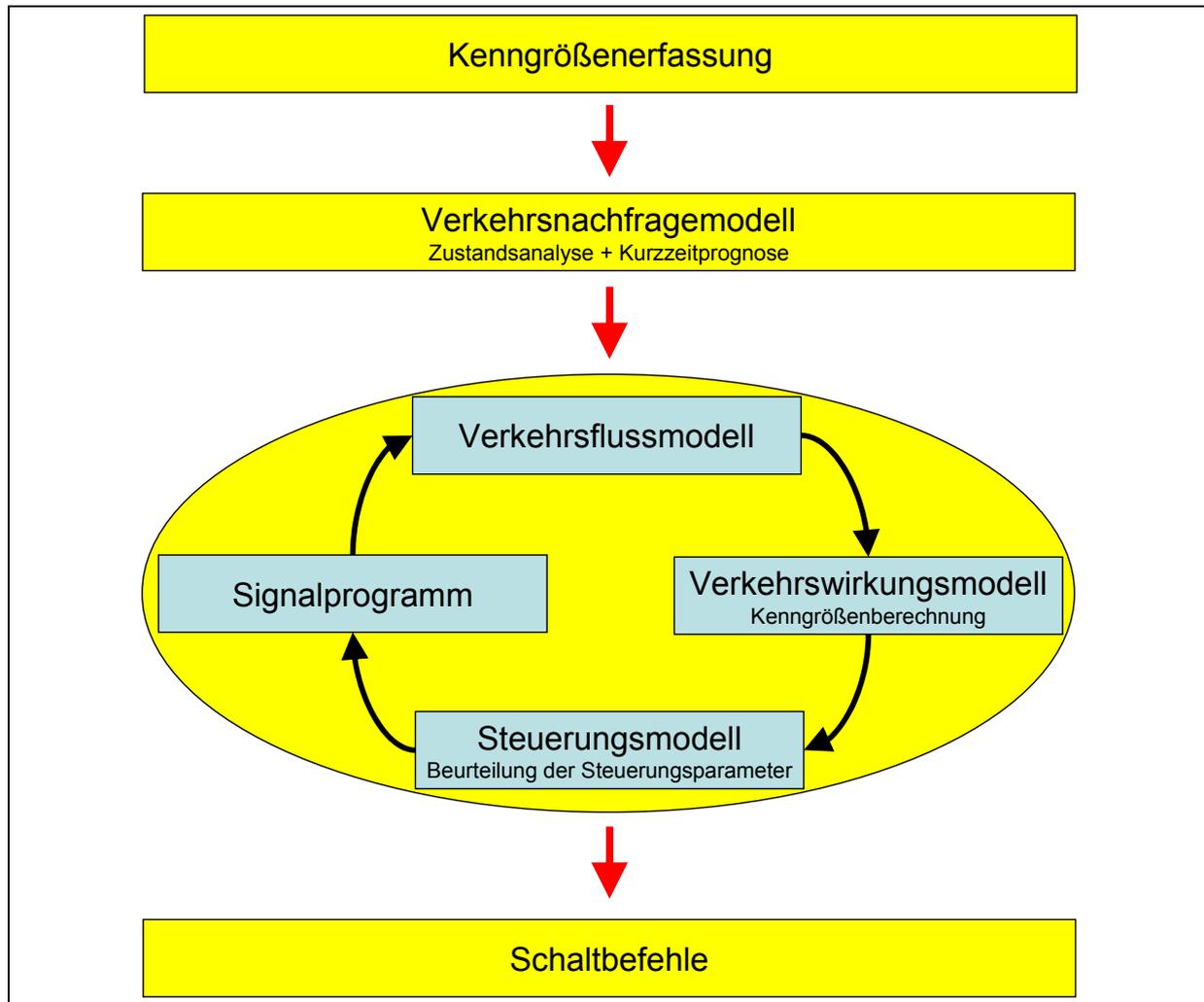


Abbildung 22: Schematisch die Umsetzung eines modellbasierten Steuerungsverfahrens [vgl. FGSV 2010], die in den folgenden Unterkapiteln detaillierter erläutert wird.

4.1.3.2 Kenngrößenerfassung

Wie auch bei logikbasierten Steuerungsverfahren ist der erste Schritt der Steuerung die Kenngrößenerfassung. Dies beinhaltet in Abhängigkeit der Art des Verkehrsflussmodells im Wesentlichen Detektordaten relevanter Zu- und Abflüsse, sowie wichtiger netzinterner Ströme im Steuergebiet. Normalerweise liegen diese Daten in aggregierter Form vor. Jedes Verfahren bevorzugt dabei unterschiedliche Positionen der Detektoren im Steuerungsgebiet. Die exakte Lage dieser Detektoren ist ebenfalls in der Regel Teil der Eingangsdaten für das Verkehrsnachfragemodell.

Des Weiteren können auch vorverarbeitete Daten, wie beispielsweise Auslastungs- und Sättigungsgrade, Abbiegeströme, detaillierte Zuflussganglinien und Rückstaulängen, sowie eventuell zusätzliche Rahmenvorgaben des übergeordneten Verkehrsmanagements in die Erfassung des Verkehrs einfließen.

4.1.3.3 Verkehrsnachfragemodell

Mit einem Verkehrsnachfragemodell werden die real gemessenen Daten vervollständigt. In der Regel wird aus den Daten der Detektoren und den aktuellen Schaltzuständen der Lichtsignalanlage eine Zustandsanalyse, sowie eine kurzfristige Prognose erstellt. Das Nachfragemodell liefert dabei Informationen über die Ströme im Netz, Strombelastungspläne und Stromhierarchien. Verkehrsnachfragemodelle basieren beispielsweise auf endogenen Quelle/Ziel-Schätzungen, Umlegungen oder Messwertpropagierung. Ein Verkehrsnachfragemodell bildet aus den oben genannten Eingangsdaten und den LSA-Steuerungsgrößen den Verkehrsablauf im Optimierungsintervall innerhalb des Steuerungsgebietes nach.

4.1.3.4 Signalprogrammanpassung

Bei der Optimierung der Steuerung können folgende Veränderungen vorgenommen werden:

- Anpassung der Freigabezeiten
- Anpassung der Umlaufzeit
- Anpassung der Versatzzeiten
- Phasentausch (Dieses Mittel wird vor allem in der ÖPNV-Priorisierung angewendet. Die Phasenreihenfolge wird auf Anforderung so vertauscht, dass die Wartezeiten für den ÖV minimiert werden.)
- Bedarfsphasenanforderung (Wiederum auf Anforderung wird hier eine zusätzliche Phase in den Signalplan eingeschoben.)
- Festlegung von Rahmensignalplänen (Es werden Randbedingungen für lokale Knotenpunktsteuerungen festgelegt)
- Signalplanbildung (Wenn Umlaufzeit, Freigabezeit und Sperrzeit nicht vorliegen, kann der Signalplan fortlaufend neu berechnet und optimiert werden.)

Über die Parametrisierung können Randbedingungen vorgegeben werden. „Steuerungsparameter sind z. B.

- erlaubte Umlaufzeit,
- minimale und maximale Umlaufzeit,
- erlaubte Phasenfolge,
- Vorgabe von Fahrzeugströmen im Netz (optional),
- Gewichtungsfaktoren für Optimierungskriterien (z. B. Wartezeiten und Halte je Fahrstreifen der Teilstrecke) sowie der
- Optimierungsplan (Reihenfolge, in der die Knotenpunkte des Straßennetzes optimiert werden).“ [FGSV 2010]
- Erlaubte Änderungen pro Schaltung

4.1.3.5 Verkehrsflussmodell und Verkehrswirkungsmodell

Das Verkehrsflussmodell bildet aus den oben genannten Eingangsdaten und den berechneten LSA-Steuerungsgrößen den Verkehrsablauf im Optimierungsintervall (meist zwischen 5 und 15 Minuten) innerhalb des Steuerungsgebietes nach. Das Verkehrswirkungsmodell bewertet den ermittelten Verkehrsablauf hinsichtlich der verkehrsbedingten Wirkungen der Steuerung auf Verkehr und Umwelt, die letztendlich in die Bewertung der Steuerung einfließen. Dies können zum Beispiel Wartezeiten, Zahl der Halte, Fahrzeiten, Staulängen, Verkehrsstrom bezogene Auslastungsgrade, Verkehrszustände (Level of Service) oder Emissionen sein.

Die modellbasierten Steuerungen werden aufgrund ihrer Komplexität, im Gegensatz zu logikbasierten Steuerungen, die über Ablaufdiagramme oder Struktogramme beschrieben werden können, über ihre Parametrierung beschrieben. Über die Parametrierung kann die verkehrstechnische Zielsetzung und das Verhalten der Steuerung nachvollzogen werden. Dies beinhaltet zum Beispiel Verkehrsmodellparameter und Steuerungsparameter. „Zu den Verkehrsmodellparametern gehören z. B.

- Pulkauflösung,
- Zeitbedarfswert für die Fahrzeugströme im Knotenpunkt und
- Fahrzeiten bzw. Progressionsgeschwindigkeiten für die Teilstrecken.“ [FGSV 2010]

4.1.3.6 Steuerungsmodell (Optimierung)

Die Optimierung der Steuerungsgrößen erfolgt in der Regel über eine Zielfunktion. Dazu werden die im Verkehrsflussmodell ermittelten verschiedenen verkehrsbezogenen Qualitätskriterien (Wartezeit, Halte, ...), die jeweils auf Grundlage eines Steuerungsvorschlages ermittelt werden, mit einer festzulegenden Wichtung zu einem Qualitätsindex (Performance Index) zusammengefasst. Dies kann für einzelne Knoten, Strecken oder (Teil-)Netze geschehen.

Ein Testen aller möglichen Lösungen (vollständige Enumeration) ist mit zunehmender Netzgröße und Anzahl der einbezogenen Steuerungsgrößen nicht mehr möglich. Es werden daher Optimierungsalgorithmen und Optimierungsstrategien eingesetzt.

„Ein Optimierungsalgorithmus testet systematisch die möglichen Steuerungseinstellungen und bewertet sie auf Basis der modellierten Wirkungen Entsprechend einer Zielfunktion.“ [FGSV 2010]

4.1.3.7 Weiterleitung der Schaltbefehle (Systemtechnik, Kompatibilität)

Die in der Zentrale ermittelten Steuerungsanweisungen mit dem besten Qualitätsindex werden an die Steuerungsgeräte übermittelt. Hier sind technische Randbedingungen wesentlich. Die Übermittlung kann nur über geeignete Schnittstellen geschehen. Die Steuergeräte der

Lichtsignalanlagen müssen die vom Steuerungsverfahren generierten Schaltbefehle verstehen können d. h. die Schnittstellen der Steuergeräte müssen zur Zentrale kompatibel sein. Aufgrund technischer Randbedingungen lassen sich nicht alle Steuerungsverfahren in jeder Zentrale implementieren.

4.1.4 Steuerung von Knotenpunkten

Die Steuerung eines einzelnen Knotenpunktes ist überall dort sinnvoll, wo zur Verbesserung der Verkehrssicherheit oder der Qualität des Verkehrsablaufs ein einzelner Knoten mit einer Lichtsignalanlage gesteuert werden soll. D.h., es befinden sich keine weiteren lichtsignalgesteuerten Knotenpunkte in der näheren Umgebung (bis etwa 1.000m Entfernung). Dies trifft beispielsweise häufig auf Einzelknoten an Landstraßen oder in kleineren Ortschaften zu. Bei räumlich nah beieinander liegenden Knotenpunkten werden die Fahrzeugankünfte an dem einen Knotenpunkt durch das Signalprogramm am anderen Knotenpunkt beeinflusst, da dort die Fahrzeuge während der Freigabezeit als Fahrzeugpulk abfließen. Auf die dann sinnvolle Koordinierung der Steuerungen wird im folgenden Unterkapitel näher eingegangen.

Zentrale Komponente einer Lichtsignalsteuerung ist das Steuergerät. Für den hier beschriebenen Fall einer Einzelsteuerung ohne Koordinierung mit anderen Lichtsignalanlagen erfolgt der Betrieb des Steuergerätes entweder ohne Verkehrsrechneranschluss oder mit Verkehrsrechneranschluss, der jedoch nur zur Überwachung der Anlage genutzt wird. Die Hauptaufgaben des Steuergerätes bei einer Einzelsteuerung sind die Erfassung, Aufbereitung und Verarbeitung von Daten angeschlossener Detektoren, die Abarbeitung der hinterlegten Steuerlogiken und die Ansteuerung der angeschlossenen Signalgeber.

Zur Steuerung von Lichtsignalanlagen an (einzelnen) Knotenpunkten können unterschiedliche Steuerungsverfahren zum Einsatz kommen, die nachstehend in Anlehnung an FGSV [2010] systematisiert werden:

Ein Steuerungsverfahren beschreibt den Ablauf eines Signalprogramms, d. h. die Art, den Umfang und das Zusammenwirken von veränderbaren Steuerungsgrößen und Signalprogrammelementen [FGSV 2010]. Steuerungsverfahren werden differenziert nach den verkehrsabhängig veränderbaren Elementen der Signalprogramme (z. B. Umlaufzeit, Freigabezeiten, Phasenanzahl und -folgen) und nach den Merkmalen, wann (zeit- oder verkehrsabhängig) und wie (Auswahl, Bildung oder Anpassung von Signalprogrammen) die Veränderungen durchgeführt werden können. Laut FGSV [2010] kann bei den Verfahren zwischen einer makroskopischen und einer mikroskopischen Steuerungsebene unterschieden werden.

Auf der makroskopischen Ebene erfolgt entweder eine zeitplanabhängige Auswahl eines Signalprogramms oder es wird verkehrsabhängig ein passendes Signalprogramm ausgewählt bzw. ein geeignetes Rahmensignalprogramm gebildet. „Verkehrsabhängig“ bedeutet hierbei in Reaktion auf makroskopische Kenngrößen wie z. B. mittlere Staulänge oder mittlere Verkehrsdichte. Ziel der makroskopischen Steuerungsebene ist im Allgemeinen eine

Anpassung des Signalprogramms an längerfristige Änderungen in den Verkehrsbelastungen am Knoten oder im Netz.

Ziel der mikroskopischen Steuerungsebene ist es dagegen, kurzfristige Änderungen des Verkehrszustandes an einem Knotenpunkt möglichst adäquat zu berücksichtigen. Dabei wird die Verkehrslage über Detektoren erfasst und kurzfristige Änderungen (z. B. innerhalb einer Umlaufzeit) können zu einer schnellen und nicht dauerhaften Anpassung des Signalprogramms führen.

	Steuerungsverfahren		Aktivierung		Verkehrsabhängig veränderbare Elemente der Signalprogramme				
	Oberbegriff	Hauptmerkmal der Veränderbarkeit der Signalprogramme	zeitplanabhängig	verkehrsabhängig	Umlaufzeit	Phasenfolge	Phasenanzahl	Freigabezeiten	Versatzzeit
A: Makroskopische Steuerungsebene	Signalprogramm-auswahl	zeitplanabhängige Auswahl der Signalprogramme	X		In Kombination mit einem Steuerungsverfahren der Gruppe B veränderbare Elemente des Signalprogramms				
		verkehrsabhängige Auswahl der Signalprogramme		X					
	Bildung Rahmen-signal-programm	Verkehrsabhängige Bildung der Rahmen-signalprogramme		X					
B: Mikroskopische Steuerungsebene	Festzeit-signal-programm		Aktivierung gemäß Steuerungsverfahren der Gruppe A						
	Signal-programm-anpassung	Freigabezeitanpassung						X	
		Phasentausch				X			
		Phasen-anforderung					X	X	
		Versatzzeitanpassung							X
Signal-programm-bildung	freie Veränderbarkeit		X	X	X	X	X		

Tabelle 13: Einteilung der gängigen Steuerungsverfahren gemäß FGSV [2010].

4.1.5 Steuerung von Netzen

Bei der Steuerung von Lichtsignalanlagen in Netzen werden mehrere Knotenpunkte untereinander koordiniert. Die Steuerung der jeweiligen Knotenpunkte unterliegt aber weiterhin den in Kapitel 4.1.4 beschriebenen Vorgaben. Die Steuerung von Netzen reicht von der Abstimmung zweier Knotenpunkte über die Steuerung von Linien, so genannten Grünen Wellen, bis hin zur Steuerung ganzer, komplexer Netze. Als Vorteile solcher koordinierter Routen sind kürzere Fahrzeiten, höherer Fahrkomfort, ein geringerer Kraftstoffverbrauch und somit auch geringere Schadstoff- und Lärmemissionen zu nennen. Zudem können durch diese Maßnahmen stadtfunktionale Ziele verfolgt werden, indem beispielsweise der Verkehr auf solchen koordinierten Hauptverkehrsrouten gebündelt wird.

4.1.5.1 Verkehrstechnische Randbedingungen

Im Gegensatz zu der in Kapitel 4.1.4 besprochenen Knotenpunktsteuerung müssen die Signalprogramme bei Linien- und Netzsteuerungen auf die Signalprogramme der benachbarten Knotenpunkte abgestimmt werden. Die Signalprogramme der Knoten müssen zur Koordinierung eine gemeinsame Umlaufzeit, die so genannte System-Umlaufzeit, haben. Damit wird gewährleistet, dass alle Verkehrsströme ohne eingeschränkte Koordinierungsbedingungen bedient werden können. Kurzfristige Abweichungen von dieser Umlaufzeit, etwa durch Freigabezeitanpassungen oder Freigabezeitanforderungen müssen ausgeglichen werden. Die System-Umlaufzeit richtet sich nach dem am stärksten belasteten Knotenpunkt der in die Steuerung einbezogen wird. An diesem sollte der Auslastungsgrad der koordinierten Verkehrsströme nicht über 85% liegen, da durch Rückstaus vor den Haltelinien sonst keine Koordinierung zustande kommen kann.

In besonderen Fällen können Kurzumläufe innerhalb der System-Umlaufzeit angewendet werden. Die Summe der Kurzumläufe muss dabei der System-Umlaufzeit entsprechen.

- „In schwach belasteten Straßenzügen, die an Hauptverkehrsstraßenzüge angeschlossen werden,
- bei einzelnen knapp bemessenen Stauräumen,
- bei Fußgänger-Lichtsignalanlagen,
- bei Knotenpunkten mit schwachem Querverkehr.“ [FGSV 2010]

Die wesentliche Entwurfsgröße bei der Koordinierung von Netzen ist die Versatzzeit. Sie richtet sich nach der Progressionsgeschwindigkeit V_P [km/h], die zwischen $0,9 V_{zul}$ und V_{zul} (innerorts in der Regel 50 km/h) liegen sollte, abschnittsweise aber auch unterschiedlich sein kann. Über den Abstand der Haltelinien lässt sich so die Versatzzeit zum benachbarten Knotenpunkt berechnen. Zu berücksichtigen sind für die Progressionsgeschwindigkeit auch Einflüsse die die Fahrgeschwindigkeit verringern können, wie hoher Schwerverkehrsanteil, große Steigungen, enge Kurven oder schlechte Fahrbahnbeschaffenheit.

Die Koordinierung wird in der Regel als Zeit-Weg-Diagramm dargestellt. In ihm werden die Haltelinien beider Fahrrichtungen und die zugehörigen Signalbilder eingetragen. Darin wird ein Grünband eingezeichnet, wobei die Breite der Freigabezeit entspricht und die Neigung der Progressionsgeschwindigkeit. Es wird dabei empfohlen auf das Grünende hin zu koordiniert werden, damit die letzten Fahrzeuge der Fahrzeugpulke nicht die gesamte Rotzeit ihrer Fahrtrichtung abwarten müssen (gilt nur für planerischen, nicht für modellbasierte Ansatz). Ein kurzer Halt der ersten Fahrzeuge kann dagegen leichter verkraftet werden, da er zudem den Fahrzeugpulk, der sich über längere Strecken auflöst, wieder etwas zusammenschiebt.

In der Regel lassen sich ideale Koordinierungen auf Linienzügen in beide Richtungen nur dann verwirklichen, wenn diese im so genannten Teilpunktabstand liegen:

$$l_{TP} = \frac{1}{2} t_u * (V_p / 3,6)$$

In der Realität ist dies selten der Fall. Die Knotenpunkte haben unterschiedliche Abstände, so dass die Grünbänder nicht ungestört fortgeführt werden können und die vorhandene Kapazität nicht voll ausgenutzt werden kann. Wenn die Koordinierung in beide Richtungen nicht möglich ist, wird daher die stärker belastete Richtung bevorzugt und durchgängig koordiniert. Dies führt oft zu „Grünen Wellen“ stadteinwärts im Morgenprogramm und stadtauswärts gerichteten Wellen im Nachmittags- bzw. Abendprogramm. Für Einbieger aus Querstraßen und Linksabbieger können so allerdings lange Wartezeiten entstehen. [vgl. FGSV 2010]

4.1.5.2 Bauliche Voraussetzungen

Für die Qualität der Koordinierung sind einige bauliche Randbedingungen zu beachten:

- „Mehr als ein durchgehender Fahrstreifen oder die Anlage von Radverkehrsanlagen wirken sich positiv auf die Qualität der Koordinierung aus, da sich ggfs. auf der Fahrbahn geführter Radverkehr überholen lässt.
- Halteverbote können eine negative Beeinträchtigung der Qualität des Verkehrsablaufs infolge haltender und parkender Fahrzeuge vermeiden.
- Für Abbieger sollten im Knotenpunktbereich Abbiegestreifen vorgesehen werden, damit durchgehender Verkehr nicht behindert wird und Auffahrunfälle vermieden werden.
- Fußgängerüberwege (Zeichen 293 der StVO) sind an Straßen mit Grüner Welle nicht zulässig (siehe VwV-StVO zu §26).
- Grüne Wellen für den Kraftfahrzeugverkehr sind bei Entfernungen zwischen Lichtsignalanlagen bis zu 750 m, in besonders günstigen Fällen auch bis zu 1000 m, wirksam. Bei größeren Abständen lösen sich Fahrzeugpuls, so weit auf, dass eine Koordinierung der Lichtsignalanlagen in der Regel nicht mehr sinnvoll ist.“ [FGSV 2010]

4.1.5.3 Besonderheiten bei der Steuerung von Netzen

Die Koordinierung von Netzen ist nötig, wenn sich Straßenzüge mit Lichtsignalanlagen kreuzen. Die bereits an Knotenpunkte und in Straßenzüge bestehenden Vorgaben bleiben bestehen.

Die untereinander konkurrierenden Anforderungen der verschiedenen Verkehrsströme und Verkehrsteilnehmergruppen sind in Straßennetzen noch einmal wesentlich komplexer. Durch das

- „Zusammentreffen mehrerer straßenzugbezogener Grüner Wellen, oft an zentralen Knotenpunkten mit hoher Auslastung,
- die Häufung von Fahrzeugströmen mit hoher oder ähnlicher Verkehrsstärke sowie instabiler Verkehrszustände aufgrund überlasteter Knotenpunkte und
- die Zunahme möglicher Zielkonflikte zwischen den Verkehrsteilnehmergruppen im Straßennetz“ [FGSV 2010]

wird die Komplexität der Steuerung deutlich höher.

Größere Verkehrsnetze sollten daher zur Steuerung in kleinere Teilnetze aufgeteilt werden. Es ist dabei auf geeignete Übergänge zwischen den Teilnetzen zu achten.

4.2 Modellbasiertes Steuerungsverfahren Balance

4.2.1 Grundlagen

Die ersten Bausteine für die adaptive Netzsteuerung BALANCE (BALancing Adaptive Network Control mEthod) wurden in den europäischen Forschungsprojekten Munich COMFORT (MUNICH COoperative Management FOR urban and regional Transport) [MERTZ 1996] entwickelt. Dieser Prototyp wurde im europäischen Forschungsprojekt TABASCO (Telematics Applications in BAvaria, SCotland, and Others) [1998] weiterentwickelt. Im Projekt MANAH (MANagement von Hauptstraßennetzen) wurde das System komplett überarbeitet, um in einem Teilnetz der Messestadt München-Riem eingesetzt zu werden. BALANCE wurde als Dissertation „Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen“ von Bernhard Friedrich [1999] veröffentlicht.

Die Netzsteuerung BALANCE wird von den Firmen GEVAS software GmbH und TRANSVER GmbH vertrieben.

4.2.2 Systemfunktionen

Die aktuelle Version der adaptiven Netzsteuerung BALANCE beinhaltet eine zentrale Steuerung. Auf Knotenpunktebene wird diese meist mit logikbasierten Steuerungen kombiniert. Die Steuerung wird dabei zur Optimierung von Strecken und Netzen verwendet.

Neben der Online-Optimierung wird das BALANCE-Verkehrsmodell auch zur Offline-Optimierung durch NONSTOP-GA, das im Ingenieurarbeitsplatz CROSSIG eingebunden ist, verwendet.

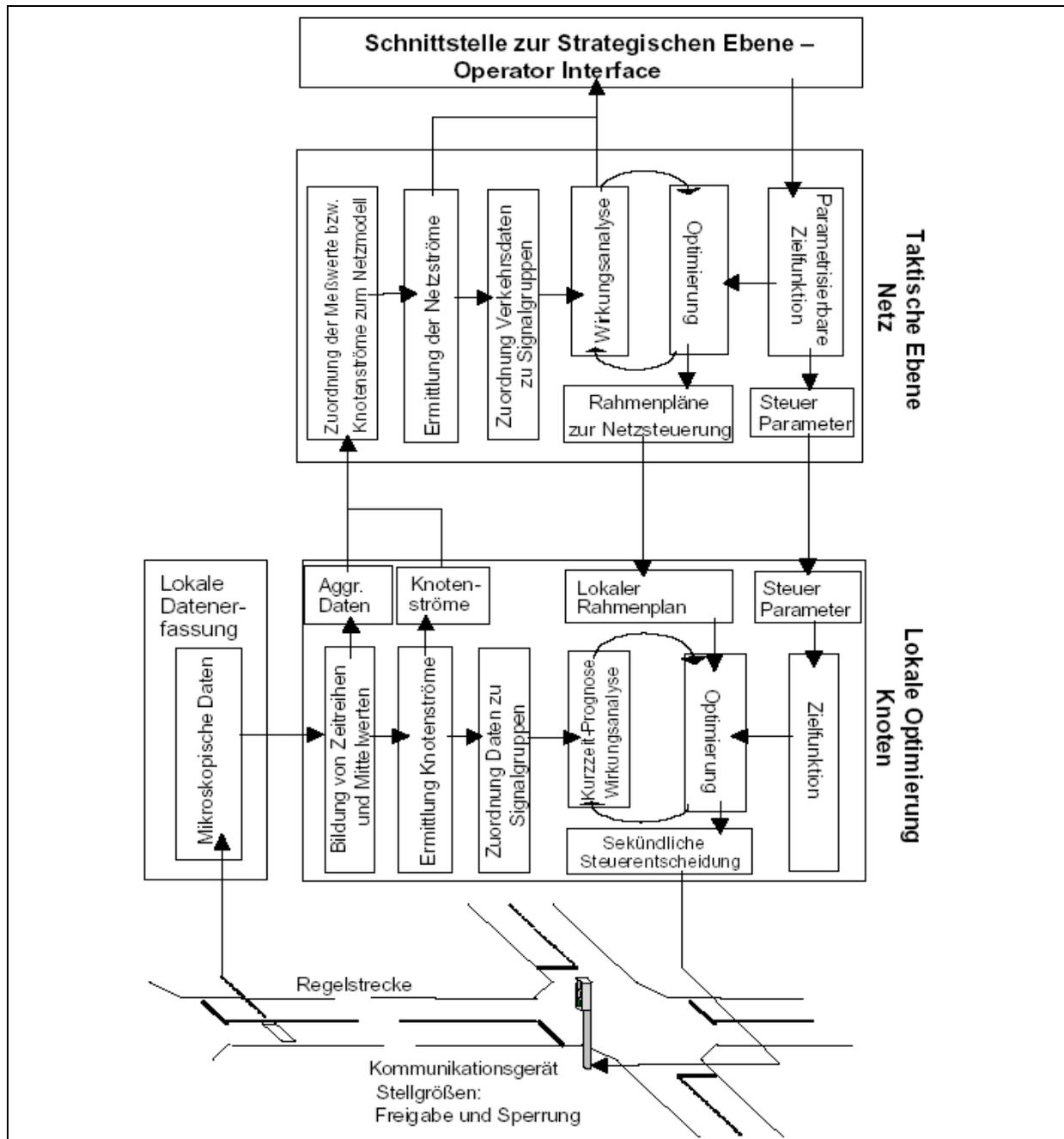


Abbildung 23: Übersicht zu den im adaptiven Verfahren benötigten Bausteinen und zu deren Verknüpfung [Friedrich 1999].

4.2.2.1 Kenngrößenerfassung

Als Versorgungsparameter benötigt BALANCE einen fahstreifenfeinen Netzgraphen und eine Quell-/Zielmatrize für das Steuerungsgebiet, sowie Abbiegematrizen der einzelnen

Knotenpunkte, falls diese sich nicht eindeutig aus dem Netzgraphen und der Quell-/Zielmatrize ableiten lassen. Des Weiteren werden Detektoren und Signalgruppen benötigt. Die Versorgung dieser Parameter wird über NONSTOP (mikroskopische Verkehrsflusssimulation der Firma GEVAS software GmbH) vorgenommen. Für das Verkehrsnachfragemodell wird eine signalgruppenfeine Gewichtungsmatrix versorgt. Sie wird in der Regel aus historischen Erhebungen ermittelt. Für die Optimierung wird eine Wichtung der einbezogenen verkehrlichen Kenngrößen für jede Signalgruppe vorgenommen. Für die Signalprogrammanpassung müssen Randbedingungen festgelegt werden. Diese sind in der Regel von der lokalen Steuerung abhängig.

Online werden von BALANCE aggregierte Minutenintervalle der Verkehrsstärke über 15 Minuten benötigt. Die Daten werden über den Verkehrsrechner bezogen. Die explizite Lage der Detektoren im Bezug auf die Haltelinien ist für BALANCE nicht relevant. Es bietet sich aber für die Bestimmung der Quell-/Zielmatrize an das zumindest alle Zu- und Abflüsse aus dem Netz erfasst werden.

4.2.2.2 Verkehrsnachfragemodell

Für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage wird ein makroskopisches Verkehrsmodell verwendet. Dazu wird für jede Optimierung die versorgte Quell-/Zielmatrize anhand der Gewichtungsmatrix und der aktuellen Messdaten der Zu- und Abflüsse des zu steuernden Netzes mittels der endogenen Entropiemaximierung nach van Zuylen [1979] und Willumsen [1981] angepasst.

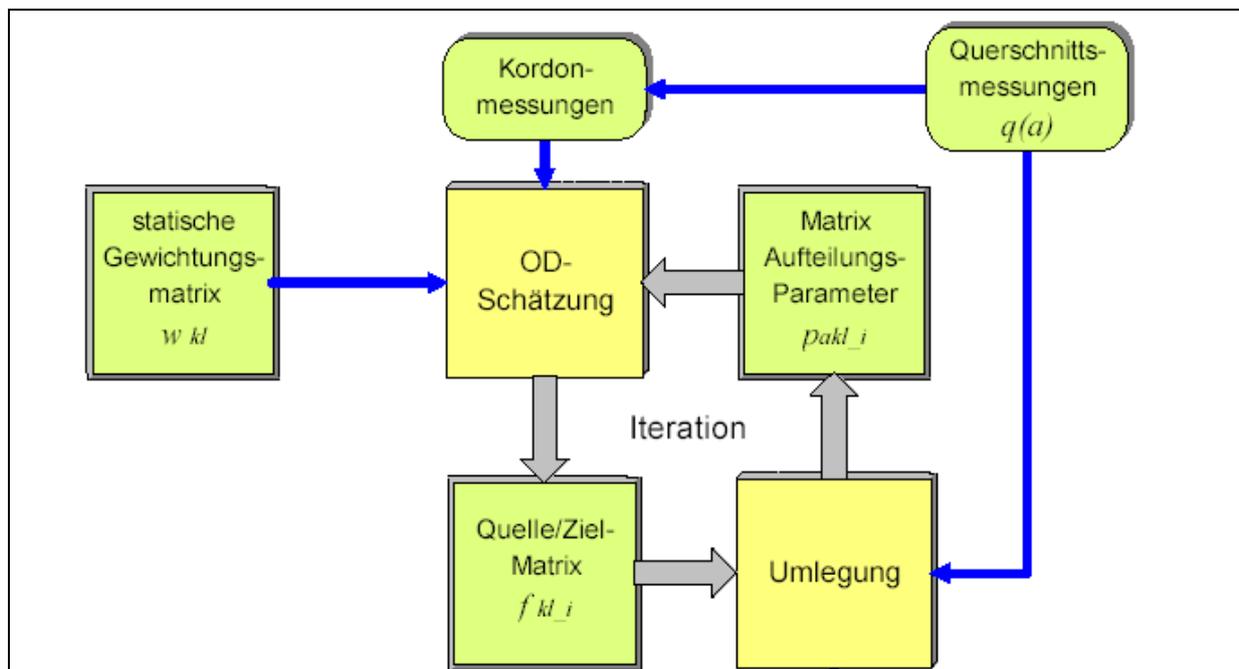


Abbildung 24: BALANCE Verkehrsmodell [Friedrich 1999].

Die Quelle-/Zielbeziehungsmatrix ist Voraussetzung für die sukzessive Verkehrsumlegung. In die Umlegung fließen zusätzlich noch Querschnittszählungen im Netz ein. Ergebnis der Umlegung sind Verkehrsströme der einzelnen Kanten im zu steuernden Netz. Außerdem können Aufteilungsparameter der Quell-/Zielbeziehungen über die einzelnen Kanten errechnet werden. Zwischen den geschätzten und gemessenen Verkehrsströmen liegen in der Regel Abweichungen vor, weshalb dieser Schritt mit den neu berechneten Aufteilungsparametern iterativ wiederholt wird.

4.2.2.3 Signalprogrammanpassung

BALANCE verschickt alle 5 Minuten Rahmensignalpläne in Form von so genannten 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. Die T-Zeit-Grenzen sind die Rahmenbedingungen der lokalen Knotenpunktsteuerungen. Über diese Rahmenbedingungen werden die Versatzeiten, die Freigabezeitverteilungen und die Phasenfolge beeinflusst. Die T-Zeit-Grenzen haben eine Gültigkeit von 15 Minuten oder bis neue T-Zeit-Grenzen empfangen werden.

Optional kann von BALANCE auch eine optimale Umlaufzeit berechnet werden. Die entsprechenden Umlaufzeiten müssen allerdings auch auf lokaler Ebene versorgt sein. Freigabezeitanpassungen und eine Priorisierung des ÖPNV werden nicht auf Netzebene gesteuert.

4.2.2.4 Verkehrsflussmodell und Verkehrswirkungsmodell

BALANCE verwendet ein mesoskopisches Verkehrsflussmodell. In das Modell gehen neben den Quellzielbeziehungen und den kantenbezogenen Verkehrsströmen aus dem Verkehrsnachfragemodell die Informationen der zu untersuchenden LSA-Schaltungen, wie Umlaufzeit und den Zustand der einzelnen Signalgeber ein. Aus der Netzversorgung werden des Weiteren Aufstellflächen, Progressionsgeschwindigkeiten, Kapazitäten der Streckenkanten und Zeitbedarfswerte für die Signalgruppen herangezogen. Daraus werden deterministisch sekundenfein für jede Signalgruppe zyklische Verkehrsflussprofile berechnet.

Stochastische Schwankungen und Überlastungen aus den Verkehrsflussprofilen werden mit Hilfe des makroskopischen Warteschlangenmodells nach Kimber-Hollis [1979] abgebildet.

Im Verkehrswirkungsmodell werden so die Wartezeit, die Anzahl der Halte, die Warteschlangenlänge, sowie die maximale Warteschlangenlänge berechnet.

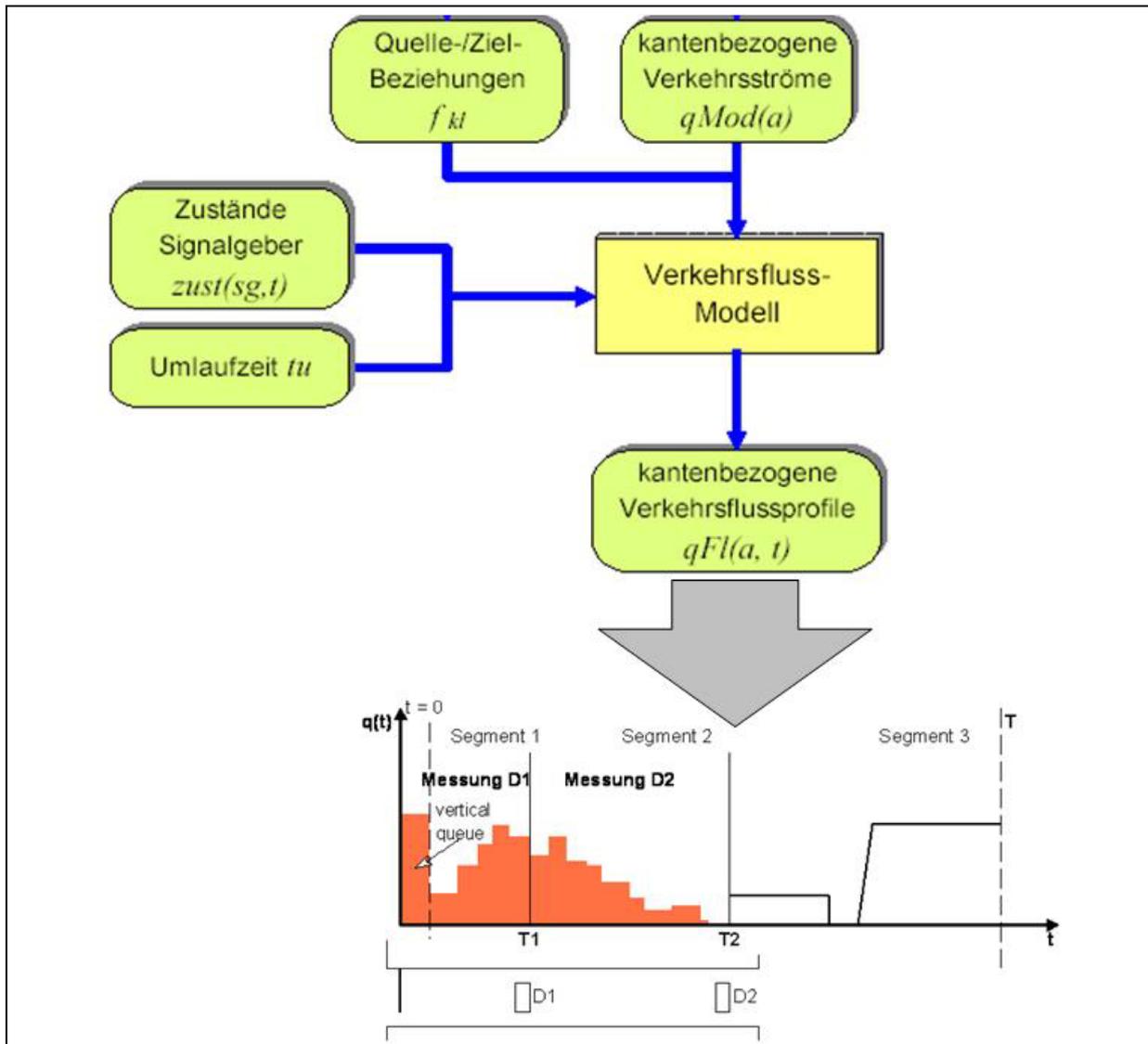


Abbildung 25: BALANCE Verkehrsflussmodell [Friedrich 1999], [Mertz 2001].

4.2.2.5 Steuerungsmodell (Optimierung)

Die Optimierung erfolgt über eine Zielfunktion. In diese gehen die aus dem Wirkungsmodell berechneten Kenngrößen Wartezeit, Anzahl der Halte, Warteschlangenlänge und maximale Warteschlangenlänge des jeweiligen Steuerungsvorschlags ein. Es erfolgt dabei eine Gewichtung nach Signalgruppen. Diese kann vom Nutzer parametrisiert werden.

Als Optimierungsverfahren stehen entweder ein Gradientenverfahren oder ein evolutionären Algorithmus [Braun und Kemper 2008] zur Verfügung. Die Parameter werden dabei beim Gradientenverfahren sequentiell optimiert. Ebenso wird mit dem Netzverfahren, der Anfangsknotenpunkt kann dabei vorgegeben werden. Beim evolutionären Algorithmus werden sowohl die Parameter als auch das Netz parallel optimiert.

4.2.3 Systemtechnik

Das Steuerungsverfahren BALANCE und seine Middleware (Kommunikationskomponente, Datenbank etc.) laufen auf Windows.

Auf lokaler Ebene können Steuergeräte verwendet werden, die den TRENDS-Kern unterstützen (Bergauer, Dambach, Signalbauhuber, STM, Stoye).

BALANCE kann mit der modelbasierten Knotenpunktsteuerung EPICS kombiniert werden. Des Weiteren kann BALANCE mit OpenTrelan/Trends, einer logikbasierten Steuerung kombiniert werden. Zur Programmierung der Logik wird dabei die Sprache OpenTrelan verwendet.

In Verbindung mit SIGNOS unterstützt BALANCE die aktuelle OCIT-Schnittstelle. SIGNOS stellt die sogenannte OTS-Control-Schnittstelle bereit, also die standardisierte Schnittstelle zwischen dem Betriebssystem eines LSA-Steuergerätes und hersteller-unabhängigen Steuerungsverfahren wie VS-PLUS und TRENDS.

Übergeordnete Vorgaben können beispielsweise durch eine Signalprogrammvorgabe umgesetzt werden. Diese werden dann durch BALANCE optimiert. Ebenfalls kann „on-the-fly“ zwischen den Optimierungsverfahren (Gradientenverfahren und evolutionäres Verfahren) gewechselt werden. Beim evolutionären Algorithmus können außerdem „on-the-fly“ die Parametersätze geändert werden. [Kemper 2008]

4.2.4 Anwendungsfälle und Wirkungen

BALANCE wird derzeit in 4 Städten angewendet. Die Demonstratoren aus den Projekten TABASCO und Munich COMFORT und MANAH in München sind nicht mehr in Betrieb.

4.2.4.1 Ingolstadt

Das Netz beinhaltet 46 Anlagen, die in 3 Steuerungsgebiete aufgeteilt sind. Eine Besonderheit stellt die stark schwankende Verkehrsnachfrage innerhalb eines kurzen Zeitraums auf Grund der Schichtwechselzeiten der Audi AG dar. Die Netzsteuerung durch BALANCE im Ingolstädter Netz wurde im Rahmen des Forschungsprojektes TRAVOLUTION umgesetzt. Im Betrieb ist die Steuerung seit September 2007. Die Inbetriebnahme erfolgte in 3 Stufen entsprechend der 3 Steuerungsgebiete, im letzten Steuerungsgebiet wurde Balance mit einem Gradientenverfahren (Hill-Climbing Algorithmus) als Optimierungsmethode Anfang März 2008 in Betrieb genommen. Im April 2008 wurden alle 3 Gebiete auf Balance mit dem im Forschungsprojekt neu entwickelten Evolutionären Algorithmus GALOP als Optimierungsmethode umgestellt.

Im Rahmen des Projekts wurde ein Feldversuch mit Befahrungen (Floating Car Data, FCD) und Fahrzeugwiedererkennung (FWE) durchgeführt, bei dem drei Steuerungsvarianten miteinander verglichen wurden:

- Lokale verkehrsabhängige Steuerung (Basis)
- Lokale verkehrsabhängige Steuerung optimiert durch BALANCE mit Hill-Climbing Algorithmus
- Lokale verkehrsabhängige Steuerung optimiert durch BALANCE mit GALOP

BALANCE mit Hill-Climbing Optimierung war um 12% besser als die Basis-Steuerung. Durch BALANCE mit GALOP haben sich die Wartezeiten um weitere 10% verringert. Die Verlustzeiten an den Lichtsignalanlagen konnten in der Nachmittagsspitze zwischen 15 Uhr und 19 Uhr um 32% gegenüber dem Basis-Szenario reduziert werden. Die Anzahl der Halte hat sich über den Tag um 17% verringert. [Braun et al. 2009]

4.2.4.2 Weitere Anwendungsfälle

Weitere bekannte Anwendungsfälle sind Remscheid (10 Anlagen, Inbetriebnahme 2003, weitere 20 Anlagen sollen folgen) und Hamm (15 Anlagen, Inbetriebnahme 2003). Die Umsetzung in Hamburg wird in Kapitel 9 beschrieben.

4.3 Modellbasiertes Steuerungsverfahren Motion

4.3.1 Grundlagen

Die Entwicklung von MOTION wurde 1986 durch die Grundsatzstudie „Projektstudie zur Entwicklung eines verkehrsabhängigen Steuerungsverfahrens MOTION“ [Bielefeldt, Keller, Philipps, Ploss 1986] im Auftrag der Siemens AG begonnen. „Dieses Grundkonzept sowie ein wesentlicher Teilaspekt des Verkehrsmodells, die dynamische Schätzung der Verkehrsbeziehungen in Netzen, wurde im Rahmen des DRIVE-Projektes ODIN (V1047) [DRIVE 1991] weiter verfolgt. Erkenntnisse für die automatische Störfallerkennung wurden aus dem DRIVE-Projekt MONICA (V1056) übernommen.“ [Busch, Kruse 1993]

Die Wesentlichen Entwicklungsarbeiten von MOTION wurde in einer Arbeitsgemeinschaft der Siemens AG, der Heusch / Boesefeldt GmbH, MVA Consultancy und dem Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der TU München im Rahmen des ATT Projektes HERMES (V2019) [DRIVE 1991] durchgeführt. Eine erste Erprobung des Verfahrens wurde in Köln-Deutz mit Unterstützung der Stadt Köln im Rahmen des ATT-Projektes SCOPE/VIKTORIA [DRIVE 1991].

MOTION wird von der Firma Siemens AG vertrieben.

4.3.2 Systemfunktionen

Die aktuelle Version SITRAFFIC Motion MX V4.0 (kurz MOTION) beinhaltet die zentrale Steuerung zur Optimierung von Signalprogrammen bzw. deren Auswahl. Auf lokaler Ebene wird eine logikbasierte Knotenpunktsteuerung eingesetzt. Im Rahmen des Planungstools SITRAFFIC Office kann Motion auch zur offline Optimierung von Strecken und Netzen verwendet werden.

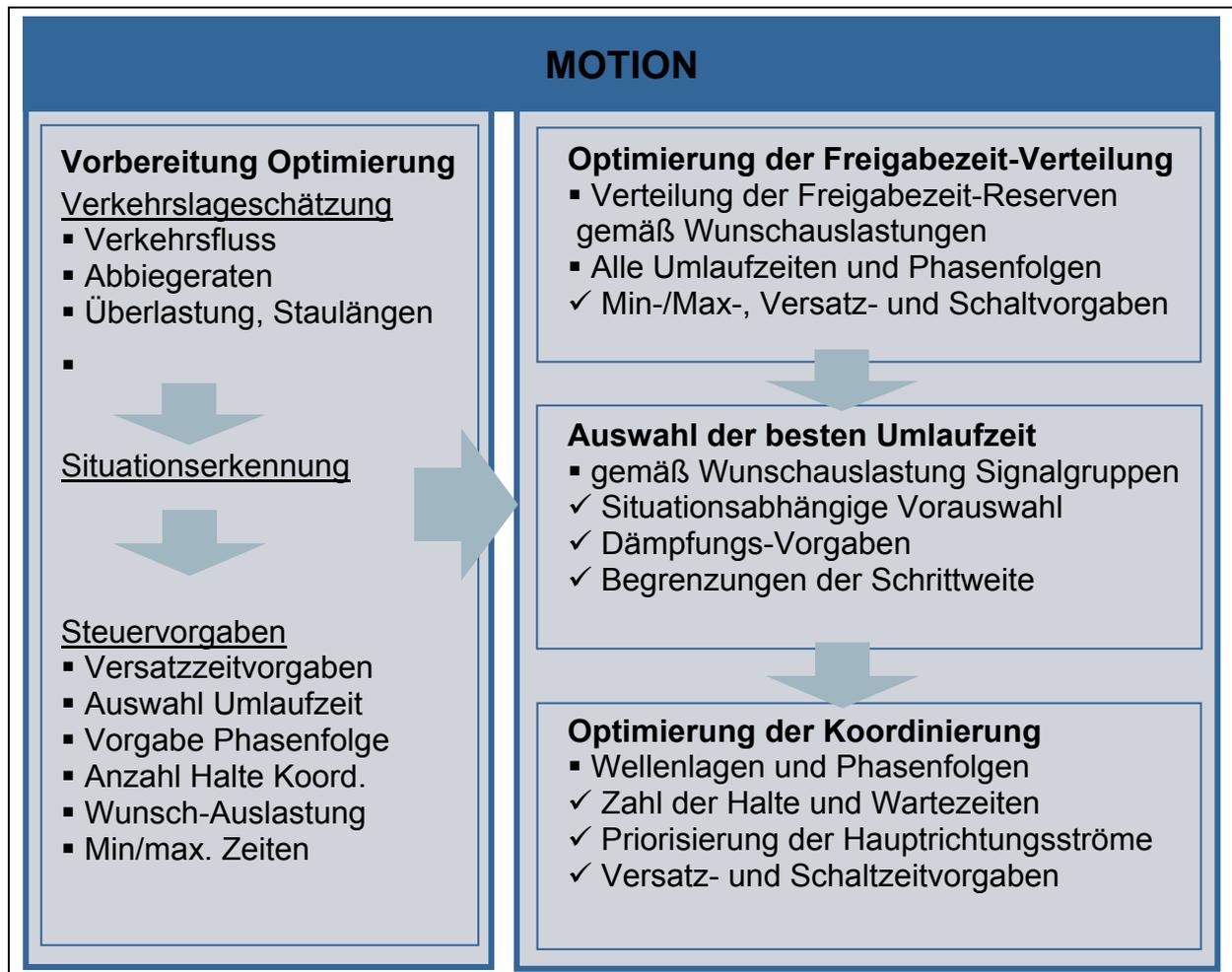


Abbildung 26: Interne Module und Kenngrößen von MOTION [Mück 2008].

4.3.2.1 Kenngrößenerfassung

Die LSA-Grundversorgung und die Versorgung der Ergänzungen für die Steuerung mit MOTION erfolgt über SITRAFFIC Office. Ebenso wird die Versorgung des Netzes, bis hin zu den Fahrstreifen, dem feinsten Element der Topologie, mit der Referenzierung der Detektoren und der Signalgruppen über SITRAFFIC Office vorgenommen. Des Weiteren werden MOTION-spezifische Parameter für die Optimierung versorgt.

Als online Daten benötigt MOTION aggregierte Zählungen und Belegungen der Messstellen. Für die Staulängenschätzung werden auch Rohdaten der Detektion und der Signalisierung verwendet. MOTION bevorzugt (besonders zur Staulängenschätzung) Bemessungsschleifen (30-40 Meter vor der Haltelinie). Benötigt werden Detektoren an den Zuflüssen des Steuerungsnetzes, günstig sind aber auch Detektoren im Streckenverlauf. Auf den Haupttrouten des Netzes sollten auch an den Abflüssen Detektoren vorhanden sein.

4.3.2.2 Verkehrsnachfragemodell

Die Basis für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage ist die Schätzung von Abbiegeraten. Es wird hier eine Quell-/Zielmatrize nicht für das gesamte Netz, sondern an möglichst kleinen und somit möglichst unkomplizierten Teilnetzen ermittelt. Die Größe dieser Teilnetze kann dabei auch nur einen Teilknotenpunkt umfassen [Mück 2008].

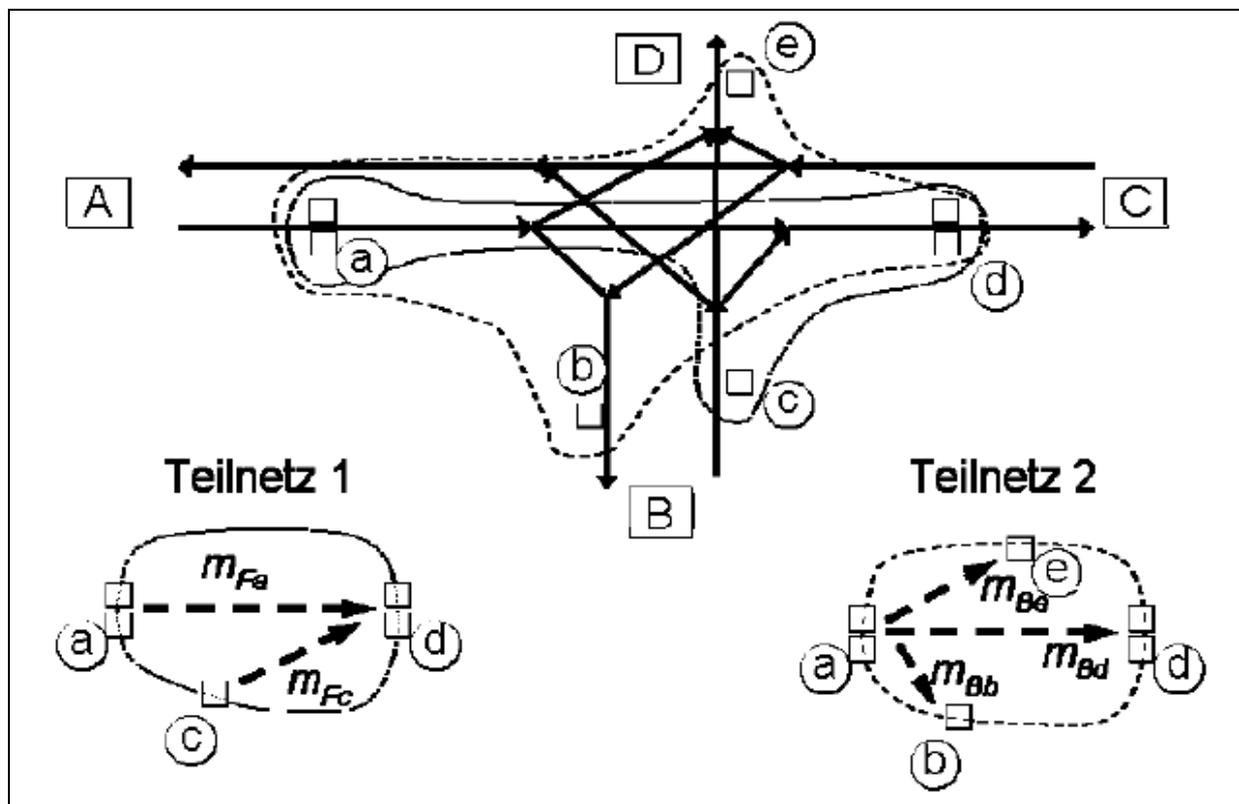


Abbildung 27: Teilnetze als Grundlage der Abbiegeschätzung [Mück 2008].

Wenn die Abbiegeraten bekannt sind, werden ausgehend von den gemessenen Teilstrecken die Verkehrsstärken auf allen Teilstrecken ohne Messstellen vorwärts- bzw. rückwärts propagiert.

Ein weiteres Modul der Verkehrsnachfrage stellt die Schätzung der Rückstaulängen da und eine damit verbundene Erkennung von Überlastungen. [Mück 2002]

4.3.2.3 Signalprogrammanpassung

Eine Optimierung unterteilt sich bei MOTION in drei Stufen. In der ersten Stufe werden für alle erlaubten Umlaufzeiten und Phasenfolgen die günstigsten Freigabezeiten ermittelt. In der zweiten Stufe wird die System-Umlaufzeit für das Regelgebiet bestimmt. Im dritten Schritt werden die Versatzzeit zwischen den einzelnen Knotenpunkten und die Phasenfolge am Knotenpunkt im gesamten Steuerungsgebiet optimiert.

Die Steuerungsgrößen Umlaufzeit, Versatzzeit, Phasenfolge und Freigabezeitverteilung werden als Rahmensignalpläne alle 5-15 Minuten (konfigurierbar) an die Lichtsignalanlagen im Steuerungsgebiet versendet.

Freigabezeitanpassungen und eine Priorisierung des ÖPNV werden auf lokaler Ebene durch die dortigen Logiken umgesetzt.

4.3.2.4 Verkehrsflussmodell und Verkehrswirkungsmodell

Motion verwendet ein mesoskopisches Verkehrsflussmodell. In das Modell gehen neben den Zu- und Abflüssen q_j^{zu} und q_j^{ab} am Netzrand, die Abflusskapazität c_j (aus Sättigungsverkehrsstärke und Signalzustand) und die Länge des vertikalen Staus in Anlehnung an Mertz [2001] b_j ein. Des Weiteren gehen die aus der Progressionsgeschwindigkeit berechnete Fahrzeit Δt_j und die Abbiegeraten $r_{j,i}$ zur Berechnung der Zuflüsse der nachfolgenden Links. Das Verkehrsmodell liefert signalgruppenfein Wartezeit und Anzahl der Halte.

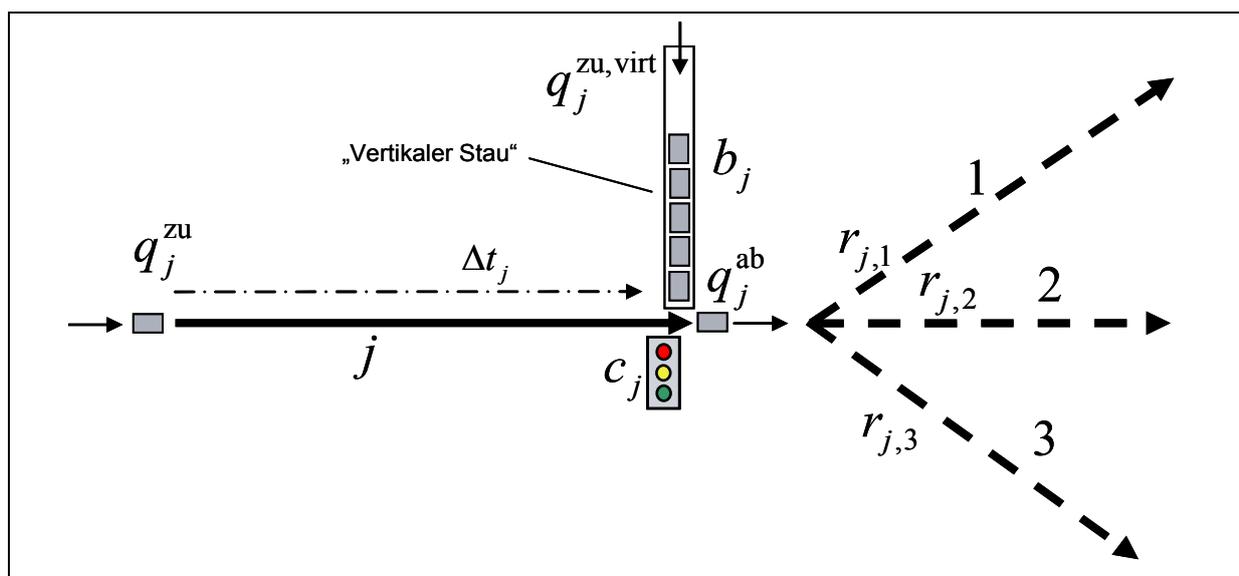


Abbildung 28: Linkmodell [Mück 2008].

4.3.2.5 Steuerungsmodell (Optimierung)

Die Optimierung der Freigabezeiten erfolgt parallel für jeden Knotenpunkt getrennt und unter Berücksichtigung folgender Randbedingungen (absteigende Priorität):

- Einhalten der Phasenmindestdauern
- Einhalten der Min- und Max-Bedingungen (gleichberechtigt)
- Einhalten von Schalt- und Versatz-Bedingungen
- Optimierung der Auslastungsgrade und Wartezeiten (Querrichtungen haben in der Regel höhere Auslastungsgrade als die Hauptrichtungen)

Es wird dabei versucht das Verhältnis der Auslastung zur gewünschten Auslastung möglichst für alle Signalgruppen gleich groß zu halten.

Für die Auswahl der Umlaufzeit wird für jede Umlaufzeit und Phasenfolge jeweils nur die Signalgruppe, deren Zielfunktionswert den höchsten Wert aufweist herangezogen.

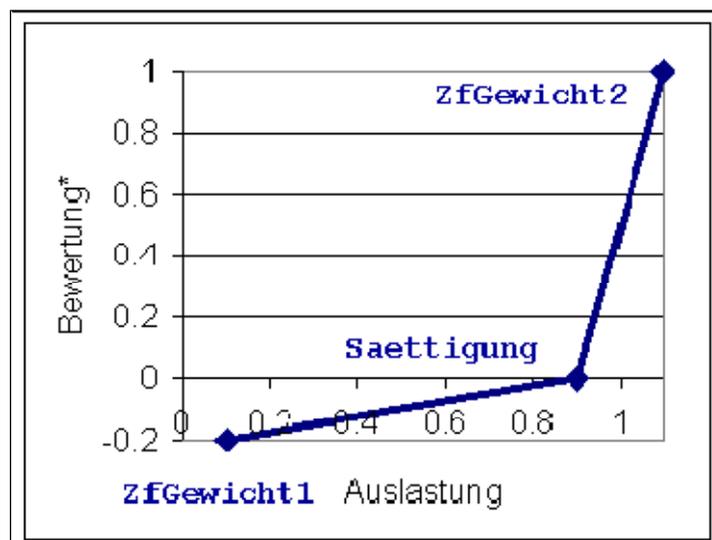


Abbildung 29: Benutzer-Parametrierung der Zielfunktion "KFZ" (Beispiel: Soll-Sättigung = 90%) [Siemens 2008].

Dies erfolgt wiederum in mehreren Schritten:

- Für jede LSA und Umlaufzeit wird die Phasenfolge ausgewählt, deren kritische Signalgruppe (also höchster ZF-Wert) betragsmäßig den niedrigsten Zielfunktionswert aufweist.
- Durch den ersten Schritt liegen für jede Umlaufzeit und LSA die günstigste Phasenfolge und die zugehörige Signalgruppe mit dem höchsten Zielfunktionswert vor. Aus diesen Signalgruppen wird die mit dem höchsten Zielfunktionswert gewählt, diese ist die für die Umlaufzeit kritische Signalgruppe des Bereichs, die zugehörige LSA ist die kritische LSA.

Falls die neue Umlaufzeit nicht der zuletzt geschalteten entspricht, wird anschließend geprüft, ob die aktuelle verkehrliche Situation einen Wechsel in die neue Umlaufzeit rechtfertigt, oder ob die bisherige Umlaufzeit beibehalten werden kann.

Für die Optimierung der Versatzzeiten und der Phasenfolge erfolgt modellbasiert. In der aktuellen Version von MOTION stehen dazu zwei Verfahren zur Verfügung:

- Gleichzeitige Optimierung aller LSA mit Hilfe Genetischer Algorithmen auf Basis eines allgemeinen, mesoskopischen Verkehrsfluss-Modells.
- Optimierung der LSA mit einem deterministischen Optimierungsverfahren auf Basis eines pulkorientierten Verkehrsfluss-Modells. (bisher noch nicht veröffentlicht)

Optimiert wird über eine Gewichtung von Wartezeit und Halten.

Der genetische Algorithmus soll dabei für komplexe, vermaschte Netze angewendet werden, das deterministische Verfahren zur Optimierung von Linienzügen.

4.3.3 Systemtechnik

Das Steuerungsverfahren MOTION läuft auf den Verkehrsrechnersystemen SITRAFFIC Central 2.x und 3.x, sowie auf dem Verkehrsrechnersystem SITRAFFIC SCALA (Ab Version 1.2).

Für eine Signalprogrammauswahl können auf lokaler Ebene alle Steuerungsgeräte verwendet werden. Um alle Features von MOTION zu verwenden können die Steuergeräte C800/C900 (Siemens) oder Actros (Signalbau Huber) verwendet werden.

Kombiniert werden kann MOTION mit jedem Verfahren das MOTION Rahmensignalpläne verwenden kann. Dies sind PDM (Phasensteuerung mit dezentraler Anpassung) und S-L (SITRAFFIC Language) zur Programmierung von lokalen Knotenpunktsteuerungen.

Die aktuelle OCIT-Schnittstelle wird unterstützt.

Übergeordnete Vorgaben können durch Änderungen der entsprechenden Parametersätze umgesetzt werden. Dies sind beispielsweise Vorgaben für erlaubte Umlaufzeiten, Min-/ Max-Grenzen für Grünzeiten, Zeitbedarfswerte, Progressionsgeschwindigkeiten, Gewichte Halte / Warte für Koordinierung. [Mück 2008-2]

4.3.4 Anwendungsfälle und Wirkungen

MOTION ist im Moment in 17 Städten in Betrieb bzw. im Aufbau. Der Demonstrator in Köln-Deutz ist nicht mehr in Betrieb. Die Umsetzung in Bremerhaven wird in Kapitel 8 beschrieben.

Stadt	Zahl LSA	Bemerkungen
Piraeus (Griechenland)	22	1998-2003
Kopenhagen (Dänemark)	36	2000 / 2002 / 2006
Odense (Dänemark)	31	2001ff
Graz (Österreich)	75	2002ff
Stuttgart (Deutschland)	30	2002, z.Zt. wg. Migration außer Betrieb
Mannheim (Deutschland)	8	2004 / 2006
Bremen (Deutschland)	9	2004
Braunschweig (Deutschland)	5	2005
Prag (Tschechische Republik)	21	2005
Magdeburg (Deutschland)	14	2005
Münster (Deutschland)	24	2007
Bremerhaven (Deutschland)	9	In Bearbeitung
Heidelberg	3	2008
Abu Dabi (UAE)	31	2006/2007
Vilnius (Litauen)	ca. 140	In Bearbeitung
Krakau (Polen)	ca. 70	In Bearbeitung
Warschau (Polen)	ca. 70	In Bearbeitung

Abbildung 30: MOTION Anwendungsfelder [Mück 2008-2].

4.3.4.1 Piräus

„Im von der EU geförderten Forschungsprojekt COSMOS (Congestion Management Strategies und Methodes in Urban Sites) wurde das MOTION System mit neuen Algorithmen zur Stau und Störfallerkennung und –Management erweitert sowie das Lichtsignalsteuerungssystem mit einem Wechselwegweisungssystem (VMS System) verknüpft, um die Autofahrer über die Verkehrssituation in Piräus zu informieren.

Ergebnis der Untersuchung war, dass die Fahrzeiten innerhalb des Regelgebietes um durchschnittlich 8 bis 14 Prozent verkürzt werden konnten. Bei der Anzahl der ermittelten Staus ergab sich eine Reduktion von 20 bis 30 Prozent“ [Busch 2002]

In einer Wirksamkeitsuntersuchung in Piräus konnte, allerdings nicht differenziert nach Luftschadstoffen, ein Rückgang der Emissionen in der Größenordnung 10 % bis 17 % ermittelt werden [Siemens, 2005].

4.3.4.2 Kopenhagen

In Kopenhagen wurden 9 Lichtsignalanlagen mit einer MOTION Steuerung versorgt. Ziel war eine Verbesserung der Fahrzeiten des ÖPNV um 20% bei gleicher Leistungsfähigkeit des Individualverkehrs.

„Mit Hilfe von Handstoppuhren wurden folgende durchschnittliche Reduzierungen der Fahrzeiten der Busse im Verhältnis zur Vorher-Situation mit Festzeitprogrammen gemessen:

- MOTION mit lokaler Buspriorität:
16,7% (morgens) und 26,8% (nachmittags)
- MOTION mit zentraler Buspriorität:
8,9% (morgens) und 10,3% (nachmittags)
- MOTION Standard:
12,6% (morgens) und 18,6% (nachmittags)“ [Busch 2002]

4.3.4.3 Münster

In Münster läuft die aktuelle Version MOTION MX V4.0. Es werden hier 24 Knotenpunkte auf einem Streckenzug von 6 Kilometern gesteuert. Es wurden 3 Steuerungen ausgewertet:

- Grundzustand der Steuerung verkehrsabhängige und Festzeitsteuerung (Vorher)
- Konventionell Verkehrsabhängig mit neuer Optimierung (Nachher I)
- Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren MOTION (Nachher II)

Für die überplante Steuerung ergab sich eine Verbesserung gegenüber Vorhersituation von 0 bis 7 Prozent stadteinwärts und zwischen 10 und 30 Prozent stadtauswärts bei den Wartezeiten. Die Anzahl der Halte verschlechtert sich um 35 Prozent gegenüber der Vorhersituation stadteinwärts. Stadtauswärts verbessert sich die Anzahl der Halte zwischen 7 und 31 Prozent.

Für die Steuerung mit MOTION wurden Verbesserungen zwischen 34 und 38 Prozent stadteinwärts und 34 bis 45 Prozent stadtauswärts bei den Wartezeiten gegenüber der Vorhersituation gemessen. Bei der Anzahl der Halte zeigten sich Verbesserungen von 6 bis 12 Prozent stadteinwärts und 19 bis 49 Prozent stadtauswärts gegenüber der Vorhersituation. [Brilon 2009] [Mück 2009]

4.4 Modellbasiertes Steuerungsverfahren SCOOT

4.4.1 Grundlagen

Die Entwicklung von SCOOT (**S**plit **C**ycle **O**ffset **O**ptimisation **T**echnique) [Hunt et al. 1981] wurde 1973 vom Transport Research Laboratory (TRL) begonnen. SCOOT basiert im Wesentlichen auf dem offline Optimierungsmodell TRANSYT [Robertson 1969].

Die aktuelle SCOOT Version ist SCOOT MC3 (Managing Congestion, Communications and Control).

SCOOT wird von Siemens Traffic Control, Peek Traffic Ltd und TRL Limited vertrieben.

4.4.2 Systemfunktionen

SCOOT ist ein zentrales Steuerungsverfahren. Alle Detektordaten werden an den Zentralrechner weitergeleitet. Dort wird für jede Anlage ein Signalplan gebildet. Das lokale Steuerungsgerät setzt diesen nur um, modifiziert ihn aber nicht.

Für SCOOT stehen zusätzliche Module für Datenbankauswertungen (ASTRID - **A**utomatic **S**COOT **T**raffic **I**nformation **D**atabase) und zur Störfallerkennung (INGRID - **I**ntegrated **I**ncident **D**etection) zur Verfügung.

4.4.2.1 Kenngrößenerfassung

SCOOT benötigt Detektoren die nicht direkt an der Haltelinie platziert sind. Daher werden Detektoren an den Knotenpunktsausfahrten und auf den einzelnen Kanten 50 bis 300 Meter vor der Haltelinie genutzt. [Prüfling 2004]

Für jede Zufahrt jedes in die Optimierung involvierten Knotenpunktes wird mindestens ein Detektor benötigt.

Ferner müssen Netz, Progressionsgeschwindigkeiten und Sättigungsverkehrsstärken versorgt werden.

4.4.2.2 Verkehrsnachfragemodell

SCOOT besitzt kein netzweites Verkehrsnachfragemodell. Die Verkehrsdaten werden für jede Knotenpunktzufahrt einzeln erfasst und im Verkehrsfluss- und Verkehrswirkungsmodell verarbeitet.

4.4.2.3 Signalprogrammanpassung

SCOOT optimiert Freigabezeitverteilung, Versatzzeit und Umlaufzeit:

- „Wenige Sekunden vor dem Ende jeder Freigabezeit wird untersucht, ob durch ihre Verlängerung oder durch ihren Abbruch die größte am Knoten auftretende Auslastung einer Zufahrt verringert werden kann. Falls dies der Fall ist, wird die laufende Phase um vier Sekunden gekürzt oder verlängert. Für den nächsten Umlauf wird von der aktuellen Veränderung nur eine Sekunde beibehalten.
- Die optimale Versatzzeit wird je Knotenpunkt einmal pro Umlauf unter Verwendung des aus den 'cyclic flow profiles' abgeleiteten Güteindex ermittelt und gegebenenfalls um wenige Sekunden gegenüber ihrer Ausgangslage verändert. Im Fall einer Überlastung einer Zufahrt mit kurzem Stauraum wird abweichend von der Zielfunktion dieser der Vorrang eingeräumt.

- Die günstigste Umlaufzeit wird im Rahmen der vorgegebenen oberen und unteren Grenzwerte maximal im Abstand von 2,5 Minuten unter der Vorgabe ermittelt, dass der am höchsten belastete Knotenpunkt im Netz genau zu 90% ausgelastet sein sollte. In Schritten von vier bis zu 16 Sekunden (bei großen Umlaufzeiten) wird gegebenenfalls die Umlaufzeit dann dem berechneten Optimalwert angepasst.“ [Friedrich 2002]

Eine Priorisierung des ÖPNV wird durch einen Wechsel in die entsprechende Phase oder eine Freigabezeitverlängerung verwirklicht. „Die eigentliche Optimierung wird beim Eintreffen von bevorrechtigten ÖV-Fahrzeugen unterbrochen und auf eine schnelle heuristische Strategie zur Abwicklung der ÖV-Anforderung umgeschaltet, die mit adaptiver Steuerung nichts mehr zu tun hat.“ [Mertz 2001]

SCOOT schickt die Signalprogrammanpassungen als Schaltbefehle an die lokalen Steuergeräte.

4.4.2.4 Verkehrsflussmodell und Verkehrswirkungsmodell

SCOOT misst den Abfluss des stromaufwärts liegenden Knotenpunktes und bestimmt so den Zufluss der jeweiligen Knotenpunktzufahrt. Zusätzlich zu den ‘cyclic flow profiles’, den aktuell gemessenen Durchflussprofilen an den Knotenpunktsausfahrten werden zusätzlich Daten aus vorangegangenen Umläufen bei der Berechnung der Ankunftszeiten berücksichtigt.

Als Ergebnis liefert das Modell Wartezeiten, Anzahl der Halte, Staulängen und Auslastungsgrade für alle Knotenpunktzufahrten.

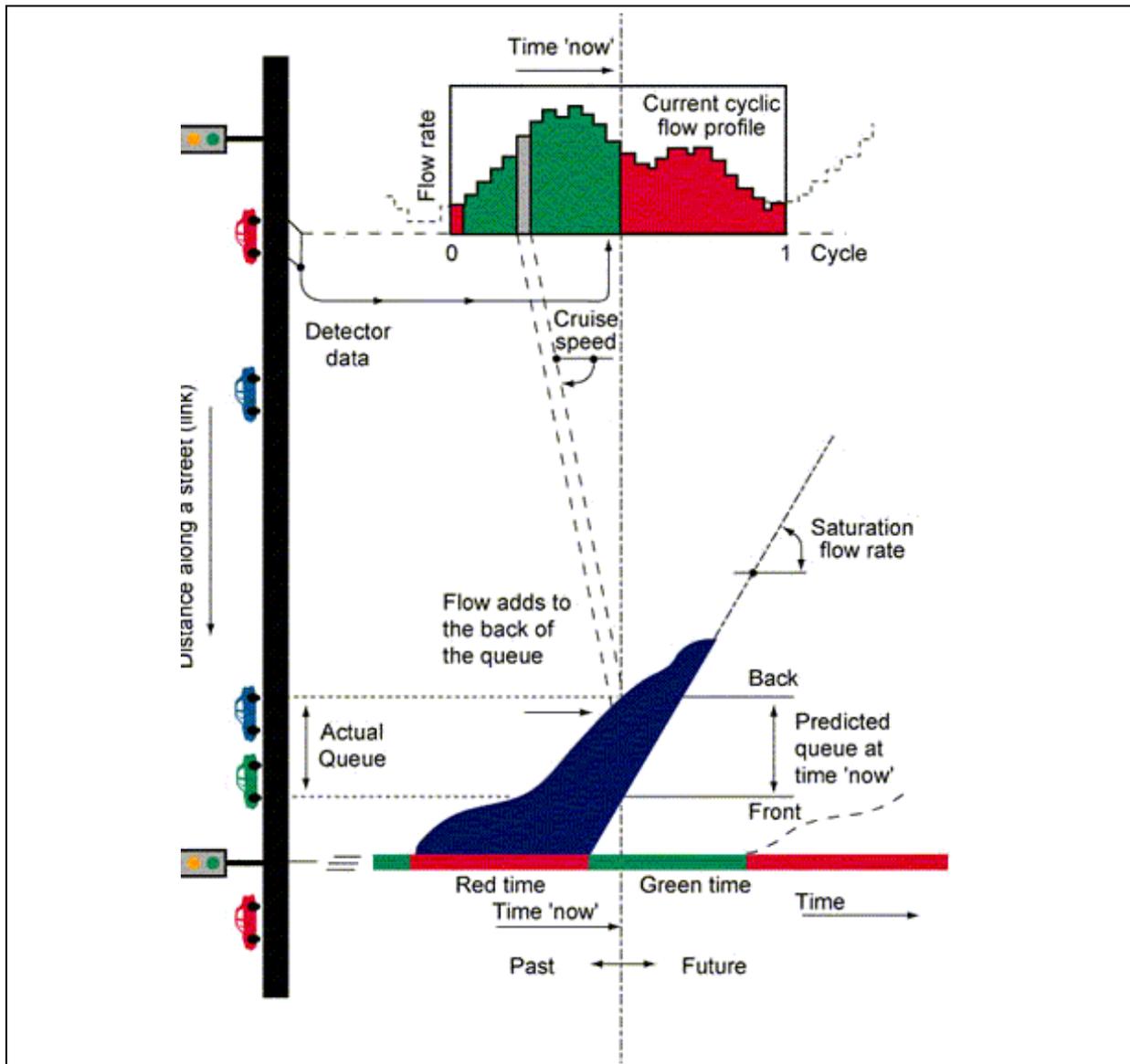


Abbildung 31: SCOOT Verkehrsmodell [SCOOT 2008].

4.4.2.5 Steuerungsmodell (Optimierung)

Die Optimierung der Freigabezeiten und der Umlaufzeit erfolgt im Wesentlichen auf Grund der Auslastungsgrade.

Die Optimierung der Versatzzeit wird wie auch in TRANSYT über eine Minimierung der Zielfunktion umgesetzt. In diese Zielfunktion fließen gewichtet Wartezeit und Anzahl der Halte ein. Als Optimierungsverfahren wird ein Hill-Climb-Algorithmus verwendet.

4.4.3 Systemtechnik

In der neusten Version von SCOOT ‚SCOOT MC3‘ (Managing Congestion, Communications and Control) werden die vom Verkehrsflussmodell berechneten Staulängen in ein Staumanagement integriert.

4.4.4 Anwendungsfälle und Wirkungen

Anwendungsgebiet von SCOOT ist im wesentlichen Großbritannien (ca. 200 Städte). Aber auch in Europa (Madrid, Zypern), Asien (Peking, Hong Kong, etc.), dem mittleren Osten (Dubai, Bahrain), Nord- (Toronto, San Diego, Minneapolis, etc.) und Südamerika (Sao Paulo, Santiago, etc.) gibt es Anwendungsfälle.

Die Wirkungen auf den Verkehr wurden für SCOOT in einigen Untersuchungen gemessen. Folgend einige Beispiele:

- In Southampton wurde durch SCOOT im Jahr 1985 Verbesserungen von bis zu 26% bei der Fahrzeit im IV erreicht. Für den ÖV konnten sogar Verbesserungen von bis zu 60,7% gegenüber der Vorher-Situation gemessen werden (Steuerung vorher unbekannt). [SCOOT, 2008]
- In London wurden im Jahr 1985 in der Gegend um Westminster Reduzierungen der Fahrzeiten um 19% und der Anzahl der Halte um 5% gegenüber der Vorher-Situation gemessen (Steuerung vorher unbekannt). [SCOOT, 2008]
- In Peking wurde durch SCOOT im Jahr 1989 eine Reduzierung der Fahrzeiten um bis zu 41% und eine Reduzierung der Halte um bis zu 33% gegenüber einer unkoordinierten Festzeitsteuerung erreicht. [SCOOT, 2008]
- In Toronto wurden im Jahr 1993 Verbesserungen der Fahrzeit von 8% und der Anzahl der Halte von 22% gegenüber der Vorher-Situation (Steuerung unbekannt) gemessen. [SCOOT, 2008]
- In Sao Paulo wurden im Jahr 1997 durchschnittliche Reduzierungen der Fahrzeiten von 20% (in der Morgenspitze 40%) auf der Rio Branco Avenue / Norma Gianotti Avenue durch SCOOT 2.4 und Fahrzeiterparnisse von 38% auf der Alvarenga St / Camargo St mit SCOOT 3.1. Die Steuerung wurde vorher durch TRANSYT koordiniert. [SCOOT, 2008]

4.5 Modellbasiertes Steuerungsverfahren UTOPIA/SPOT

4.5.1 Grundlagen

Die Netzsteuerung UTOPIA (**U**rban **T**raffic **O**ptimization by **I**ntegrated **A**utomation) wurde von FIAT Research Centre, ITAL TEL und MIZAR Automation entwickelt. Auf lokaler Ebene wird es in der Regel mit SPOT (**S**ystem for **P**riority and **O**ptimisation of **T**raffic) kombiniert.

Die erste Umsetzung wurde 1985 in Turin im Rahmen eines EU-Forschungsprojektes realisiert. Sie ist bis heute in Betrieb.

UTOPIA wird von MIZAR Automations (SWARCO) und Peek Traffic Solutions und ZIR vertrieben.

4.5.2 Systemfunktionen

UTOPIA nutzt eine hierarchisch-dezentralisierte Systemarchitektur für die LSA-Steuerung in Netzen. Zum Einsatz kommen zwei Steuerungsebenen. Auf der oberen (UTOPIA) werden die Steuerungsstrategien auf der Basis von Vorhersagen über die Verkehrssituation im Netz festgelegt, in deren Rahmen auf lokaler Ebene (SPOT) die Steuerung entsprechend dem aktuellen Verkehrsaufkommen optimiert wird.

4.5.2.1 Kenngrößenerfassung

UTOPIA benötigt Detektoren an allen Abflüssen der Knotenpunkte der Hauptrichtungen im Netz. Wenn Detektoren an den Zuflüssen oder auf der Strecke vorhanden sind können diese ebenfalls genutzt werden. [Peek 2008]

Versorgt werden muss außerdem, das Netz sowie Sättigungsverkehrsstärken und Progressionsgeschwindigkeiten.

4.5.2.2 Verkehrsnachfragemodell

Auf Netzebene schätzt UTOPIA eine Quelle-/Zielmatrize. Auf Grundlage dieser Eingangsgröße wird in einem makroskopischen Verkehrsmodell eine globale Wirkungsanalyse durchgeführt. [Friedrich 2002]

4.5.2.3 Signalprogrammanpassung

UTOPIA übergibt einen Referenzplan. „Der den lokalen Steuerungen die Anforderungen der Netzsteuerung durch Rahmenvorgaben vermittelt. Soweit dies aus den verfügbaren Veröffentlichungen zu ersehen ist, handelt es sich hierbei um vorgeschlagene Längen der Phasen- bzw. Signalgruppendauern.“ [Friedrich 2002]

UTOPIA sendet des Weiteren Gewichtungen für den Performance Index an die lokale Steuerung SPOT.

„Die zeitliche Auflösung beträgt 5 Minuten mit einem Prognose-Horizont von 15 Minuten“ [Mertz 2001]

Auf Knotenpunktebene wird von SPOT die endgültige Phasenlänge festgelegt.

4.5.2.4 Verkehrsflussmodell und Verkehrswirkungsmodell

Auf Netzebene verwendet UTOPIA ein makroskopisches Verkehrsflussmodell zur Abbildung des Verkehrs in 5 Minuten Intervallen.

Auf Knotenpunktebene verwendet SPOT Ankunftsprofile an den Zufahrten. Fahrzeugankünfte werden über einen gleitenden Zeithorizont von bis 120 Sekunden betrachtet der alle 3 Sekunden aktualisiert. Für die Prognose der Fahrzeugankünfte werden die Abflüsse der Nachbarknoten verwendet. Es wird ein konstanter Sättigungsverkehrsstärke und eine konstante mittlere Progressionsgeschwindigkeit der Fahrzeugpulks angenommen. ÖV-Fahrzeuge werden als eigene Fahrzeugpulks durch das Netz geschickt.

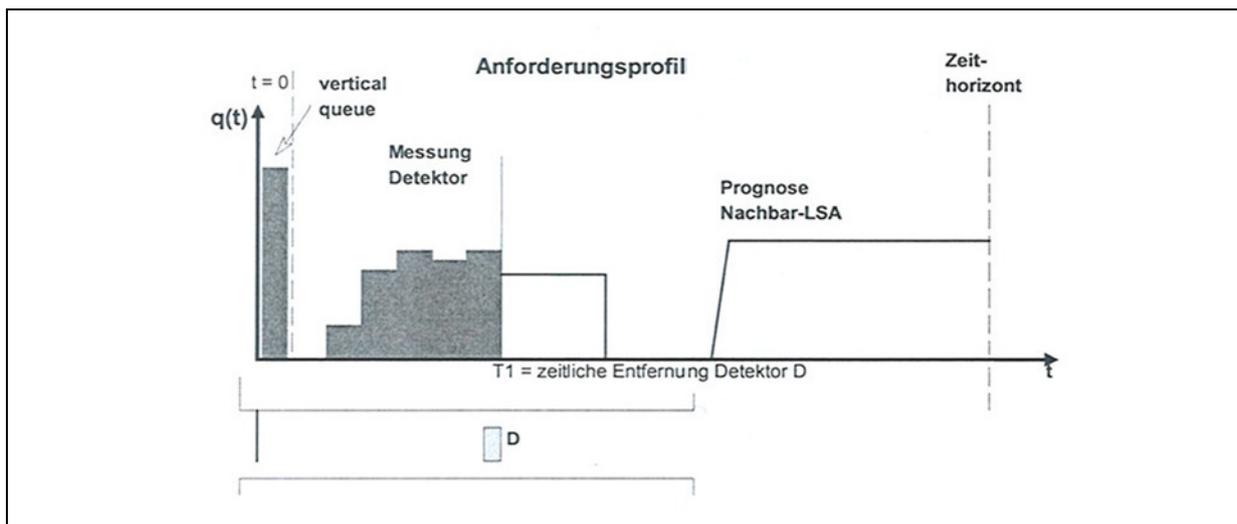


Abbildung 32: IV Anforderungsprofil von SPOT [Mertz 2001].

4.5.2.5 Steuerungsmodell (Optimierung)

Das Optimierungsziel in UTOPIA ist die Minimierung der gesamten Verweildauer aller Fahrzeuge (ÖV und IV) im Netz.

In den Güteindex auf Knotenpunktebene gehen neben der Wartezeit und der Staulänge des zu steuernden Knotenpunkts, auch Wartezeiten und Staulängen der benachbarten Knotenpunkte ein. Außerdem fließt eine Bewertung der Abweichung vom von UTOPIA gesendeten Referenzplan und der Abweichung des Signalplans des vorherigen Steuerungsintervalls ein. [Mertz 2001]

„Für die Optimierung wird ein sogenanntes ‚semi-heuristisches‘ Verfahren eingesetzt.“ [Friedrich 2002]

4.5.3 Systemtechnik

Übergeordnete Vorgaben können von anderen Verkehrsmanagementsystemen eingebracht werden.

4.5.4 Anwendungsfälle und Wirkungen

UTOPIA wird momentan in 34 Städten hauptsächlich in Italien, den Niederlanden und Skandinavien angewendet.

City	Controlled Intersections	Status
Turin (Italy)	160 + 40	Operational Extension in 2006
Rome (Italy)	238	Operational
Milan (Italy)	200 + 110	Operational Implementation phase 2006
Bologna (Italy)	130	Operational
Trento (Italy)	32	Operational
Messina (Italy)	30	Implementation phase
Cremona (Italy)	28	Implementation phase
Bergamo (Italy)	18	Implementation phase
La Spezia (Italy)	19	Operational
Perugia (Italy)	16	Operational
Foggia (Italy)	15	Operational
Bruxelles (Be)	8	Operational
Eindhoven (NL)	16	Operational
Helmond (NL)	5	Operational
Schiphol (NL)	5	Operational
Veldhoven (NL)	4	Planned
Enschede (NL)	17	Operational
Utrecht (NL)	8 8	Operational Ordered
Rhenen (NL)	4	Ordered
Den Bosch (NL)	10	Operational
Oslo (Norway)	14	Operational - Extension planned
Trondheim (Norway)	14	Operational
Bergen (Norway)	9	Not operational
Stockholm (Sweden)	8 + 4	Operational Implemented
Gothenburg (Sweden)	5	Operational
Malmoe (Sweden)	4	Getting started
Leeds (UK)	10	Operational
Bucharest (Romania)	11	Operational
Tampere (Finland)	8	Operational
Roskilde (Denmark)	4	Implementation phase
Wejherowo (Poland)	9	Operational
Malbork (Poland)	5	Operational
Kack (Poland)	2	Operational

Abbildung 33: Anwendungsfelder von UTOPIA [MIZAR 2008].

4.5.4.1 Turin

Feldversuche ergaben im Jahr 1985 Reduzierungen der Gesamtfahrzeit von 9,5 Prozent und im Jahr 1986 Reduzierungen von 15,9 Prozent für den motorisierten Individualverkehr und Reduzierungen von 14,4 Prozent für den ÖPNV im Vergleich zur vorherigen Steuerung (die Art der Steuerung ist nicht bekannt) [Mauro 2002].

4.6 Steuerungsverfahren SCATS

4.6.1 Grundlagen

SCATS [Lowrie 1982] (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) wurde durch das Verkehrsministerium von Neu Süd Wales entwickelt. In Sydney wurde es 1964 eingeführt und seit 1972 rechnergestützt betrieben. Die Steuerungsarchitektur ist dezentral aufgebaut.

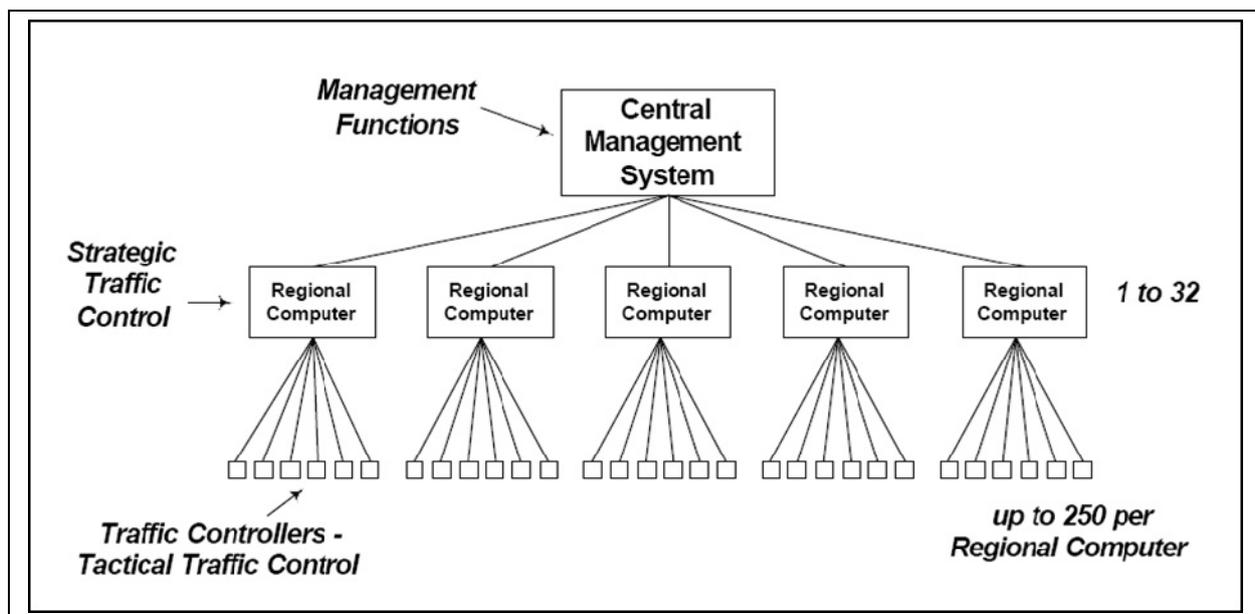


Abbildung 34: Aufbau der SCATS Systemarchitektur [Dineen 2002].

Die lokalen Steuergeräte sammeln Verkehrsdaten und können auf taktischer Ebene eingreifen. Diese Daten werden von den Gebietsrechnern verarbeitet und analysiert. Die Gebietsrechner geben an die lokalen Steuergeräte strategische Vorgaben, wie die Umlaufzeit, die Versatzzeit und die Grünzeitaufteilung zurück. Die Aufgabe des zentralen Management Rechners ist die Verwaltung der Datenbank und die Kommunikation.

4.6.2 Systemfunktionen

4.6.2.1 Kenngrößenerfassung

Die Detektoren (i.d.R. Induktionsschleifen) befinden sich direkt vor der Haltelinie von jedem Fahrstreifen. Sie werden an allen Zufahrten der kritischen Knotenpunkte benötigt. Es wird hierbei im Wesentlichen die Anzahl und Dauer der Nettozeitlücken während der Grünzeit jeder Phase und jedes Umlaufs erfasst und nicht die „traditionellen“ Kenngrößen wie Belegung oder Rückstaulänge.

4.6.2.2 Verkehrsnachfragemodell

SCATS verwendet kein mathematisches Grundmodell (kein Verkehrsmodell), sondern wird durch ein „Feed back Control System“ unterstützt. SCATS arbeitet mit einer Datenbasis, welche zu jeder Verkehrsstärke die passende Signalsteuerung für jeden Knotenpunkt einschließlich der Koordinierung der Knotenpunkte untereinander enthält. Dabei ist die Qualität der Vollständigkeit der Datenbasis für die Effizienz des Systems besonders wichtig, was zur Folge hat, dass diese Datenbasis sehr groß sein muss.

4.6.2.3 Signalprogrammanpassung

Auf Basis der Informationen der Detektoren kalkuliert der Steueralgorithmus in jedem Umlauf für den nächsten Umlauf die Auswahl des günstigsten

- Umlaufzeit
- Grünzeitaufteilungsplans
- Versatzzeitplans innerhalb der Koordinierungseinheit

Der strategische Steuerungsalgorithmus wählt in Abhängigkeit von aktuellen Verkehrsdaten vorbereitete Signalpläne aus, modifiziert sie und entscheidet, ob benachbarte Subsysteme miteinander koordiniert werden sollen.

Pro Lichtsignalanlage sind vier Grünzeitaufteilungsschlüssel abgespeichert. Dabei wird zu jedem Subsystem eine kritische Kreuzung herangezogen. Des Weiteren sind fünf Versatzzeitenpläne für die externe Koordinierung mit den Nachbareinheiten sowie fünf Versatzzeitpläne für die Subsystem-interne Koordinierung vorhanden.

4.6.2.4 Verkehrsflussmodell und Verkehrswirkungsmodell

SCATS nutzt kein Verkehrsfluss- und Verkehrswirkungsmodell sondern entscheidet auf Grund von gemessenen Werten. Als Parameter hierzu wird lediglich der Sättigungsgrad der

Kreuzungszufahrten verwendet. Dabei wird der Sättigungsgrad als Verhältnis von der effektiv genutzte Grünzeit zur gesamten verfügbaren definiert. Der Sättigungsgrad wird folgendermaßen berechnet:

$$X = \frac{G'}{G} = 1 - \frac{(T - t * n)}{G}$$

mit

X	Sättigungsgrad
G	gesamte verfügbare Grünzeit
G'	effektiv genützte Grünzeit
T	Zeitraum, während dessen Fahrzeuge bei Grün über die Haltelinie fahren
t	Zeitbedarf eines Fahrzeuges beim passieren der Haltelinie
n	Anzahl der Lücken

Die Parameter G, T und n werden während der Grünphase ermittelt. Dabei kann über T eine Reduzierung der Grünzeit bei Stauerkennung in die Berechnung des Sättigungsgrades X eingebracht werden [Sims und Dobinson 1980].

4.6.2.5 Steuerungsmodell (Optimierung)

Die Modifizierung der Umlaufzeit, der Grünzeitaufteilungsplans und des Versatzzeitplanes wird im Folgenden beschrieben.

Umlaufzeit

$$C'' = C + C' = 60 * [X - f(C)]$$

mit

C	im abgelaufenen Zyklus tatsächlich geschaltete Umlaufzeit
C'	errechnete Umlaufzeit-Änderung für den laufenden Zyklus
C''	errechnete Umlaufzeit für den nächsten Zyklus
f(C)	der für den laufenden Zyklus als höchstzulässig gewählte Sättigungsgrad (Werte sind in Tabelle vorgegeben).

Es werden nur Änderungen in 6-Sekunden-Schritten betrachtet.

Grünzeitaufteilung

Optimiert wird die Grünzeitaufteilung hinsichtlich des Sättigungsgrads. An jeder Zufahrt wird der Sättigungsgrad X für jeden möglichen Grünzeitaufteilungsplan errechnet. Dabei werden die

größten X-Werte als maßgebend ausgewählt. Gewählt wird der Plan wenn er innerhalb von drei Umläufen zweimal den niedrigsten X-Wert aufweist.

Versatzzeit

Die Versatzzeit ist die Differenz zwischen dem Nullzeitpunkt der Bezugszeit und dem Ende einer definierten Phase am Knoten. Der Versatz ist grundsätzlich unabhängig von der Umlaufzeit in den fünf Versatzzeitplänen festgelegt. Um Stau oder Pulkgeschwindigkeiten zu berücksichtigen, kann die Versatzzeit als Funktion der Umlaufzeit modifiziert werden:

$$P' = P + [1 + A * g(C)]$$

mit

P Versatzzeit

P' Versatzzeitänderung

A Modifizierfaktor

g(C) lineare Funktion von der Umlaufzeit

g(C) = 0 für C=Cmax und g(C)=1 für C=0,75·Cmax

Wie bei der Grünzeitaufteilung wird auch bei der Versatzzeit mit einem Votum gearbeitet. Um das Votum zu ermitteln, wird an definierten Kreuzungszufahrten der Verkehrsfluss Q mit einem Parameter A (repräsentiert bestimmte Verkehrssituationen) multipliziert. Der Versatzzeitenplan mit der größten Summe dieser Produkte über alle Knoten erhält das Votum. Sollen benachbarte Subsysteme miteinander koordiniert werden, erfolgt das auch mittels eines Votums. Dies erfolgt nach folgendem Prinzip:

- Ist die Differenz der beiden Umlaufzeiten kleiner als 9 Sekunden, wird ein positives Votum gebildet und ein Zähler wird um 1 erhöht.
- Ist die Differenz größer als 9 Sekunden wird ein negatives Votum gebildet und der Zähler wird um 1 verringert.

Die Koordinierung wird aktiviert, sobald der Zähler 4 erreicht. Geht der Zähler wieder auf 0 zurück, wird die Koordinierung aufgehoben.

Auf der taktischen Ebene kann eine lokale Steuerung unter den strategischen Vorgaben der Gebietsrechner geschaltet werden. Sie kann aufgrund von Zeitlücken oder Anforderungen Phasen vorzeitig abbrechen oder anfordern.

4.6.3 Systemtechnik

SCATS läuft in der Regel auf TYCO Steuergeräten. Allerdings werden auch andere Steuergeräte verwendet. Außerdem kann SCATS mit VISSIM, AIMSUN und Paramics simuliert werden.

4.6.4 Anwendungsfälle und Wirkungen

SCATS wird in 18 Ländern, 101 Städten und an über 21.000 Knotenpunkten eingesetzt (Stand 2005). Das Verfahren zur Netzsteuerung wird vor allem in Australien, Asien und Nordamerika, aber auch in Europa (Dublin 1989) eingesetzt.

4.7 Weitere Steuerungsverfahren

Neben den in den vorherigen Kapiteln vorgestellten hauptsächlich in Europa weiter verbreiteten modellbasierten Steuerungsverfahren, sind noch eine Vielzahl weiterer Netzsteuerungsverfahren entwickelt worden. Diese umfassen Planungstools wie TRANSYT [Robertson 1969] und NONSTOP-GA [Braun 2005], logikbasierte Verfahren wie TASS sowie weitere modellbasierte Steuerungen wie TUC [Diakaki 2002], PROLYN oder OPAC [Gartner 1982].

Verfahren	seit	Systemarchitektur	Installationen
PLIDENT (Miller, Holroyd)	1963	Online	England (F&E-Prototyp)
TRANSYT (Robertson)	1969	Offline Planungs-Tool	USA, England
OPAC (Gartner)	1979	Online, zentral / dezentral	Arlington, Tucson (USA)
TASS	1980	Online, zentral, logikbasiert	weltweit
SCOOT (Hunt, et al.)	1981	Online, zentral	weltweit
SCATS (Lowrie)	1982	Online, zentral / dezentral	weltweit, Schwerpunkt Asien
PROLYN (Henry et al.)	1983	Online, dezentral	Frankreich
UTOPIA (Donati et al.)	1987	Online, zentral / dezentral	Italien, Europa
SIGMA (Garben et al.)	1988	Offline Planungs-Tool	Deutschland
MONARC	1990	Online, zentral	USA
ADONIS (Busch et al.)	1990	Online, dezentral	Deutschland (F&E-Prototyp)
MOTION (Busch et al.)	1993	Online, zentral / dezentral	Deutschland, Europa
RHODES (Head et al.)	1994	Online, zentral / dezentral	USA
BALANCE (Friedrich et al.)	1994	Online, zentral / dezentral	Deutschland, England
TRACON, TRASSIS	1995	Online	Deutschland
GERTRUDE	1995	Online	Frankreich, Portugal
TUC (Diakaki et al.)	1999	Online, zentral / dezentral	Griechenland
ADAPT2 (Zackor et al.)	2001	Online, dezentral	Deutschland (F&E-Prototyp)
LAATCS	2001	Online, zentral / dezentral	USA
LISA / ADANTES	2002	Offline	Deutschland (F&E-Prototyp)
NONSTOP-GA (Braun et al.)	2005	Offline	Deutschland (F&E-Prototyp)

Tabelle 14: Überblick über Netzsteuerungsverfahren [Busch 2007].

5 Kenngrößen der Verkehrs- und Umweltsituation und ihre Erfassung

5.1 Verkehrliche Kenngrößen

5.1.1 Grundlagen / Übersicht über Kenngrößen

Der Straßenverkehr ist die Menge der Ortsveränderungen, die von Personen mit Fahrzeugen oder zu Fuß im Straßennetz durchgeführt werden. Um den Verkehrszustand zu einem Zeitpunkt oder den Verkehrsablauf in einem Zeitraum quantifizieren zu können, sind Kenngrößen erforderlich. Verkehrliche Kenngrößen beschreiben die direkten Wirkungen des Verkehrs auf die Verkehrsteilnehmer und auf die Netzbetreiber. Andere Wirkungen wie z. B. der Kraftstoffverbrauch oder Lärm- und Schadstoffemissionen werden durch weitere Kenngrößen beschrieben.

Zur Beurteilung des Verkehrsablaufs aus Sicht der Verkehrsteilnehmer werden die Kenngrößen einer Ortsveränderung betrachtet. Verkehrliche Kenngrößen einer Ortsveränderung im Straßenverkehr sind

- Reisezeit Startadresse - Zieladresse,
- Verlustzeit (Differenz zwischen tatsächlicher Reisezeit und einer definierten Soll-Reisezeit),
- Reiseweite,
- Anzahl der Halte.

Netzbetreiber betrachten nicht die kompletten Ortsveränderungen der Verkehrsteilnehmer, sondern nur den Verkehrsablauf auf einzelnen Verkehrsanlagen, auf Streckenzügen oder in Teilnetzen. Zur Beschreibung des Verkehrsablaufs in einem Zeitraum auf einer Verkehrsanlage, einem Streckenzug oder in einem Teilnetz können folgende Kenngrößen herangezogen werden:

- Zahl der Fahrten,
- gesamte Fahrzeit aller Fahrzeuge (Verkehrszeitaufwand),
- mittlere Fahrzeit oder Verteilung der Fahrzeit,
- mittlere Verlustzeit oder Verteilung der Verlustzeit,
- gesamte Fahrtweite aller Fahrzeuge (Verkehrsleistung),
- mittlere Geschwindigkeit,
- Anzahl der Halte,
- Auslastungsgrad.

Diese Kenngrößen können nach Verkehrsmitteln (Fuß, Rad, Bus, Stadtbahn, Pkw, Lkw) differenziert werden.

Um die oben genannten verkehrlichen Kenngrößen exakt zu erfassen, müssen die einzelnen Trajektorien (Weg-Zeit-Verläufe) der Ortsveränderungen aller Verkehrsteilnehmer im Untersuchungsgebiet beobachtet werden. Abbildung 35 zeigt beispielhaft den Verlauf der

Trajektorien aller Verkehrsteilnehmer, was einer vollständigen Zustandsbeschreibung entspricht.

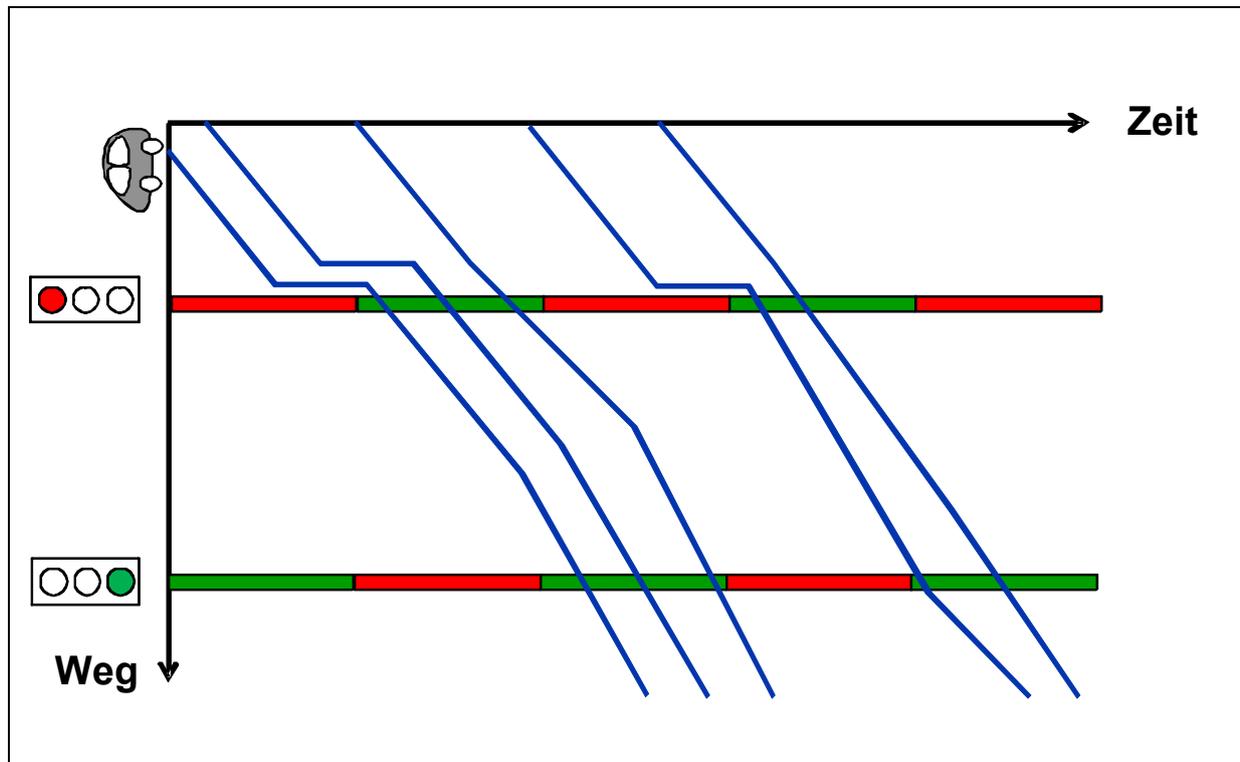


Abbildung 35: Reale Fahrzeugtrajektorien.

Die Praxis ist allerdings weit davon entfernt, diese Möglichkeit zu bieten. Grundsätzlich können heute Ortsveränderungen von Verkehrsteilnehmern mit GPS Geräten genau erfasst werden. Eine kontinuierliche Erfassung aller Verkehrsteilnehmer ist mit dieser Technik aber derzeit noch nicht möglich. Deshalb werden in diesem Kapitel Erfassungsmethoden beschrieben, die sich zur Erfassung von Kenngrößen für die Bewertung des Verkehrsablaufs in Straßennetzen mit Lichtsignalanlagen eignen und die heute technisch umsetzbar sind. Dabei geht es um die Erfassung von Kenngrößen zur Bewertung der Verkehrsqualität und nicht um Kenngrößen, die von den LSA Steuerungsverfahren verwendet werden. Jede Erfassungsmethode wird dazu in den Kapiteln 5.1.2 bis 5.1.9 durch folgende Punkte beschrieben:

- erfasste Kenngrößen,
- Methodenbeschreibung,
- Datenqualität,
- Aussagekraft der Daten,
- Erhebungsaufwand,
- Auswertungsaufwand.

Da nicht alle für eine Bewertung erforderlichen Kenngrößen direkt erfasst werden können, wird in Kapitel 5.1.8 ein Überblick über Methoden geboten, mit denen man Kenngrößen aus direkt gemessenen Kenngrößen ableiten kann.

Bei den Erfassungsmethoden kann zwischen lokalen und mobilen Methoden unterschieden werden. Bei den lokalen Erhebungsmethoden befinden sich die Messgeräte oder das Erhebungspersonal an einem Querschnitt und beobachten den lokalen zeitlichen Verlauf des Verkehrs (Abbildung 36).



Abbildung 36: Lokale Messung.

Bei den mobilen Erhebungsmethoden befinden sich die Erhebungsgeräte in den Fahrzeugen und bewegen sich mit dem zu messenden Verkehr. Sie liefern einen räumlich zeitlichen Ausschnitt der Verkehrslage (Abbildung 37).

Momentane Erfassungsmethoden bewerten den Schnappschuss eines vorbeifliegenden Flugzeuges, d. h. es liegen Informationen im gesamten Netz aber nur zu einem Zeitpunkt vor (Abbildung 38). In der Praxis werden diese Methoden durch Videokameras repräsentiert, die einen Streckenabschnitt beobachten und dieser Vorgang findet natürlich über die Zeit hinweg statt.

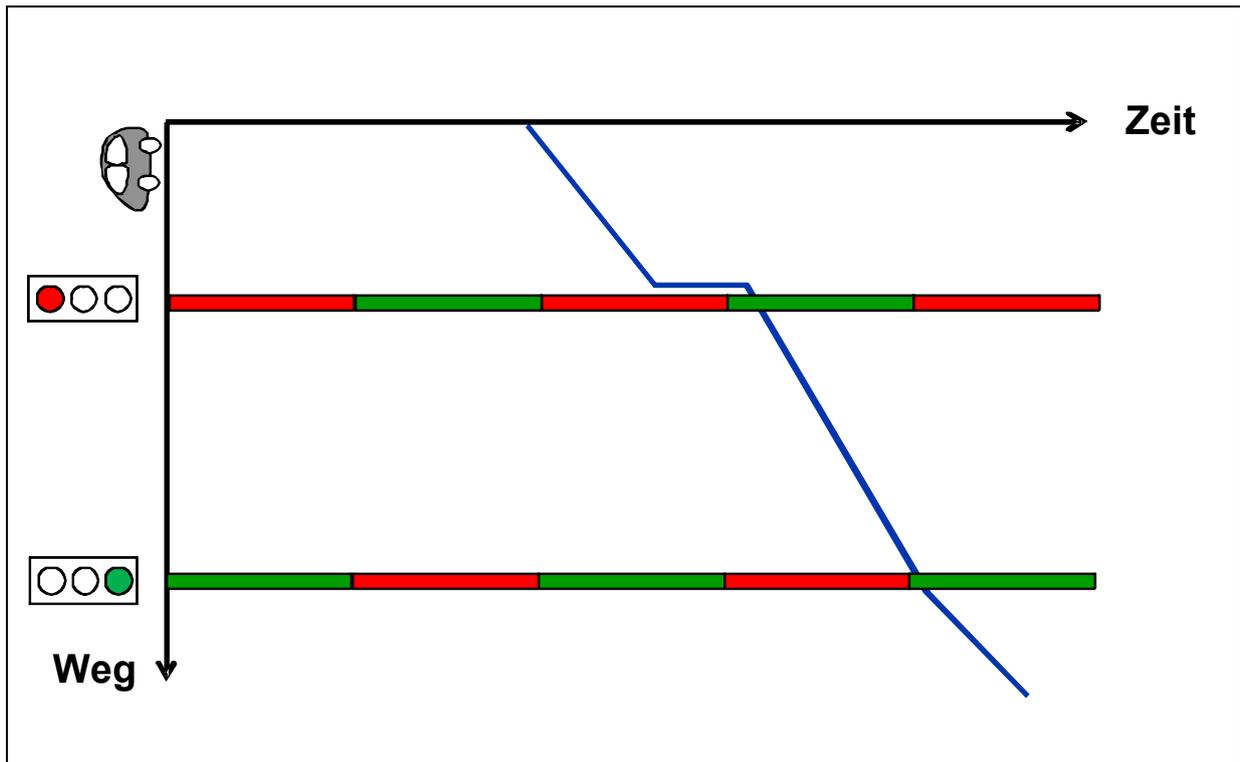


Abbildung 37: Mobile Messung.

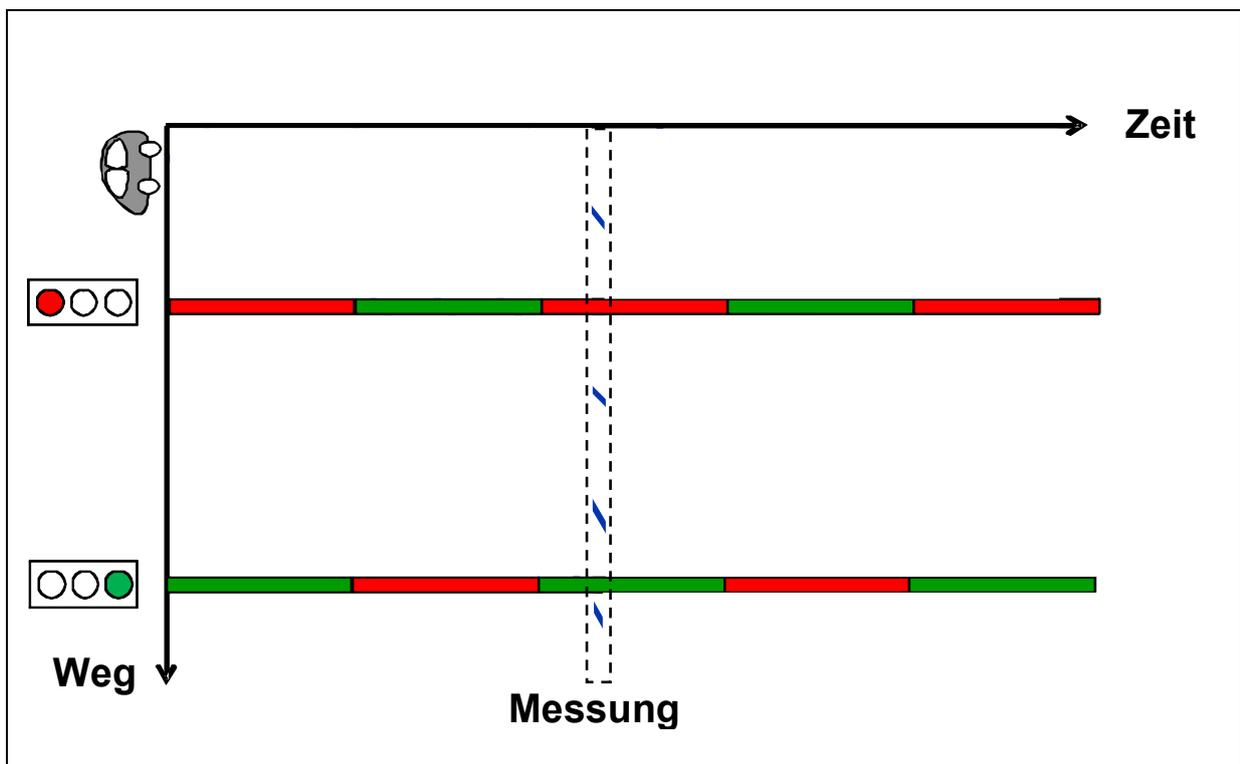


Abbildung 38: Momentane Messung.

Die Fusion unterschiedlicher Datenquellen, erläutert am Beispiel automatischer Kennzeichen-erfassungssysteme in Abbildung 39, erlaubt die Erzeugung weiterer Informationen. Die räumlich-zeitlichen Daten der abgeschnittenen Trajektorien mit konstanter Geschwindigkeit

können dabei unter Hinzunahme zusätzlicher Messdaten, wie Messfahrten oder Signalzeitplänen, in ihrer Qualität noch weiter gesteigert werden.

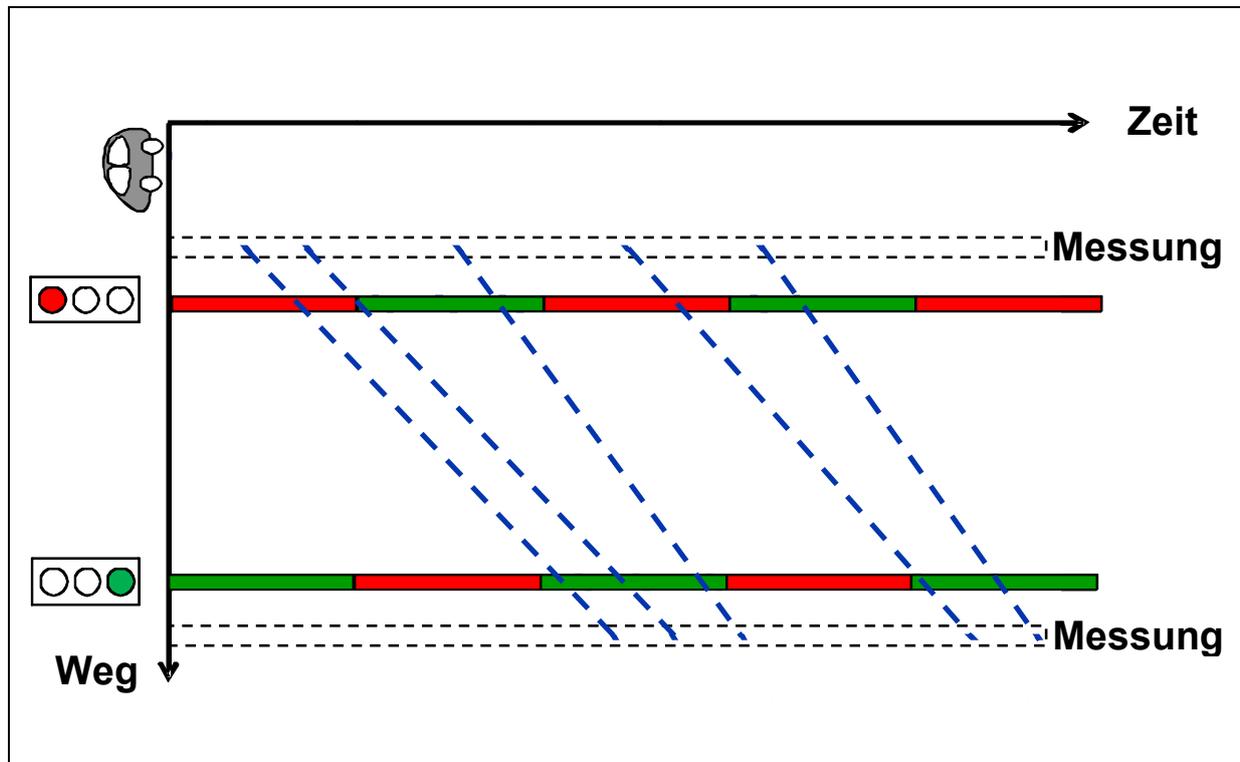


Abbildung 39: Messung mit automatischen Kennzeichenerfassungssystemen.

Die Messgeräte können dabei permanent installiert oder nur temporär für die Erhebung verfügbar sein. Permanent installierte Messgeräte, die z. B. der Steuerung einer Lichtsignalanlage oder der Verkehrslageerfassung dienen, müssen in der Regel nicht beaufsichtigt werden und liefern mit wenig Betriebsaufwand über lange Zeiträume Daten. Temporär installierte Geräte erlauben die Messung an unterschiedlichen Querschnitten oder Orten, bedürfen aber zumeist einer Aufsicht und eignen sich deshalb nicht für Langzeitmessungen. Beispiele für die verschiedenen Klassifizierungen der Erhebungsmethoden finden sich in Tabelle 15. Tabelle 16 zeigt eine Übersicht der betrachteten Kenngrößen und den Erfassungsmethoden bzw. den dazugehörigen Kapiteln.

Installation/ Messdauer	Erfassungsmethode/Messwert		
	Lokal	Mobil	Momentan
Permanent	Induktionsschleifen	FCD aus einer Fahrzeugflotte	Kamerabasierte Erfassung von Streckenabschnitten
Temporär	Menschliche Zähler	Messfahrzeug mit GPS-Logger	Überflug mit Flugzeug oder Hubschrauber

Tabelle 15: Klassifizierung von Erhebungsmethoden.

Kenngöße	Erfassungsmethode	
	Direkt	Indirekt
Lokale Geschwindigkeit [km/h]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.2 Querschnittserfassung mit fest installierten Detektoren 	
Durchschnittliche Geschwindigkeit [km/h]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.3 Manuelle Querschnittserfassung • 5.1.4 Kennzeichenerfassungssysteme 	
Reisegeschwindigkeit [km/h]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.6 Messfahrzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.8.5 Mittlere Reisegeschwindigkeit aus Fahrzeiten
Momentane Geschwindigkeit [km/h]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.7 Kamerabasierte Erfassung momentaner Messgrößen 	
Streckenfahrzeit [s]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.6 Messfahrzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.8.3 Streckenfahrzeit aus Kennzeichenerfassungssystemen
Wartezeit [s]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.6 Messfahrzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.8.2 Mittlere Wartezeit der Fußgänger
Verlustzeitrate [min/km]		<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.8.6 Verlustzeitrate aus Fahrzeiten
Gesamtverlustzeit [Kfz·h]		<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.8.7 Gesamtverlustzeit aus Fahrzeiten und Verkehrsstärken
Verkehrsstärke [Kfz/h]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.2 Querschnittserfassung mit fest installierten Detektoren • 5.1.3 Manuelle Querschnittserfassung • 5.1.4 Kennzeichenerfassungssysteme • 5.1.7 Kamerabasierte Erfassung momentaner Messgrößen 	
Belegungsgrad [%]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.2 Querschnittserfassung mit fest installierten Detektoren 	
Verkehrsdichte [Kfz/km]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.7 Kamerabasierte Erfassung momentaner Messgrößen 	
Rückstaulänge [m]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.3 Manuelle Querschnittserfassung • 5.1.7 Kamerabasierte Erfassung momentaner Messgrößen 	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.8.1 Rückstauschätzer
Durchgangsverkehrsanteil [%]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.3 Manuelle Querschnittserfassung • 5.1.4 Kennzeichenerfassungssysteme 	
Anzahl Halte [-]	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.6 Messfahrzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.8.4 Anzahl Halte aus Kennzeichenerfassungssystemen
Bufferindex [%]		<ul style="list-style-type: none"> • 5.1.8.8 Bufferindex aus Fahrzeiten

Tabelle 16: Kenngößen und ihr Erfassungsmethoden.

5.1.2 Querschnittserfassung mit fest installierten Detektoren

Erfasste Kenngößen

- Verkehrsstärke nach Fahrzeugtypen [Kfz/h]
- Lokale Geschwindigkeit [km/h]
- Belegungsgrade [%]

Erfassungsmethode

Als fest installierte Detektoren zur Erfassung des Verkehrszustands an einem Querschnitt eignen sich Induktionsschleifen, Radar- oder Infrarotdetektoren, im Detail werden die

verschiedenen Methoden in FGSV [1991] behandelt. Diese Systeme können die Verkehrsstärke, den Belegungsgrad, die Geschwindigkeit und gegebenenfalls den Typ eines Fahrzeuges erfassen. Der Belegungsgrad lässt dabei Rückschlüsse auf die Verkehrsdichte zu.

Für die verkehrsabhängige Steuerung von Lichtsignalanlagen werden vor allem Induktionsschleifen eingesetzt. Sie bilden deshalb den Schwerpunkt für die nachfolgenden Betrachtungen. Bei Induktionsschleifen ist zu beachten, dass nur sogenannte Doppelschleifen in der Lage sind die Geschwindigkeit zu messen. Da diese für die Steuerung von Lichtsignalanlagen nicht relevant ist, finden sich in städtischen Straßennetzen zumeist keine Induktionsschleifen, die die Geschwindigkeit direkt messen.

Datenqualität

Die Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Technik ist, zumindest bei neueren Anlagen, hoch, so dass im Rahmen aktueller Forschungsprojekte erfolgreich versucht wurde die Signatur von Fahrzeugen zwischen räumlich getrennten Induktionsschleifen wiederzuerkennen, um damit zum Beispiel Fahrzeiten zu messen (siehe dazu auch Maier und Roth [2008]). Auf der anderen Seite ist eine Vielzahl unterschiedlich guter und alter Systeme im Einsatz, die große Unterschiede in der Qualität und Zuverlässigkeit aufweisen. In den meisten Fällen sind Induktionsschleifen in der Lage zwischen Pkws und Lkws zu unterscheiden. Zur Weiterverwendung der erhobenen Daten für das Verkehrsmanagement müssen die Messdaten auf jeden Fall einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden, wie sie zum Beispiel im Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen - MARZ [1999] vorgeschlagen werden.

Um die stochastischen Schwankungen im Verkehrsfluss zu glätten, ist ein Erfassungszeitintervall im Bereich von Minuten notwendig, über den dann die mittlere Verkehrsstärke bzw. Geschwindigkeit der erfassten Fahrzeuge bestimmt wird.

Aussagekraft

Lokal erfasste Daten des Verkehrszustandes haben für die Beurteilung der Qualität einer Lichtsignalanlage nur eine eingeschränkte Aussagekraft. Da nur lokale Daten erfasst werden, können Qualitätskenngrößen wie die Fahrzeit, die Verlustzeit oder die Anzahl der Halte nicht direkt gemessen werden. Um diese Kenngrößen zu ermitteln, müssen die Daten mehrerer Messquerschnitte fusioniert und ggfs. durch Modellrechnungen abgeleitet werden. Von Bedeutung ist jedoch die Erfassung der Verkehrsstärke. Sie beschreibt die für eine Qualitätsbeurteilung notwendige Verkehrsnachfrage.

Die Aussagekraft wird vom Einsatzzweck und damit der Position des Detektors beeinflusst. Bei Detektoren für die LSA Steuerung wird zwischen folgenden Einsatzzwecken unterschieden:

- Anforderungsdetektor: Dieser Detektor befindet sich direkt vor der Haltelinie und detektiert die Anforderung eines Fahrzeuges. Es werden der Belegungsgrad und die Verkehrsstärke erfasst. Für eine Qualitätsbeurteilung kann die Verkehrsstärke verwendet werden..

- Bemessungsdetektor: Dieser Detektor befindet sich flussaufwärts in einigem Abstand zu einer Lichtsignalanlage (ca. 30 bis 80 m). Die Detektorwerte können der lokalen Steuerung Informationen liefern, ob eine Phase verlängert oder abgebrochen werden soll. Gemessen werden die Verkehrsstärke und der Belegungsgrad. Für eine Qualitätsbewertung kann die Verkehrsstärke verwendet werden. Aus dem Belegungsgrad kann mit dem in Kapitel 5.1.8.1 beschriebenen Verfahren, die Rückstaulänge abgeschätzt werden.
- Strategische Detektoren: Diese befinden sich im Vorfeld einer gesteuerten Netzabschnitts oder zwischen Knotenpunkten und erfassen den freien Verkehrsfluss. Für eine Qualitätsbeurteilung können die Verkehrsstärken und die Geschwindigkeiten verwendet werden. Allerdings sind, strategische Detektoren selten in städtischen Verkehrsnetzen zu finden, da sie nicht unmittelbar zur Steuerung einer Lichtsignalanlage benötigt werden.

Die Größe der Stichprobe einer Querschnittserfassung mit fest installierten Detektoren entspricht der Detektionsrate des verwendeten Systems und ist dementsprechend hoch.

Verwendet man die für einen LSA Steuerung vorgehaltenen Detektoren gleichzeitig für die Beurteilung der Qualität dann muss berücksichtigt werden, das eventuelle Messfehler auch in die Qualitätsbeurteilung Eingang finden.

Erhebungsaufwand

Da die Detektoren fest installiert sind, entsteht für die Erhebung kein zusätzlicher Aufwand bei der Datenerfassung. Das Auslesen der Daten kann im Einzelfall mit Personalaufwand oder mit Kosten für eine Schnittstelle verbunden sein.

Auswertungsaufwand

Abhängig vom Verwendungszweck müssen unterschiedlich komplizierte Algorithmen zur Auswertung und Aufbereitung zur Verfügung stehen. Sollen lediglich Ganglinien erstellt werden ist die Aufbereitung weniger komplex, als wenn der Rückstau vor einer Lichtsignalanlage berechnet (Kapitel 5.1.8.1) werden soll oder eine Messwertpropagierung in einem Verkehrsnetz durchgeführt wird. In jedem Fall müssen die Rohdaten einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden.

5.1.3 Manuelle Querschnittserfassung

Erfasste Kenngrößen

- Verkehrsstärke nach Fahrzeugtypen [Kfz/h]
- Rückstaulängen [m]
- Kfz-Kennzeichen [-]
- Aus den Kennzeichen abgeleitete Fahrzeiten [min] und Durchgangsverkehrsanteile [%]

Erfassungsmethode

Die manuelle Querschnittserfassung mit menschlichen Zählern eignet sich zur Erhebung der Verkehrsstärke an Querschnitten und Knotenpunkten, die über keine oder keine geeigneten Detektoren verfügen. Im Allgemeinen ist es möglich mit einer Person mehrere Abbiegebeziehungen zu erfassen und zwischen verschiedenen Fahrzeugklassen zu unterscheiden. Das Erhebungspersonal kann außerdem die Rückstaulängen in einer Zufahrt abschätzen.

Die Erfassung von Kennzeichen oder Teilen eines Kennzeichens (z. B. letzte 4 Zeichen) mit Papier und Stift oder Diktiergeräten ist grundsätzlich möglich. Werden Kennzeichen an zwei oder mehr Querschnitten erfasst, kann man den Durchgangsverkehr bzw. die Routenwahl ableiten. Die Fahrzeit zwischen zwei Messquerschnitten lässt sich bei einer Aufzeichnung mit Diktiergeräten auf ca. eine Minute genau bestimmen.

Datenqualität

Um Aussagen über die Qualität der von einem Zähler erfassten Zählraten zu machen, müssten die Daten mit Kontrollzählungen verglichen werden. Das ist aus Aufwandsgründen nicht üblich. Die Fehlerquote eines menschlichen Zählers hängt von Eigenschaften der Person, dem Wetter, der Verkehrsstärke und weiteren Faktoren ab. Bei hohen Verkehrsstärken sinkt die Detektionsrate. Gleichzeitig steigt die Fehlerquote. Das gilt insbesondere für die Kennzeichenerfassung.

Aussagekraft

Mit einer manuellen Zählung können die für eine Qualitätsbewertung erforderlichen Nachfragedaten erfasst werden. Fahrzeiten oder Zahl der Halte lassen sich nicht erfassen. Eine Abschätzung der Rückstaulängen ist jedoch möglich. Außerdem kann das Erhebungspersonal besondere Störungen (Falschparker, Unfall) protokollieren.

Die aus einer manuellen Kennzeichenerhebung abgeleiteten Fahrzeiten sollten nicht für die Beurteilung eines kurzen Streckenzuges (< 5 Minuten Fahrzeit) verwendet werden. Hier ist die Messgenauigkeit, die im Bereich einer Umlaufzeit liegt, zu niedrig. Auch bei langen Streckenzügen sind Fahrzeiten aus automatischen Kennzeichenerfassungssystemen vorzuziehen.

Erhebungsaufwand

Die Investitionen sind bei einer manuellen Erhebung sehr gering, gegebenenfalls müssen elektronische Hilfsgeräte für die Aufzeichnung angeschafft werden. Für die laufenden Kosten sind die Personalkosten bestimmend.

Auswertungsaufwand

Im Falle der Erfassung auf Papier oder Diktiergerät ist es zunächst notwendig die Daten zu digitalisieren. Anschließend verhält sich der Auswerteprozess ähnlich wie bei einer elektronischen Erfassung oder der Querschnittserfassung mit Detektoren.

5.1.4 Kennzeichenerfassungssysteme

Erfasste Kenngrößen

- Verkehrsstärke [Kfz/h]
- Kfz-Kennzeichen [-]
- Aus den Kennzeichen abgeleitete Fahrzeiten [s] und Durchgangsverkehrsanteile [%]

Erfassungsmethode

Ein Kennzeichenerfassungssystem besteht im Allgemeinen aus einer Kamera (Infrarot und/oder Video) und einem Computer, der die Erkennung der Kennzeichen aus den Bildern der Kamera übernimmt und die gegebenenfalls verschlüsselten Kennzeichen und den Erfassungszeitpunkt mitschreibt. Automatische Kennzeichenerfassungssysteme (Automatic Number Plate Recognition oder ANPR), die an mehreren Querschnitten in einem Verkehrsnetz aufgebaut sind, erlauben somit durch den Abgleich der Daten zwischen den Querschnitten, die Bestimmung von Durchgangsverkehrsanteilen und Fahrzeiten. Diese Systeme existieren auch als fest installierte Anlagen, sind aber noch nicht weit verbreitet.

Insbesondere beim Aufbau und Betrieb temporärer Systeme ist zu beachten, dass die Verkehrsteilnehmer die Messgeräte als Geschwindigkeitskontrollen interpretieren, was zu teilweise abrupte Bremsmanöver führen kann. Infolgedessen besteht eine gewisse Beeinflussung des lokalen Fahrverhaltens und der Verkehrssicherheit. Falls möglich sollte deshalb eine Erfassung der Kennzeichen von hinten erfolgen. Aus Gründen des Datenschutzes müssen die Kennzeichen in unumkehrbar verschlüsselter Form gespeichert werden. Nach der Berechnung der Fahrzeiten müssen die Daten zeitnah gelöscht werden.

Datenqualität

Die Detektionsrate eines Kennzeichenerfassungssystem kann bei korrekter Einstellung mit >85% angenommen werden [Friedrich et al. 2009]. Die zeitliche Auflösung der aus Kennzeichen abgeleiteten Fahrzeiten hängt, neben der Erkennungsrate, von der Durchgangsverkehrsstärke und somit auch vom Abstand zwischen den Messquerschnitten ab. Mit folgender Formel kann der mittlere zeitliche Abstand zwischen zwei erfassten Fahrzeugen in Abhängigkeit der Detektionsrate und der Durchgangsverkehrsstärke bestimmt werden:

$$\Delta t \left[\frac{s}{\text{Kfz}} \right] = \frac{3600 \left[\frac{s}{h} \right]}{\text{Detektionsrate}^2 \cdot \text{Durchgangsverkehrsstärke} \left[\frac{\text{Kfz}}{h} \right]}$$

Bei einer Detektionsrate von 0,8 und einer Durchgangsverkehrsstärke von 500 Fahrzeugen ergibt sich ein mittlerer zeitlicher Abstand von 11 s, bei 250 Fahrzeugen von 22 s. Dabei ist es sinnvoll die Werte auf größere Zeitintervalle zusammenzufassen und zu glätten, um die stochastischen Schwankungen des Verkehrs auszugleichen.

Auch bei Kennzeichenerfassungssystemen empfiehlt sich während der Messung eine Plausibilitätskontrolle. Das heißt, es sollte manuell in bestimmten Intervallen die Anzahl passierender Fahrzeuge gezählt und mit der vom System erfassten Anzahl Fahrzeuge verglichen werden. Die so gewonnene Detektionsrate dient auch als Hochrechnungsfaktor für die Bestimmung des Durchgangsverkehrsanteils.

Aussagekraft

Die mit automatischen Kennzeichenerfassungssystemen erfassten Fahrzeiten eignen sich sehr gut für die für die Qualitätsbeurteilung eines mit LSA gesteuerten Streckenzugs. Die Systeme liefern eine sehr hohe Genauigkeit und eine hohe Anzahl von Beobachtungen. Aus einem Vergleich der Fahrzeiten können außerdem die Zahl der Fahrzeuge, die mehr als einen Umlauf für das Durchfahren benötigen, abgeschätzt werden. Der zeitliche Verlauf zwischen zwei Messquerschnitten kann jedoch nicht direkt gemessen werden. Hierfür müssen die Fahrzeiten mit Fahrzeitmessungen aus Messfahrzeugen oder mit Daten der Netztopologie kombiniert werden.

Erhebungsaufwand

Die Investitionskosten eines nicht fest installierten Systems entstehen durch den Kauf von Kamera, Notebook, Autobatterie zur Stromversorgung und Software. Ferner besteht die Möglichkeit Systeme für einen bestimmten Zeitraum zu mieten. Für die Erhebung selbst fallen pro Messquerschnitt Personalkosten für mindestens eine Person an, die das System aufbaut und betreut.

Auswertungsaufwand

Die Kennzeichenerkennung erfolgt automatisch mit Hilfe eines Bilderkennungsalgorithmus. Für die Ableitung der Fahrzeiten und der Durchgangsverkehrsanteile muss ein Abgleich aller erfassten Kennzeichen und Zeitpunkte zwischen allen Messquerschnitten erfolgen. Das erfolgt ebenfalls automatisch mit einem Algorithmus. Der wesentliche Aufwand besteht damit in einer geeigneten Aufbereitung der Daten (Tabelle, Fahrzeitdiagramme) und in der Interpretation der Daten.

5.1.5 Fahrzeugwiedererkennung mittels Induktionsschleifensignatur

Erfasste Kenngrößen

- Aus den Signaturen abgeleitete Fahrzeiten [s]

Erfassungsmethode

Im von Siemens beauftragten Projekt ISAR wurde im Jahr 2006 das „Verfahren zur Wiedererkennung von Fahrzeugen“ (VWF) zur Ermittlung von Fahrzeiten durch Fahrzeugwiedererkennung, basierend auf Verstimmungskurven von Induktionsschleifen, entwickelt [Maier 2006].

Neben der Erhebung der makroskopischen Verkehrskenngrößen, Verkehrsstärke, mittlere Geschwindigkeiten und Belegungsgrad erlauben Induktionsschleifen auch die Ermittlung mikroskopischer Einzelfahrzeugdaten. Durch die Wiedererkennung der dadurch erfassten, sogenannten Fahrzeugsignaturen und des Vergleichs der beiden zugehörigen Zeitstempel, ist es möglich, Fahrzeiten zwischen zwei Messquerschnitten zu ermitteln.

Datenqualität

Gute Ergebnisse lassen sich erzielen, falls die Strecke zwischen zwei Querschnitten mit möglichst wenigen Spurwechseln behaftet ist, möglichst wenige Knotenpunkte auf der Strecke liegen und die entsprechenden Besonderheiten einzelner Detektoren (Anspruchsschwellen etc.) und Streckenstationen berücksichtigt werden.

Aussagekraft

Die Aussagekraft der erfassten Fahrzeit ist bei entsprechend restriktiver Filterparametrierung sehr hoch. Allerdings verringert sich dadurch die zur Verfügung stehende Stichprobe.

Erhebungsaufwand

Es sind keinerlei zusätzliche Investitionen in die Infrastruktur nötig. Es muss einzig die Möglichkeit geschaffen werden, die Signaturen direkt an den Streckenstationen abzugreifen. Hierfür ist ein Endgerät mit serieller Schnittstelle und eine auf Microsoft Access basierende Spezialsoftware der Firma Siemens nötig. Personalaufwand fällt nur zur (soft- und hardwaretechnischen) Überprüfung der Datenverbindung an, kann aber durch entsprechende Wahl der Hardwareausstattung deutlich reduziert werden.

Auswertungsaufwand

Vor der eigentlichen Auswertung der Messdaten und der damit einhergehenden Ableitung von Fahrzeiten müssen die Detektoren entsprechend kalibriert werden. Nach der Kalibrierung müssen Einzelsignaturen extrahiert und die Signaturen zweier Querschnitte abgeglichen werden. Die Extraktion erfordert die genaue Kenntnis der Ansprechschwellen (und sonstigen Besonderheiten) der Detektoren. Für den Abgleich und das Herausfiltern nicht korrekter Zuordnungen sind verschiedene Lageparameter der Detektoren zu berücksichtigen.

5.1.6 Messfahrzeuge

Erfasste Kenngrößen

Es wird der komplette Weg-Zeit-Verlauf im Sekundenraster erfasst. Daraus ergeben sich folgende Kenngrößen für den gesamten Streckenzug oder einzelne Abschnitte:

- Reisegeschwindigkeit [km/h]
- Fahrzeit [s]
- Wartezeit [s]
- Anzahl Halte [-]

Erfassungsmethode

Als Messfahrzeug dient ein gewöhnlicher Pkw, der mit einem GPS-Empfänger und einem Gerät zum Mitschreiben der GPS-Daten (GPS-Logger) ausgestattet ist. Gewöhnlich sind beide Funktionen in einem Gerät integriert. Dieses Fahrzeug fährt ausgewählte Routen im Untersuchungsgebiet ab und protokolliert so die Weg-Zeit-Verläufe (Trajektorien) entlang dieser Routen. Diese Daten werden Floating Car Daten (FCD) genannt.

Alternative Ansätze, die sich derzeit in der Entwicklung befinden, sind der Floating Car Observer (FCO) und Floating Phone Data (FPD). Der FCO-Ansatz erzeugt zusätzliche Informationen über den entgegenkommenden Verkehr. Für einen detaillierteren Einblick wird hier auf Hoyer und Kühnel [2008] verwiesen. Bei der FPD-Methode werden Trajektorien aus den Signalstärken und Funkzellenfolgen von Mobilfunkgeräten generiert, die dann ebenfalls Rückschlüsse auf den Verkehrszustand verlassen. Mehr zu diesem Ansatz findet sich bei Wiltschko und Schwiager [2008]. Beide Ansätze sind derzeit noch nicht für eine genaue Erfassung von Fahrzeiten in städtischen Netzen geeignet.

Rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL) des öffentlichen Verkehrs können ebenfalls eine Quelle für FCD darstellen. Bus- oder Taxifлотten die mit GPS-Empfängern ausgestattet sind, erlauben eine permanente mobile Erfassung der Verkehrslage.

Datenqualität

Die Qualität der Daten ist auf nicht überdachtem Terrain sehr gut. Aufgrund der Tatsache, dass die Weg-Zeit-Punkte durch GPS-Geräte erfasst werden, können in Tunneln keine Daten erfasst werden. Bei kurzen Streckenabschnitten im Tunnel können die fehlenden Punkte aber hinreichend genau interpoliert werden. Problematisch wäre nur die Erfassung der Wirkungen einer im Tunnel gelegenen LSA.

Aussagekraft

FCD enthalten hoch aufgelöste zeitliche und räumliche Informationen über den Verkehrszustand. Sie liefern alle wesentlichen Kenngrößen für die Qualitätsbeurteilung einer LSA Steuerung (Fahrzeit, Wartezeit, Anzahl Halte). Die Aussagekraft der FCD ist allerdings durch die geringe Stichprobengröße, die zu einer hohen Varianz der beobachteten Messwerte

führt, eingeschränkt. In der Praxis hängt die Stichprobengröße von der zu beobachtenden Netzlänge und der Anzahl eingesetzter Messfahrzeuge ab.

Erhebungsaufwand

Die notwendigen Investitionen für eine temporäre Messung setzen sich aus einem GPS-Gerät und gegebenenfalls einem Fahrzeug zusammen. Die Erhebungskosten umfassen die Personalkosten für einen Fahrer, die Betriebskosten eines Fahrzeuges und eventuell die Kosten für die Miete des Fahrzeuges.

Auswertungsaufwand

Die erfassten GPS-Rohdaten müssen mit den Netzdaten fusioniert werden (Netzmatching). Dabei müssen nicht relevante Daten am Anfang und Ende der Routen (Wenden) gelöscht werden. Außerdem müssen Geschwindigkeitsgrenzwerte festgelegt werden, ab denen die Zeit als Wartezeit interpretiert wird (z. B. $v < 4$ km/h). Bei Daten, die aus einem RBL gewonnen werden, müssen Haltestellenaufenthaltszeiten eliminiert werden.

5.1.7 Kamerabasierte Erfassung momentaner Messgrößen

Erfasste Kenngrößen

- Verkehrsstärke [Kfz/h]
- Momentane Geschwindigkeit [km/h]
- Rückstaulänge [m]
- Fahrzeuganzahl [-] (daraus Verkehrsdichte [Kfz/km])

Erfassungsmethode

Die Erfassung momentaner Messgrößen entspricht, im Gegensatz zur lokalen querschnittsbezogenen Messung, der räumlichen Auswertung eines Strecken- oder Netzabschnitts. Für Letzteres ist die Beobachtung von einem sehr hoch positionierten Punkt, wie zum Beispiel einem Hubschrauber oder einem Ballon, notwendig. Streckenabschnitte hingegen lassen sich bereits von einem Masten aus erfassen. Die Besonderheit bei der Erfassung momentaner Messgrößen ist, dass das beobachtete Streckenintervall groß ist und simultan beobachtet wird. So findet die Messung der Geschwindigkeit mit Doppelinduktionsschleifen erst statt, nachdem das Zeitintervall vergangen ist, das notwendig ist, um den Abstand zwischen den beiden Induktionsschleifen zu überwinden - also nicht simultan. Im Rahmen der Begrifflichkeit einer sogenannten momentanen Messung ist zu beachten, dass der hier vorgestellte Ansatz kontinuierlich über die Zeit hinweg, Werte erfasst und somit weit mehr als eine einzelne momentane Messung darstellt.

Die automatische Auswertung eines räumlichen Abschnitts ist erst umsetzbar seitdem die computergestützte Bildverarbeitung diese Möglichkeit bietet und somit Videokameras als Detektoren verwendet werden können. Im Rahmen des Projekts ORINOKO (www.orinoko.info)

wird diese Technik derzeit eingesetzt und weiterentwickelt und ermöglicht die gleichzeitige Erfassung der Fahrzeuganzahl, der Geschwindigkeit und der Rückstaulängen auf bis zu sechs Fahrbahns Spuren [ORINOKO 2008]. Einer der Hauptvorteile wird dabei in dem flexiblen und preiswerten Einsatz der Videodetektoren gesehen.

Datenqualität

Laut ORINOKO [2008] bewegt sich die Datenqualität der durch Videodetektion erfassten Größen im Bereich der konventionellen Induktionsschleifen.

Aussagekraft

Die Aussagekraft der erfassten Messgrößen zur Beurteilung der Verkehrsqualität ist als hoch zu bewerten. Im Gegensatz zur klassischen Querschnittserfassung erhalten die Messwerte eine räumliche Aussagekraft. Die direkte und automatische Erfassung von Rückstaulängen ist eine besondere Eigenschaft dieser Messsysteme und bildet einen direkten Zusammenhang zur Qualität des Verkehrsablaufs an einem Knotenpunkt. Im Idealfall, das heißt, wenn das gesamte Netz aus hoher Position beobachtet und rechenleistungstechnisch ausgewertet werden könnte, entspräche diese Messmethode der Erfassung der Trajektorien aller Verkehrsteilnehmer.

Erhebungsaufwand

Permanent installierte Systeme verursachen für die Datenerfassung keinen zusätzlichen Aufwand, lediglich das Auslesen der Daten kann im Einzelfall mit Personalaufwand oder mit Kosten für eine Schnittstelle verbunden sein. Der Einsatz temporärer Messsysteme erfordert, wie auch der Einsatz automatischer Kennzeichenerfassungssysteme, Personal zur Beaufsichtigung und zum Auf- beziehungsweise Abbau der Systeme. Darüber hinaus entstehen Kosten für die Messgeräte selbst.

Auswertungsaufwand

Abhängig vom Verwendungszweck müssen unterschiedlich komplizierte Algorithmen zur Auswertung und Aufbereitung zur Verfügung stehen. Sollen lediglich Ganglinien erstellt werden ist die Aufbereitung weniger komplex, als wenn eine Messwertpropagierung in einem Verkehrsnetz durchgeführt wird. In jedem Fall müssen die Rohdaten einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden.

5.1.8 Abgeleitete Kenngrößen

5.1.8.1 Rückstauschätzer

Die Länge des Rückstaus in einer Knotenpunktzufahrt ist insbesondere bei begrenzter Aufstellfläche von Bedeutung. Sie kann mit den vorhandenen Detektoren in der Regel nicht direkt erfasst werden. Aus der Dauerbelegung eines Detektors lässt sich jedoch zumindest

folgern, dass der Rückstau sich über den entsprechenden Querschnitt hinaus erstreckt. Eine Überwachung des zur Verfügung stehenden Stauraumes lässt sich somit durch den Einbau von Detektoren am Stauraumende realisieren.

Geeignete Verfahren ermöglichen eine Abschätzung des Rückstaus unter Verwendung vorhandener (haltelinienennaher bzw. -ferner) Detektoren.

Kimber-Hollis haben eine Formel entwickelt, mit der sich bei Kenntnis der Grünzeiten der Signalgruppen und unter Verwendung der Informationen zur Verkehrsstärke an einem haltelinienfernen Detektor die Rückstaulänge abschätzen lässt [Kimber-Hollis 1979].

Sind haltelinienferne, nicht überstaute Detektoren in der Knotenpunktzufahrt vorhanden, an denen die Überfahrtzeitpunkte von Einzelfahrzeugen erfasst werden können, so kann der Rückstau unter Verwendung eines Warteschlangenmodells abgeschätzt werden [Reußwig 2005].

Im Forschungsprojekt MOBINET wurde ein Rückstauschätzer entwickelt, der die Informationen halteliniennaher Schleifen nutzt und anhand von Detektorflanken und Signalisierungszuständen auf die Staulänge vor der Haltelinie schließt. Er ermöglicht es, Rückstaulängen bis zu 250m mit hoher Genauigkeit zu erkennen [Mück 2002].

5.1.8.2 Mittlere Wartezeit der Fußgänger

Während Kraftfahrzeuge über Detektoren im Straßenraum sowohl in den Zu- als auch den Ausfahrten des Knotenpunktes gut erfasst werden können, liegen für die Fußgänger (und ggfs. Radfahrer) in der Regel keine oder nur wenige (Zeitpunkt der Anforderung) Informationen vor. Es ist jedoch in der Regel davon auszugehen, dass die Menge wartender Fußgänger an einer Fußgängerfurt während der nächsten Freigabezeit vollständig abgewickelt werden kann.

Gemäß [HBS 2001] kann die mittlere Wartezeit für Fußgänger abgeschätzt werden zu

$$w = \frac{t_s^2}{2 \cdot t_u}$$

mit

w mittlere Fußgängerwartezeit in [s]

t_s Sperrzeit in [s]

t_u Umlaufzeit in [s].

Dies gilt jedoch nur bei Vorliegen eines Festzeitsignalprogramms und einer zufälligen Ankunft der Fußgänger an der Furt.

Liegen diese Voraussetzungen nicht vor, so kann die mittlere Wartezeit ggfs. aus der Signalzeitenmitschrift über eine Bildung von Mittelwerten über Zeitintervalle abgeschätzt werden [Reußwig 2005].

5.1.8.3 Streckenfahrzeit aus Kennzeichenerfassungssystemen

Abhängig von den Rahmenbedingungen der mit Kennzeichenerfassungssystemen beobachteten Relationen und eventuell zusätzlich vorhandenen Messwerten ist es möglich weitere Kenngrößen aus den Fahrzeitmessungen abzuleiten.

Eine Streckenfahrzeit, also die Fahrzeit auf einem Teilabschnitt der betrachteten Relation lässt sich ebenfalls durch die Verwendung einzelner Trajektorien aus einem Messfahrzeug unterstützen. Aufgrund der bekannten Teilfahrzeiten des Messfahrzeugs ist es möglich die Gesamtfahrzeit auf einzelne Abschnitte herunter zu brechen und in den unbekanntem Zwischenzeiträumen zu interpolieren. Liegen lokale Geschwindigkeiten auf Abschnitten der Fahrtbeziehung vor, so können auch diese zur Aufteilung der Gesamtfahrzeit beitragen. Die Qualität der auf diese Weise erlangten Teilfahrzeiten hängt dabei von der Länge der beobachteten Relation und der zeitlichen Auflösung der zur Verfügung stehenden Trajektorien ab.

5.1.8.4 Anzahl Halte aus Kennzeichenerfassungssystemen

Auf kurzen Relationen, das heißt über eine geringe Anzahl Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen hinweg, lässt sich die zusätzliche Anzahl Halte eines Teils der Verkehrsteilnehmer ableiten, wenn sich mehrere Gruppen an Fahrzeiten bilden. Zur Verdeutlichung dienen die in Abbildung 40 dargestellten Fahrzeiten. Hier sind die Einzelmessungen, die in die Klasse von 0-1 „Halte“ fallen mit gelben Quadraten und die die in die Klasse von 1-2 „Halte“ fallen mit grünen Dreiecken hervorgehoben. Der Begriff Halte ist dabei so zu verstehen, dass es sich tatsächlich um zusätzliche Umläufe handelt, die mit großer Wahrscheinlichkeit in mindestens ebenso vielen zusätzlichen Halten resultieren.

Die Trennung basiert in diesem Fall auf einer Wunschfahrzeit und der aktuellen Umlaufzeit, die um 14:00 Uhr von 75s auf 90s umgestellt wird. Die Freigabezeitanteile und die Grundwartezeit steigen dadurch. Dies hat bei den niedrigen Belastungen vor der Nachmittagsspitze zur Folge, dass die ursprünglich getrennten Punktwolken zusammenfallen und etwas höher liegen. Die steigenden Belastungen ab ca. 15:30 Uhr verursachen wiederum die Bildung einer neuen Punktwolke, die für diese Einzelmessungen einen weiteren Umlauf und wahrscheinlich einen zusätzlichen Halt bedeutet. Bei konstanter Umlaufzeit besteht also ein direkter Zusammenhang zwischen der Anzahl Halte und der Fahrzeit und damit auch der Verlustzeit.

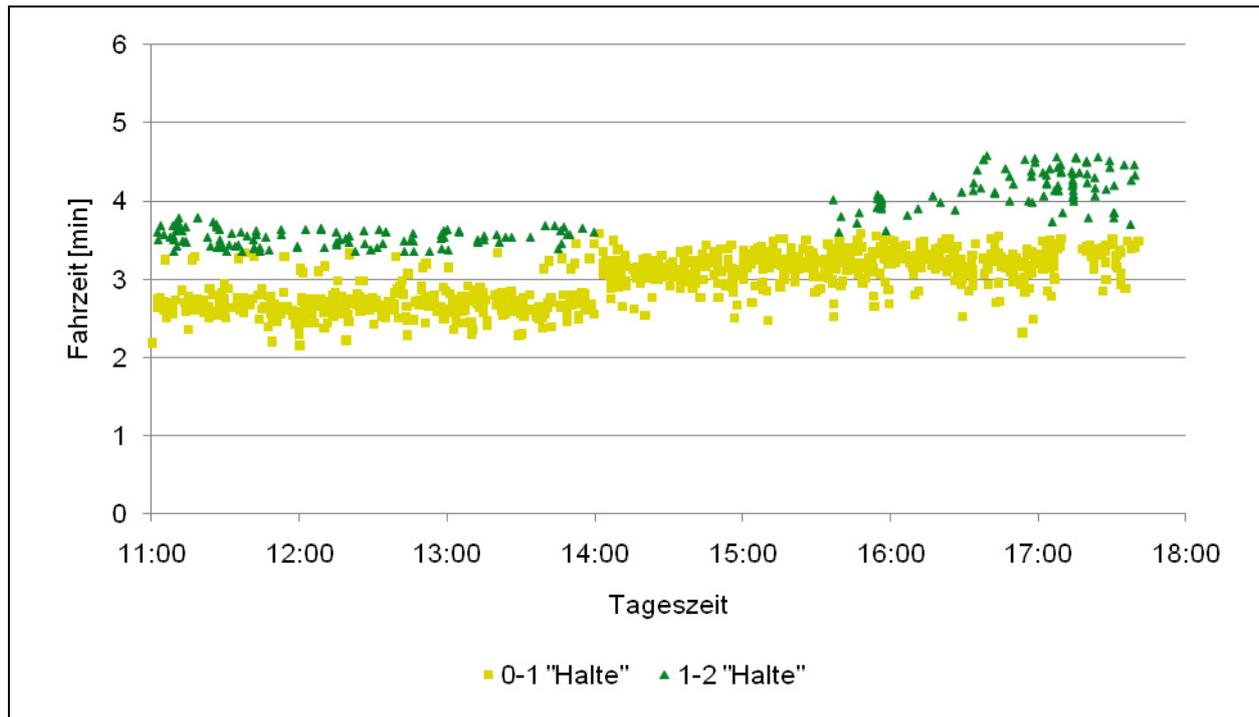


Abbildung 40: Gemessene Fahrzeiten klassifiziert nach Haltegruppen am 3.6.2009 von Messquerschnitt 1 nach Messquerschnitt 3 in Hamburg.

Zur Ableitung der Anzahl Halte ist es hilfreich die Umlaufzeiten der Lichtsignalanlagen entlang der beobachteten Relation zu kennen. Zu beachten ist, dass die verschiedenen Abstufungen stärker verwischen, wenn die betrachtete Fahrtbeziehung länger ist und dadurch auch gleichzeitig eine Zuordnung zu einzelnen Knotenpunkten schwieriger wird. Die räumliche Zuordnung zu einzelnen Knotenpunkten kann dabei mit der Unterstützung von FCD ermöglicht beziehungsweise verbessert werden.

5.1.8.5 Mittlere Reisegeschwindigkeit aus Fahrzeiten

Die mittlere Reisegeschwindigkeit [Brilon 2007, S. 25]

$$V_R = \frac{3,6 \cdot N \cdot L}{\sum_{i=1}^N t_{R,i}}$$

mit

V_R Mittlere Reisegeschwindigkeit [km/h]

N Anzahl der Messfahrten [-]

L Länge des untersuchten Straßenzuges [m]

$t_{R,i}$ Gesamtfahrzeit der Messfahrt i [s]

eignet sich zur Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Strecken und Relationen. Hier ist zu beachten, dass diese Möglichkeit nur besteht, wenn identische oder zumindest ähnliche freie Geschwindigkeiten auf den betrachteten Strecken vorliegen. Ist diese Notwendigkeiten nicht

gegeben, so muss die mittlere Reisegeschwindigkeit auf die freie Geschwindigkeit normiert werden.

5.1.8.6 Verlustzeirate aus Fahrzeiten

Die Verlustzeirate [Brilon 2007, S. 23]

$$t_{\text{Verlust}} = \frac{(T_{R,\text{aktuell}} - T_{R,\text{akzeptabel}})}{L}$$

mit

t_{Verlust}	Verlustzeirate [min/km]
$T_{R,\text{aktuell}}$	Aktuelle Fahrzeit [min]
$T_{R,\text{akzeptabel}}$	Akzeptable Fahrzeit [min]
L	Länge der Strecke [km]

„beschreibt den Unterschied zwischen der erwarteten und der tatsächlichen Qualität des Verkehrsablaufs einer Verkehrsanlage.“ Die akzeptable Fahrzeit kann dabei, um einen deterministischen Vergleichswert zugrunde zu legen, zum Beispiel über den Anteil der mittleren Reisegeschwindigkeit an der zulässigen Höchstgeschwindigkeit mit QSV A (Tabelle 18) und die mittleren Wartezeiten an den Knotenpunkten mit QSV A (Tabelle 17) angesetzt werden.

5.1.8.7 Gesamtverlustzeit aus Fahrzeiten und Verkehrsstärken

Die Gesamtverlustzeit [Brilon 2007, S. 23]

$$T_{\text{Verlust}} = t_{\text{Verlust}} \cdot q \cdot L \cdot \frac{1}{60}$$

mit

T_{Verlust}	Gesamtverlustzeit [Kfz·h]
t_{Verlust}	Verlustzeirate [min/km]
Q	Fahrzeugzahl, die sich im Streckenabschnitt befinden [Kfz]
L	Länge der Strecke [km]

summiert die staubedingten Zeitverluste aller Verkehrsteilnehmer eines Netzes oder einer Verkehrsanlage auf und ist somit ein wesentliches Maß für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen in Form von Nutzen-Kosten-Analysen. Für die Gesamtverlustzeit eines Verkehrsnetzes werden dabei die Verlustzeiten der Einzelanlagen aufaddiert. Bei konstanter Umlaufzeit korreliert die Gesamtverlustzeit mit der Anzahl Halte aller Verkehrsteilnehmer.

5.1.8.8 Bufferindex aus Fahrzeiten

Der Bufferindex [Brlon 2007, S. 30]

$$BI_i = \frac{T_{P95,i} - T_{mittel,i}}{T_{mittel,i}}$$

mit

BI_i Bufferindex im Intervall i [%]

$T_{P95,i}$ 95-Perzentil der Fahrzeit im Intervall i [min]

$T_{mittel,i}$ Mittlere Fahrzeit auf dem Streckenabschnitt im Intervall i [min]

entspricht dem Zeitzuschlag in Prozent zur durchschnittlichen Fahrzeit, der gewählt wird, um ein pünktliches Erreichen des Fahrtzieles sicher zu stellen. Der Bufferindex spiegelt die Zuverlässigkeit einer Verkehrsanlage wider.

5.1.9 Modellbasierte Erfassung der Kenngößen (Simulationen)

Erfasste Kenngößen

In der Simulation können, je nach verwendetem Tool, in der Regel folgende Kenngößen in unterschiedlicher Differenzierung erfasst werden:

- Fahrzeiten
- Verlustzeiten
- Verkehrsstärken (an den Zuflüssen und an frei wählbaren Querschnitten im Netz)
- Staulängen
- Anzahl der Halte
- LSA-Freigabezeitverteilungen
- LSA-Signalumschaltungen
- LSA-Detektoranforderungen / -belegungen
- Anzahl der Fahrstreifenwechsel
- ÖPNV-Wartezeiten
- Emissionen

Erfassungsmethode

Für die modellbasierte Erfassung von verkehrlichen Kenngößen innerorts empfiehlt sich, aufgrund der Bedeutung der Interaktion zwischen den Fahrzeugen, die Verwendung einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. In dieser können im Grunde die gleichen Daten erhoben werden wie in der Realität. Dies kann für ausgewählte Strecken, Routen und Fahrzeuge im Netz oder für das gesamte Netz geschehen. Zusätzlich können in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation auch unterschiedliche Szenarien betrachtet werden.

Dazu muss das Netz, inklusive der Verkehrsnachfrage und der Steuerungen des Verkehrs, allerdings in der Simulationsumgebung aufgebaut werden. Zur Ermittlung belastbarer Kenngrößen sollte die Simulation anschließend kalibriert und validiert werden. Die Erfassung geschieht in der Regel über virtuelle Messquerschnitte (Querschnittszählungen, Fahrzeitmessungen, ...) oder über Einzelfahrzeugbetrachtungen (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Fahrzeit, ...). Die Daten der Steuerung (Detektorbelegung, Signalgruppenzustände, ...) können ebenfalls mitgeschrieben werden.

Die in AMONES eingesetzte Mikrosimulationsumgebung VISSIM verfügt zudem über ein Modul, mit dem Kraftstoffverbräuche und Emissionen berechnet werden können.

Datenqualität

Messfehler treten in der Simulation nicht auf, so dass die in der Simulation erhobenen Daten grundsätzlich eine sehr hohe Qualität aufweisen.

Aussagekraft

Die Aussagekraft mittels Simulation gewonnener Daten hängt davon ab, wie gut die Realität in der Simulation nachgebildet werden kann. Besonders die Anpassung der Verkehrsnachfrage sowie die geeignete Wahl der Parameter für das Verkehrsmodell gestalteten sich dabei meist aufwändig. Zudem ist die Aussagekraft eines einzelnen Simulationslaufes sehr begrenzt, so dass in der Praxis immer mehrere Simulationsläufe durchgeführt und betrachtet werden sollten. In „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ [FGSV, 2006b] werden die zu beachtenden Punkte beim Netzaufbau, sowie bei der Kalibrierung und Validierung der Verkehrsnachfrage ausführlich beschrieben.

Erhebungsaufwand

Für die Erhebung von Daten mittels Simulation ist der Aufbau des Netzes sowie die Kalibrierung und Validierung der Verkehrsnachfrage und des Verkehrsmodells nötig. Der Aufwand hängt hierbei von der Struktur des Netzes und von den zu untersuchenden Szenarien ab. Des Weiteren ist die Steuerung (z. B. LSA-Steuerung) im Netz zu versorgen. Auch hier hängt der Aufwand von der Komplexität der zu versorgenden Steuerung ab. Ist das Netz inklusive der Verkehrsnachfrage und Steuerung in der Simulation versorgt können beliebig viele Erhebungen (Simulationsdurchläufe) durchgeführt werden um eine statistische Sicherheit zu erhalten.

Auswertungsaufwand

Die verschiedenen, in der Simulationsumgebung enthaltenen Auswertungstypen und Datenausgaben erlauben relativ einfach vielfältige und umfangreiche Datenauswertungen.

Um Ausgabedaten zu erzeugen, muss in VISSIM die zugehörige Option aktiviert werden. Die Ausgabe der Daten erfolgt je nach Auswertungstyp in einem Bildschirmfenster (z. B. Signalzeitenpläne), als Textdatei oder als Datenbank-Tabelle. Manche Auswertungstypen bieten mehrere Möglichkeiten.

Zusätzlich stehen in VISSIM Filter zur Auswahl, die die Auswertung zeitlich, räumlich (Strecke, Knotenpunkt, Netz) und für einzelne Fahrzeuge oder Fahrzeuggruppen erlauben.

Die Textdateien können in der Regel ohne Probleme in Tabellenkalkulationsprogramme wie z. B. Microsoft Excel importiert und für weitere Berechnungen oder grafische Darstellungen verwendet werden. [PTV, 2008]

5.1.10 Verfahren zur Beurteilung der Qualität

Die Beurteilung der Qualität von Verkehrsanlagen kann relativ oder absolut erfolgen. Eine absolute Bewertung, wie sie das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [FGSV 2002] vorschlägt, orientiert sich zum Beispiel an Geschwindigkeiten oder Wartezeiten. Dies hat zur Folge, dass eine sinnvolle Vergleichbarkeit derselben Kenngröße zwischen verschiedenen Verkehrsanlagen nicht immer gewährleistet ist. Bei einer relativen Bewertung werden die Kenngrößen in irgendeiner Weise normiert, zum Beispiel auf eine streckenabhängige akzeptable Geschwindigkeit, wodurch die Vergleichbarkeit sichergestellt wird.

Zur Beurteilung der Qualität eines Knotenpunktes schlägt das HBS [FGSV 2002, Kap. 6 S. 8-10 und Kap. 7 S. 11-12] die Verwendung von mittleren Wartezeiten vor. Darüber hinaus können weitere Kenngrößen, wie zum Beispiel Anzahl der Fahrzeuge im Stau, Anzahl der Haltevorgänge oder der Sättigungsgrad mit einfließen. Tabelle 17 zeigt die Einstufung in Qualitätsstufen des Verkehrs (QSV) in Abhängigkeit der mittleren Wartezeit. Diese Daten können aus den Trajektorien von Messfahrzeuge generiert und gegebenenfalls durch Fahrzeitmessungen aus Kennzeichenerfassungssystemen ergänzt werden. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Rahmenbedingungen (Verkehrsmittel, mit/ohne LSA, mit/ohne Koordinierung) erlaubt, im Gegensatz zur absoluten mittleren Wartezeit, eine Vergleichbarkeit der QSV zwischen verschiedenen Knotenpunkten.

QSV	Zulässige mittlere Wartezeit [s]
	Kraftfahrzeugverkehr (nicht koordinierte Zufahrten)
A	<=20
B	<=35
C	<=50
D	<=70
E	<=100
F	>100

Tabelle 17: Qualitätsstufen für den Kraftfahrzeugverkehr an nicht koordinierten Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage [HBS 2002, Kap. 6 S. 9].

In Kap. 8 auf Seite 3 des HBS erfolgt der Hinweis, dass die Verkehrsqualität auf Hauptverkehrsstraßen im Wesentlichen durch die benachbarten Knotenpunkte bestimmt wird und derzeit

untersucht wird, inwieweit die Verkehrsdichte, die mittlere Reisegeschwindigkeit oder andere Kenngößen zur Beschreibung der Qualität geeignet sind.

Nach Brilon [2007, S. 18] ist bei der Beurteilung von Straßenverkehrsanlagen im Überlastfall Vorsicht geboten, da gemessene Verkehrsstärken für eine Auslastung größer 1 nicht mehr der tatsächlichen Nachfrage entsprechen. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen [Brilon 2007, S. 22 ff.], dass sich Fahrzeiten und Geschwindigkeiten, insbesondere im Überlastfall als Kenngößen zur Beurteilung der Qualität einer Verkehrsanlage eignen und „als maßgebendes Qualitätskriterium für Hauptverkehrsstraßen mit Berücksichtigung der Knotenpunkte“ (S. 25) zu betrachten sind.

Zur Beurteilung der Qualität auf Hauptverkehrsstraßen besteht die Möglichkeit QSV über den Anteil der mittleren Reisegeschwindigkeit an der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu vergeben (Tabelle 18). Die Berücksichtigung unterschiedlicher Anteile und Geschwindigkeiten machen diese QSV zu einer relativen Bewertung. Die dafür notwendigen Daten können aus Induktionsschleifen gewonnen und durch Fahrzeiten aus Kennzeichenerfassungssystemen in Verbindung mit FCD-Daten ergänzt werden.

QSV	Anteil der mittleren Reisegeschwindigkeit an der zulässigen Höchstgeschwindigkeit		
	50 km/h	60 km/h	70 km/h
A	$\geq 0,8$	$\geq 0,83$	$\geq 0,86$
B	$\geq 0,6$	$\geq 0,58$	$\geq 0,57$
C	$\geq 0,5$	$\geq 0,42$	$\geq 0,43$
D	$\geq 0,4$	$\geq 0,33$	$\geq 0,36$
E	$\geq 0,3$	$\geq 0,25$	$\geq 0,21$
F1	$\geq 0,2$	$\geq 0,17$	$\geq 0,14$
F2	$\geq 0,15$	$\geq 0,13$	$\geq 0,11$
F3	$\geq 0,1$	$\geq 0,08$	$\geq 0,07$
F4	$< 0,1$	$< 0,08$	$< 0,07$

Tabelle 18: Qualitätsstufen auf Hauptverkehrsstraßen in Abhängigkeit von der mittleren Reisegeschwindigkeit (Brilon 2007, S. 41).

Die Erhebung und Berücksichtigung von FCD und Fahrzeiten zur Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs oder zur Identifikation kritischer Streckenabschnitte deckt sich auch mit den Erkenntnissen von Pohlmann, Hoffner und Kutzner [2008] zum Qualitätsmanagement von Lichtsignalanlagen.

Die Beurteilung der Qualität eines Verkehrsnetzes insgesamt kann über die mittleren Fahrzeiten, beziehungsweise die mittleren Reisegeschwindigkeiten und die Anzahl Halte entlang der durch Kennzeichenerfassungssystemen gemessenen Relationen und FCD-Daten erfolgen. Mittlere Fahrzeiten sind für die Verkehrsteilnehmer nachvollziehbar und greifbar, haben aber den Nachteil, dass diese absoluten Größen keinen Vergleich zwischen verschiedenen Strecken oder Relationen zulassen. Hierfür ist die mittlere Reisegeschwindigkeit (Kapitel 5.1.8.5) besser geeignet. Zur weiteren Beurteilung eignen sich nach Brilon [2007, S. 23 ff.] außerdem:

- Die Verlustzeitrate (siehe auch Kapitel 5.1.8.6)
- Die Gesamtverlustzeit (siehe auch Kapitel 5.1.8.7)
- Der Bufferindex (siehe auch Kapitel 5.1.8.8)

Zur Umrechnung von Verlustzeiten in einen monetären, für die Volkswirtschaft greifbaren Wert gibt es sogenannte Zeitkostensätze. Diese beschreiben den Zusammenhang von Zeit, Fahrzeugtyp und Kosten und berücksichtigen dabei die unterschiedlichen Faktoren wie zum Beispiel den Zweck der Fahrt, das Einkommen des Verkehrsteilnehmers, der Reiseweite und anderen Parametern (siehe dazu Tabelle 19). Die auf diese Weise erhaltene relative Größe erlaubt den Vergleich verschiedener Szenarien und Verkehrsanlagen.

Fahrzeuggruppe Kfz	Zeitkostensätze [€/(Kfz/h)]	
	Normalwerktags Urlaubwerktags	Sonntags
PKW	5,50	2,75
LKW	21,00	21,00
Lastzug	30,00	30,00
Bus	62,50	62,50

Tabelle 19: Zeitkostensätze nach Fahrzeuggruppen nach EWS (Brilon 2007, S. 75).

5.1.11 Allgemeine Empfehlungen zur Erfassung von verkehrlichen Kenngößen

Nach derzeitigem Erkenntnisstand bieten sich drei Strategien zur Erfassung der verkehrlichen Kenngößen an. Sie unterscheiden sich in den Kosten und der Aussagekraft.

Strategie 1: Kenngößen aus einer Verkehrslageschätzung

In einigen Städten ermittelt eine Verkehrsmanagementzentrale kontinuierlich die Verkehrslage im Hauptstraßennetz. Liegen für alle relevanten Strecken eines Untersuchungsgebiets Kenngößen aus einer Verkehrslageschätzung vor (Verkehrsstärke, Fahrzeit, Level of Service), dann bieten diese Daten eine preiswerte Möglichkeit zur Qualitätsbeurteilung.

Strategie 2: Fahrzeugflotte ohne festes Messprogramm

Eine preiswerte Möglichkeit der Qualitätserfassung besteht darin, eine größere Zahl von privaten Fahrzeugen (10 bis 100) mit GPS-Geräten auszustatten und diese Daten auszuwerten. Dazu müssen geeignete EDV-affine Probanden (z. B. städtische Angestellte, Staumelder) im Untersuchungsgebiet rekrutiert werden. Die Kosten für die GPS-Geräte sind gering (ca. 100 € pro Gerät), so dass die Gerätekosten kaum ins Gewicht fallen. Allerdings ist eine Betreuung der Probanden mit Aufwand verbunden.

Strategie 3: Geplantes Messprogramm

Bei dieser Strategie werden drei Datenquellen fusioniert:

1. Verkehrsstärken aus lokalen Detektoren:
Diese Daten liefern die Informationen über die Grundgesamtheit der durchgeführten Fahrten.
2. Fahrzeugtrajektorien aus Messfahrten
Die Fahrzeugtrajektorien liefern alle wesentlichen Kenngößen für die Qualitätsbeurteilung einer LSA Steuerung (Fahrzeit, Wartezeit, Anzahl Halte)
3. Fahrzeitmessungen aus Kennzeichenerfassungssystemen
Um das Problem der kleinen Stichprobengröße bei den Messfahrten zu lösen, werden die Fahrzeugtrajektorien mit den Fahrzeitmessungen kombiniert.

Im Projekt AMONES kommt Strategie 3 für die Datenerfassung zur Anwendung. Im Nachfolgenden wird untersucht, ob die weniger aufwändige Strategie 2 oder reduzierte Varianten der Strategie 3 in den Testfeldern zu belastbaren Ergebnissen führen würden, um abschließend eine Empfehlung zu formulieren. Auf Strategie 1 wird nicht weiter eingegangen, da diese Variante zwar gegeben sein kann, sich ansonsten aber keinesfalls für eine einzelne Untersuchung eignet beziehungsweise umsetzbar wäre.

5.1.11.1 Analyse der Messprogramme basierend auf dem notwendigen Stichprobenumfang

Statistische Grundlagen

Bei den meisten Verkehrserhebungen ist es lediglich möglich eine Stichprobe der Grundgesamtheit zu ziehen (zum Beispiel Umfragen bezüglich des Quell- oder Zielverkehrs, zur Moduswahl, Erhebungen von Fahrzeiten, Befahrungen, usw.). Abhängig von der Wahrscheinlichkeitsverteilung der zu erhebenden Kenngröße und der gewünschten Genauigkeit der Untersuchung, lässt sich mit Hilfe der Stochastik eine erforderliche Stichprobengröße berechnen (siehe auch Schnabel und Lohse [1997, S. 124-129] oder Sachs [1997, Kap. 13]).

Für die Analyse sind die folgenden Größen von Bedeutung:

N	Umfang der Grundgesamtheit
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit
n	Umfang der Stichprobe
d_r	Relativer Fehler der Stichprobe
k	Genauigkeitsfaktor, der von der statistischen Sicherheit und dem Verteilungstyp abhängig ist
$V = \sigma/\mu$	Variationskoeffizient

Untersucht werden soll, wie viele Messfahrten n zur Erfassung der Fahrzeit erforderlich sind. Die Analyse stützt sich dabei auf der Annahme, dass die Grundgesamtheit N durch die von den ANPR-Systemen erfassten Fahrzeiten repräsentiert wird. Im Allgemeinen liegt der Anteil des auf diese Weise erkannten Durchgangsverkehrs und damit der Fahrzeiten bei über 60 %, was dazu führt, dass die Stichprobe der ANPR-Systeme als verlässlicher „Ersatz“ für die tatsächliche Grundgesamtheit dienen kann. Um die statistische Sicherheit weiter zu erhöhen werden nur Daten der vom Durchgangsverkehr stark befahrenen Hauptrelationen verwendet (siehe Kapitel 8.5.2.1 und 9.5.2.1 zur Definition dieser Hauptrelationen und die Kapitel 8.5.2 und 9.5.2 zu weiteren Details der Aufbereitung und Auswertung der Daten im Allgemeinen).

Nach Schnabel und Lohse [1997] ergibt sich der erforderliche Umfang der Stichprobe bei Vorgabe eines zulässigen relativen Fehlers zu:

$$n = \frac{k^2 \cdot \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 \cdot N}{k^2 \cdot \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 + (N - 1) \cdot d_r^2}$$

Der Genauigkeitsfaktor k ist Tabelle 20 zu entnehmen, wobei im Folgenden die statistische Sicherheit auf 95 % und der zulässige relative Fehler d_r auf 5 % festgelegt werden. Die zugrundeliegende Dichtefunktion ist, abhängig vom Untersuchungsraum, meist unbekannt beziehungsweise mehrgipflig.

Statistische Sicherheit S in [%]	Genauigkeitsfaktor k bei		
	Normalverteilung	Eingipfliger Verteilung	Unbekannter Verteilung
90	1,65	2,11	3,16
95	1,96	2,98	4,47
99	2,58	6,64	10,00

Tabelle 20: Genauigkeitsfaktoren für verschiedene Verteilungen und statistische Sicherheiten (nach Schnabel und Lohse [1997, S. 126]).

Die Dichtefunktion einer Normalverteilung, die im Folgenden als Vergleichsbasis verwendet wird, ergibt sich bei gegebenem Mittelwert und Standardabweichung zu [Sachs 1997, S. 109]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

mit

x Punkt oder Ereignis

$f(x)$ Wahrscheinlichkeitsdichte für x

Dichtefunktion und Wahl des Untersuchungsraumes

Die Wahl des von der Zielsetzung der Erhebung abhängigen Untersuchungsraumes hat (neben weiteren Einflussgrößen) entscheidenden Anteil auf die erforderliche Anzahl der Stichproben. Die zeitliche und räumliche Abgrenzung des Untersuchungsraums hängt dabei von der

Fragestellung ab, was und wie differenziert untersucht werden soll. Ist die mittlere Fahrzeit über einen Tag für einen ganzen Stadtteil von Bedeutung oder sollen - wie im Fall von AMONES - die mittleren Fahrzeiten für bestimmte Steuerungsverfahren, Relationen und Zeiträume erfasst werden?

Schnabel und Lohse [1997] sprechen hier von einer geschichteten Auswahl die jeweils eigene Erhebungen erfordert. Soll die Fahrzeit auf einer bestimmten Relation von 6:00-9:00 Uhr erhoben werden oder in Stundenblöcken geschichtet (6:00-7:00 Uhr, 7:00-8:00 Uhr und 8:00-9:00 Uhr)? Der zweite Fall lässt sich hier theoretisch als drei getrennte Erhebungen betrachten. In der Umsetzung wirkt sich dies derart aus, dass tatsächlich in beiden Fällen nur eine Erhebung stattfinden wird, für die geschichtete Betrachtung aber mehr Stichproben notwendig sein werden, wenn dieselbe Genauigkeit und statistische Sicherheit erreicht werden sollen. Im Gegenzug sind die gewonnenen Informationen feiner differenziert und erlauben dementsprechend eine detailliertere Beurteilung der Situation und gegebenenfalls verlässlichere Rückschlüsse zwischen Ursache und Wirkung.

In welcher Form die Wahl des Untersuchungsraumes die Dichtefunktion und damit Umfang, Mittelwert und Standardabweichung der Grundgesamtheit beeinflusst, soll an den in den beiden Testfeldern erhobenen ANPR-Daten verdeutlicht werden. Abbildung 41 zeigt die Schichtung der Untersuchungsräume im Projekt AMONES.

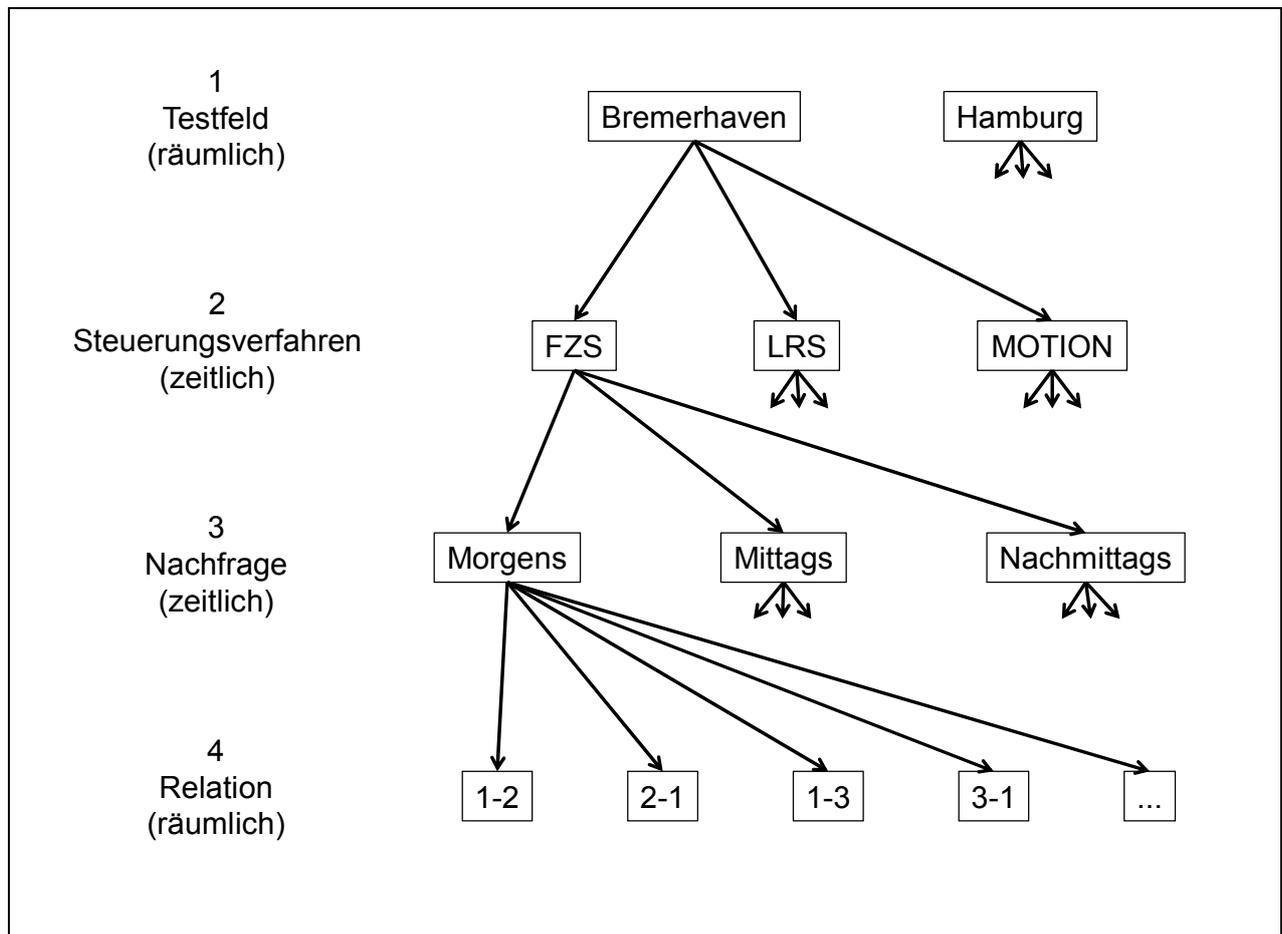


Abbildung 41: Schematische Schichtung der Untersuchungsräume im Projekt AMONES.

In den beiden Testfeldern Bremerhaven und Hamburg werden verschiedene, täglich wechselnde Steuerungsverfahren untersucht. Die ersten beiden Schichtungen nach Testfeld und Steuerungsverfahren sind offensichtlich und intuitiv aber zwingend notwendig, um eine Bewertung der verschiedenen Verfahren in den verschiedenen Testfeldern durchführen zu können.

Da die Verkehrsnachfrage nicht an allen Tagen vergleichbar ist, wird zudem eine weitere zeitliche Schichtung (3) durchgeführt. In der Abbildung ist diese vereinfacht mit den drei klassischen Gruppen „Morgens“, „Mittags“ und „Nachmittags“ dargestellt - die im Rahmen von AMONES verwendete Auswertungsmethodik führt eine Clusterung einzelner Stundenblöcke durch und ist noch feiner aufgeteilt (siehe Kapitel 5.1.12.3). Die vierte und letzte Schichtung nach Relationen dient zum Einen der detaillierteren Analyse der Wirkungen und zum Anderen einer korrekteren Bewertung, da auf diese Weise eine nach Verkehrsstärken gewichtete Zusammenfassung der erfassten Fahrzeiten möglich ist (Kapitel 5.1.12.3).

Abbildung 42 zeigt die Dichteverteilungen der ANPR-Fahrzeiten für das Testfeld Bremerhaven nach der zweiten Schicht, das heißt die Grundgesamtheiten sind lediglich zeitlich nach den aktiven Steuerungsverfahren und räumlich nach dem Testfeld Bremerhaven aufgeteilt.

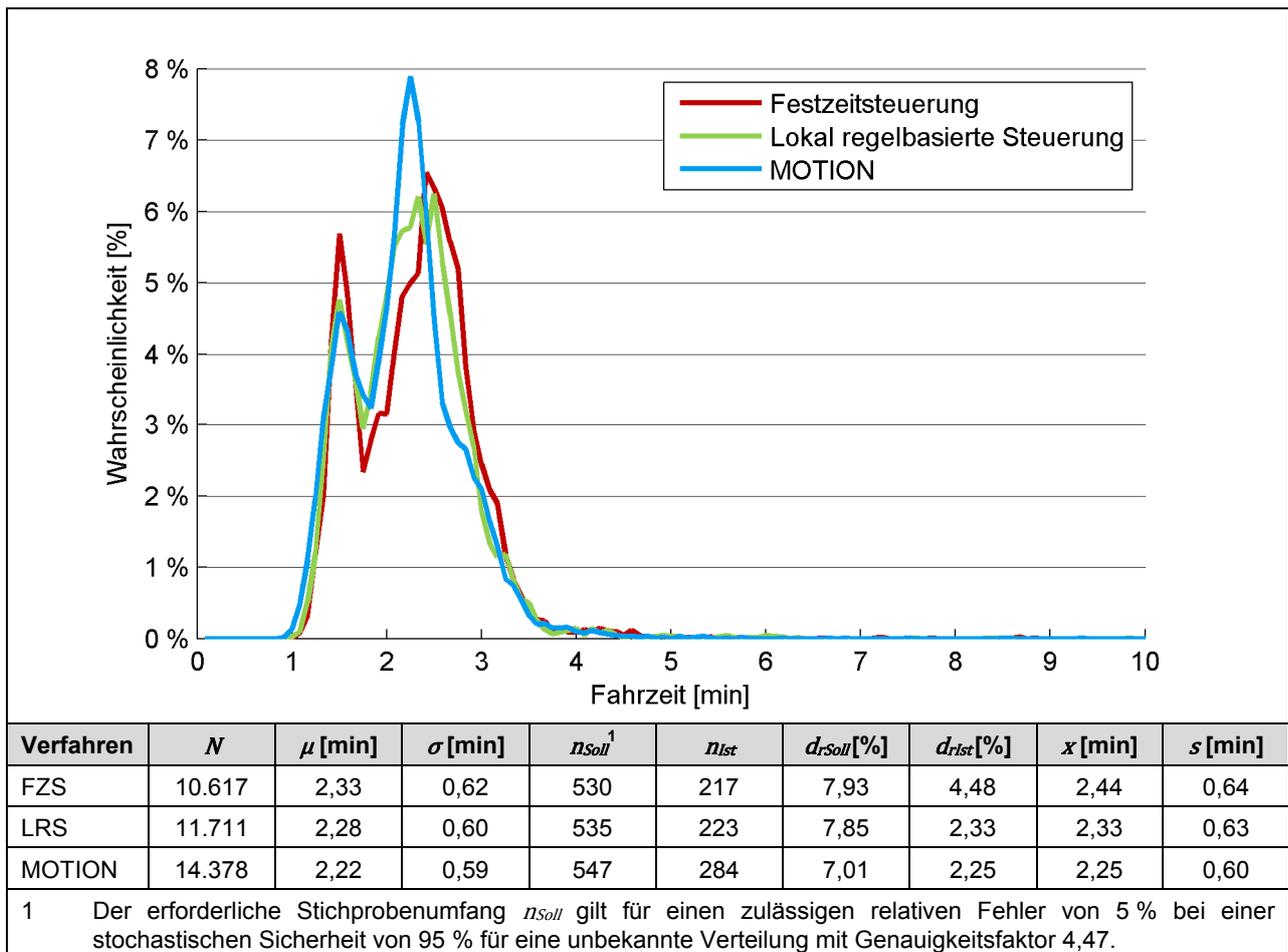


Abbildung 42: Dichtefunktionen nach Steuerungsverfahren in 5-Sekunden-Gruppen und deren stochastische Kenngrößen für eine Schichtung nach Steuerungsverfahren in Bremerhaven.

Auf diese Weise wäre keine Beurteilung der Verfahren auf bestimmten Relationen oder nach bestimmten Verkehrssituationen möglich. Die drei Funktionen sind offensichtlich weder normalverteilt noch eingipflig, so dass sich unter Verwendung der Parameter für eine unbekannte Verteilung nach Tabelle 20 die aufgeführten erforderlichen Fahrten n_{Soll} ergeben.

Die letzten fünf Spalten der stochastischen Kenngößen stellen die Ergebnisse für die tatsächlich im Testfeld Bremerhaven durchgeführten GPS-Messfahrten dar, wobei:

n_{ist}	Umfang der Stichprobe
d_{rSoll}	Geschätzter relativer Stichprobenfehler
d_{rIst}	Berechneter relativer Stichprobenfehler
\bar{x}	Mittelwert der Stichprobe
s	Standardabweichung der Stichprobe

Das heißt, obwohl die von einem Messfahrzeug durchgeführten Fahrten nur ca. die Hälfte der erforderlichen Fahrten betragen und damit einen relativen Fehler von ca. 7-8 % erreichen sollten, beträgt der tatsächliche Fehler nur ca. 2-4 %. Dies kann an mehreren Faktoren liegen. Zum Einen ist die Ziehung der Stichprobe nicht echt zufällig, da das Messfahrzeug über den Verlauf eines Tages hinweg Messfahrten aufzeichnet und deshalb eine in etwa gleichmäßige Ziehung über verschiedene Verkehrssituationen hin weg durchführt (auf diesen Punkt wird später noch detaillierter eingegangen). Zum Anderen, geht der Genauigkeitsfaktor k für eine unbekannte Verteilung vom „worst case“ aus (die Dichtefunktionen weisen durchaus ein Muster auf, lassen sich aber nach Tabelle 20 nicht anderweitig klassifizieren) und zu guter Letzt ist eine „glückliche“ Stichprobe der Messfahrzeuge möglich.

Die Dichtefunktionen nach der zweiten Schicht für das Testfeld Hamburg sind in Abbildung 43 dargestellt. Diese sind breiter und weisen eine größere Standardabweichung als in Bremerhaven auf. Deshalb ist, obwohl hier näherungsweise von einer eingipfligen Verteilung ausgegangen wird, eine größere Stichprobe erforderlich.

Die höheren Standardabweichungen gehen damit einher, dass die Nachfrage in Hamburg größer ist und demzufolge die beobachteten Verkehrslagen stärker schwanken. Ein wichtiger Unterschied, ist dass die Standardabweichung vom Steuerungsverfahren abhängt und diese großen Einfluss auf den erforderlichen Stichprobenumfang hat. Da der Einfluss des Steuerungsverfahrens a priori unbekannt ist, sollte hier für den erforderlichen Stichprobenumfang vom „worst case“ ausgegangen werden.

Abbildung 44 zeigt drei Dichtefunktionen und die zugehörigen Normalverteilungen (links in rot und blau), deren Grundgesamtheiten (rechts) und die stochastischen Kenngößen. Die Schichtung erfolgt nach Steuerungsverfahren, Relation und Tageszeit, wobei die jeweiligen Zeiträume von zwei Tagen enthalten sind und soll verdeutlichen, welchen Einfluss bestimmte Schwankungen im Verkehrsfluss auf die Dichtefunktion haben.

Die Dichtefunktionen der Normalverteilung zeigen, dass die erste Grundgesamtheit näherungsweise als normalverteilt bezeichnet werden kann. Die zugrundeliegenden

Einzelmessungen bewegen sich in einem engen Band um eine Fahrzeit von 3,04 Minuten. Es liegt keine Störung im Verkehrsfluss vor, was sich in einer sehr kleinen Standardabweichung von 0,19 Minuten und der normalverteilten Form widerspiegelt und zur Folge hat, dass eine sehr kleine Stichprobe von sechs Fahrten zur Beobachtung ausreichend ist. Trotzdem ist die tatsächliche Stichprobe von neun Fahrten mit einem relativen Fehler von 9,15 % etwas „unglücklich“.

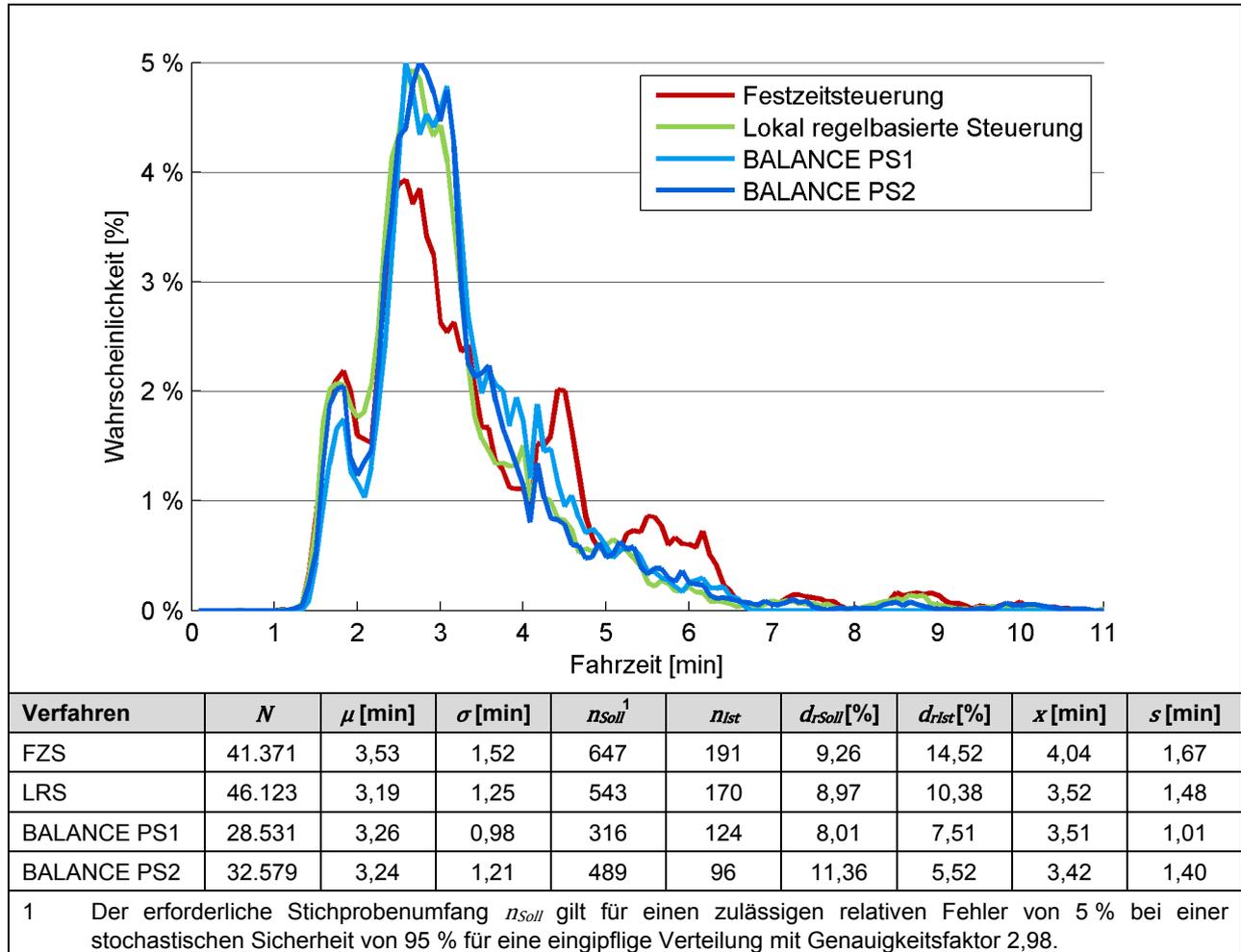


Abbildung 43: Dichtefunktionen nach Steuerungsverfahren in 5-Sekunden-Gruppen und deren stochastische Kenngrößen für eine Schichtung nach Steuerungsverfahren in Hamburg.

Die zweite Dichtefunktion entfernt sich von der Normalverteilung und kann lediglich noch als eingipflig bezeichnet werden. In den Einzelmessungen zeigt sich, dass eine Störung des Verkehrsflusses zwischen 11:00-11:30 Uhr enthalten ist - vermutlich Auswirkungen der Morgenspitze. Dies bedeutet, dass die beobachtete Verkehrslage im Vergleich zur ersten Erhebung stärker schwankt, sich dementsprechend auf Form und Standardabweichung der Dichtefunktion auswirkt und eine weitaus höhere Stichprobe von 172 erfordert.

Der dritte Untersuchungsraum umschließt eine Überlastungssituation, bei der sich die Fahrzeiten bis ca. 16:30 Uhr in zwei, durch die Umlaufzeit getrennte, Gruppen aufteilen und

einen steilen Anstieg der mittleren Fahrzeit im Zeitraum 16:30-17:30 Uhr. Das heißt, die Grundgesamtheit enthält zum Einen eine Störung, also unterschiedliche Verkehrslagen und zum Anderen eine Überlastung (erhöhte Streuung), die beide Auswirkungen auf Form und Standardabweichung der Dichtefunktion haben. Diese ist mehrgipflig oder multimodal [Sachs 1997, S. 155-158] oder nach Tabelle 20 als unbekannt zu klassifizieren, was die erforderliche Stichprobengröße noch weiter erhöht.

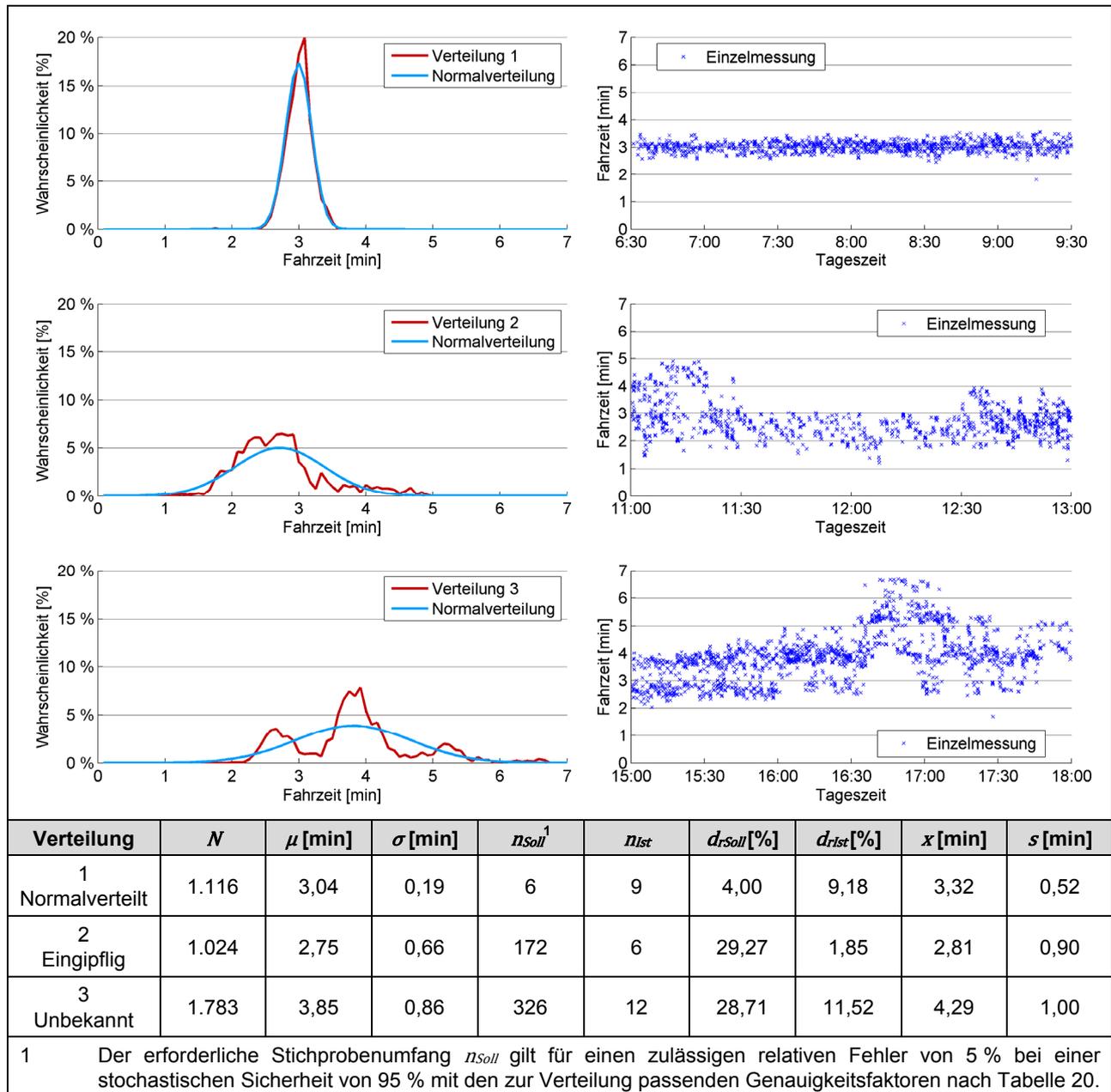


Abbildung 44: Dichtefunktionen und Normalverteilungen (links), dazugehörige Grundgesamtheiten (rechts) und deren stochastische Kenngrößen für Schichtungen mit verschiedenen Charakteristika.

Erste Schlussfolgerungen

Die eingangs betrachteten Schichtungen nach Steuerungsverfahren ohne Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage sind im Allgemeinen nicht ausreichend. Da die Verkehrsnachfrage im Verlauf eines Tages schwankt und damit unterschiedliche Verkehrslagen zur Folge hat (selbst eine Festzeitsteuerung wird im Allgemeinen tageszeitabhängig geschaltet), sollte zumindest eine weitere zeitliche Schichtung nach den klassischen Blöcken „Morgens“, „Mittags“ und „Nachmittags“ erfolgen. Eine feinere zeitliche Aufteilung nach Stunden oder eine räumliche Aufteilung nach Relationen wie in AMONES ist nicht zwingend notwendig, wenn die Verkehrsnachfrage in den klassischen Blöcken bekannt und stabil (im Sinne von sich täglich wiederholend) ist und keine differenzierte Betrachtung der einzelnen Relationen erfolgen soll. Voraussetzung hierfür ist, dass die erfassten Relationen aussagekräftig für die Bewertung sind und eine ähnliche Fahrzeit aufweisen, da ansonsten die Zahl der Gipfel in der Dichtefunktion und die Standardabweichung der Stichprobe steigen und eine weitere Schichtung empfehlenswert ist.

Der Zeitraum, in dem die erforderliche Stichprobe erhoben wird, ist nicht von Bedeutung, solange sichergestellt ist, dass zufällige Ereignisse (zum Beispiel Unfälle) erkannt und aus der Bewertung ausgeschlossen werden. Es spielt keine Rolle ob ein einzelnes Messfahrzeug über zehn Tage morgens zehn Fahrten aufzeichnet oder zehn Messfahrzeuge an einem Morgen zusammen einhundert Fahrten. Ähnlich wie bei der räumlichen Wahl der Relationen, sollten die Stichproben im Idealfall zufällig über den Untersuchungsraum verteilt sein - das heißt, zum Beispiel, dass nicht alle Messfahrten um Punkt 8:11 Uhr beginnen sollten. Der meist theoretische Aspekt, dass zu viele (zusätzliche) Messfahrzeuge den Verkehr aufgrund der gestiegenen „Nachfrage“ nachteilig beeinflussen, darf nicht ganz außer Acht gelassen werden, wobei in den meisten praktischen Umsetzungen vermutlich keine dementsprechend große Zahl zusätzlicher Messfahrzeuge vorhanden ist. Nachteilig ist, dass die Stichprobe, die eine konstante Zahl an Messfahrzeugen zieht, abnimmt, wenn die Verkehrsstärke und damit auch Fahrzeiten und Standardabweichungen steigen. Also genau dann, wenn eine größere Stichprobe notwendig ist.

Die Auswertung der in den beiden Testfeldern vorhandenen Erhebungen führt zu der Empfehlung, dass pro Untersuchungsgebiet, Tageszeitblock und Szenario eine Schicht gebildet wird. Ein Untersuchungsgebiet ist in diesem Fall eine innerstädtische Relation oder mehrere für ein innerstädtisches Gebiet repräsentative Relationen. Ein Tageszeitblock ist ein Zeitraum, in dem mit einer typischen sich wiederholenden Verkehrslage zu rechnen ist (zum Beispiel Dienstag bis Donnerstag während der Morgenspitze). Ein Szenario kann zum Beispiel ein zu bewertendes LSA-Steuerungsverfahren sein. Auf diese Weise werden 84 Schichten untersucht ($3 \times 4 \times 4 = 48$ in Hamburg mit 3 Tageszeitblöcken, 4 Steuerungsverfahren und den 4 untersuchten stark befahrenen Hauptrelationen und 36 Schichten in Bremerhaven, da hier nur 3 Steuerungsverfahren unterschieden werden), die alle zusammen eine Grundgesamtheit von über 132.000 Fahrzeiten beinhalten. Zeiträume in denen eine nicht repräsentative Störung (z. B. Feuerwehreinsatz) vorliegt, werden von der Untersuchung ausgenommen.

Tabelle 21 zeigt, dass abhängig von der zu erwartenden Verkehrslage innerhalb einer Schicht zwischen 20 und 560 Messfahrten notwendig sind, um einen relativen Fehler von 5 % bei einer stochastischen Sicherheit von 95 % zu erreichen. Diese als Richtwerte zu verstehenden Angaben, basieren auf der Auswertung und Klassifizierung der in Bremerhaven und Hamburg erhobenen Daten. Da im Allgemeinen Verteilungstyp und Variationskoeffizient nicht bekannt sind, sollte die Einstufung einer zu erhebenden Schicht qualitativ, basierend auf im Idealfall lokalem Expertenwissen und den zuvor aufgeführten Beispielen erfolgen.

Variationskoeffizient V		<0,18	<0,24	>=0,24
		Zunehmende Streuung (z. B. Überlastsituation, lange Strecken) 		
Verteilungstyp	Normalverteilt	20	60	90
	Eingipflig	80	130	160
	Unbekannt	160	270	560


Zunehmende Verschiebung (z. B. Gruppenbildung durch Umlaufzeiten)

Tabelle 21: Erforderliche Stichprobengröße einer Schicht in Abhängigkeit der zu erwartenden Dichtefunktion (gerundet auf 10).

Gründe für einen steigenden Variationskoeffizienten sind zum Beispiel steigende Abstände zwischen den Knotenpunkten wodurch sich die Fahrzeugpulks auflösen und die Streuung erhöht wird oder im Extremfall lange Autobahnabschnitte auf denen eine Vielzahl Fahrer mit unterschiedlichen Wunschgeschwindigkeiten zu finden ist. Der Verteilungstyp ändert sich im Allgemeinen, wenn die betrachtete Schicht unterschiedliche Verkehrssituationen enthält oder eine ausgeprägte Gruppenbildung vorhanden ist, wie z. B. durch die Trennung von Fahrzeugpulks aufgrund einer abgeschnittenen Koordinierung, verschiedenen Fahrzeuggruppen wie Pkw und Lkw auf Autobahnen oder weil die betrachtete Schicht Relationen mit unterschiedlichen Fahrzeiten enthält. Für den Letzteren Fall wird empfohlen diese Schicht zu trennen. Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass eine ungünstigere Verteilungsfunktion mit einem ungünstigeren / höheren Variationskoeffizienten einhergeht.

Echte Stichproben und Berücksichtigung der Autokorrelation

Wie zuvor bereits angesprochen, ist die Stichprobe eines Messfahrzeugs nicht komplett zufällig. Ein einzelnes Messfahrzeug zieht seine Stichproben in bestimmten zeitlichen Abständen, die der Zeit entsprechen, die dieses Fahrzeug benötigt um zum Startpunkt zurückzukehren. Dies hat im Allgemeinen zur Folge, dass jedes Messfahrzeug mindestens zwei Relationen untersucht (die Hin- und die Rückrichtung). Ferner ist zu beachten, dass die Fahrzeiten der Grundgesamtheit nicht willkürlich schwanken, sondern sich kontinuierlich und im Kollektiv über die Zeit ändern. Die Fahrzeit in fünf Minuten hängt also von der aktuellen Fahrzeit ab und betrifft (zumeist) alle Verkehrsteilnehmer. Beide Punkte werden von den zuvor erläuterten und verwendeten Formeln zur Berechnung der notwendigen Stichprobengröße nicht berücksichtigt und wirken sich in der Praxis positiv auf die erreichte Genauigkeit aus, dass heißt die Werte in Tabelle 21 sind überschätzt.

Die im Folgenden verwendete Autokorrelationsfunktion (siehe Schönwiese [1983c] und MATLAB [2009])

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{R_{xx,max}} \cdot \sum_{t=0}^{T-\tau-1} x(t) \cdot x(t + \tau)$$

mit

$R_{xx}(\tau)$ Autokorrelationskoeffizient der Zeitreihe x zur Verschiebung τ

$R_{xx,max}$ größter Autokorrelationskoeffizient für alle τ (zur Normierung)

$x(t)$ Zeitreihe: hier die mittleren Fahrzeiten in 5-Minuten-Intervallen zu einem bestimmten Zeitintervall abzüglich der mittleren Fahrzeit über alle Zeitintervalle

T Anzahl der Zeitintervalle der Zeitreihe x

τ aktuelle Verschiebung der Autokorrelation (lag)

ist ein Maß, das ausdrückt wie sehr die Werte einer Zeitreihe von sich selbst beziehungsweise ihren Vorgängern abhängen. Nach Schönwiese [1983a] ist eine Zeitreihe autokorreliert, wenn ein Autokorrelationskoeffizient die folgende Bedingung erfüllt:

$$(R_{xx}(\tau) \pm Mu) > 0$$

mit

$$Mu = z \cdot \frac{1 - R_{xx}(\tau)^2}{\sqrt{T - 1}}$$

und

Mu Mutungsbereich / Konfidenzgrenzen

z Genauigkeitswert: hier 1,96 für eine 95 % Wahrscheinlichkeit

Abbildung 45 visualisiert die Anwendung dieser Formeln. Im oberen Bereich sind die Einzelmessungen beziehungsweise die Grundgesamtheit dargestellt. Aus dieser berechnet sich die Zeitreihe, die in die obigen Formeln einfließt, als 5-Minuten-Mittelwert.

Der untere Bereich enthält die Autokorrelationsfunktion und deren Mutungsbereich bzw. Konfidenzgrenzen. Der Verlauf der Autokorrelationsfunktion zeigt, dass die hohe Fahrzeit in den Morgenstunden eine hohe negative Autokorrelation mit der niedrigen Fahrzeit während der Mittagszeit aufweist und eine (niedrige) positive Autokorrelation mit der Nachmittagsspitze. Liegt die Autokorrelationsfunktion im positiven (negativen) Bereich über (unter) der Konfidenzgrenze, dann ist die Zeitreihe autokorreliert, was darauf hinweist, dass die Schätzung der notwendigen Stichprobe nach unten korrigiert werden muss.

Werner [2002] nennt einige Methoden, die sich dazu eignen die erforderliche Stichprobe unter Berücksichtigung der Autokorrelation zu berechnen. Deren Anwendung ist allerdings nicht trivial und verhält sich für jeden Verteilungstyp unterschiedlich. Außerdem ist keine der Methoden in der Lage, die nicht komplett zufällige Ziehung der Stichproben durch ein Messfahrzeug zu

berücksichtigen. Deshalb wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchung zur Behebung dieser Problematik ein empirischer Ansatz gewählt, der die notwendige Stichprobenanzahl in einer Simulation ermittelt.

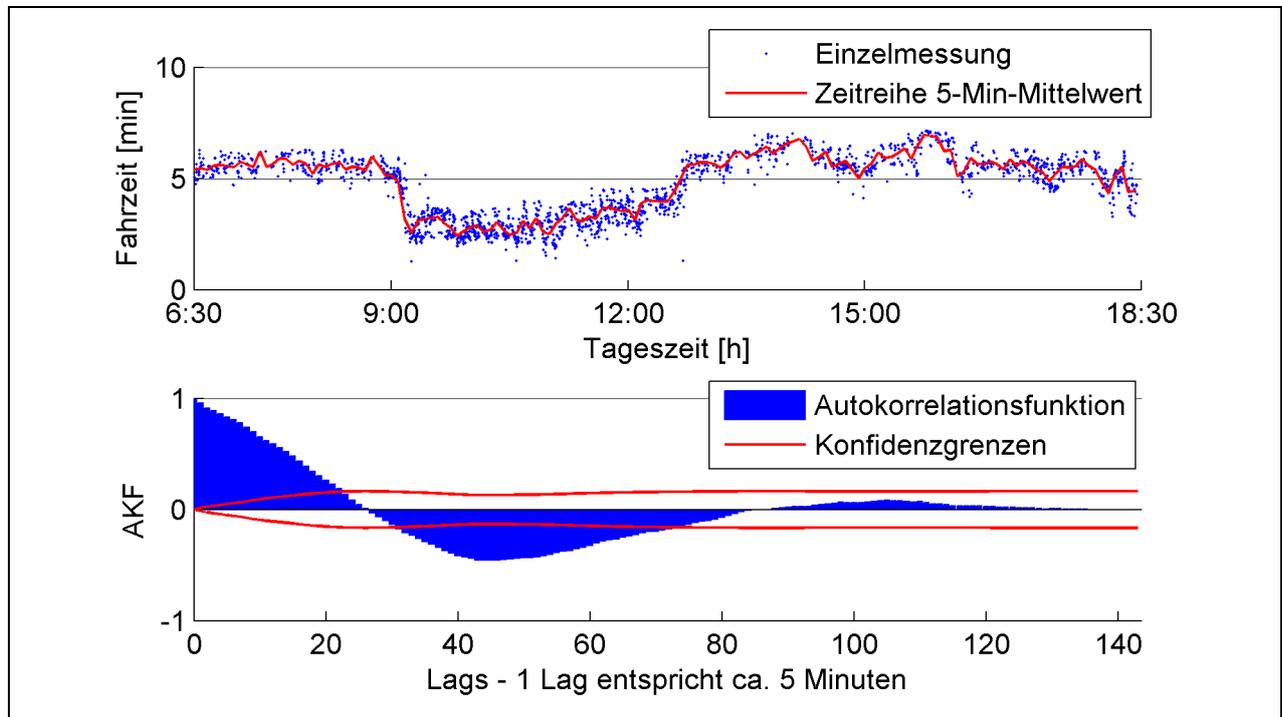


Abbildung 45: Beispiel für die Autokorrelation.

Im Rahmen dieser Simulation werden N Stichproben aus einer zeitlich geordneten Grundgesamtheit gezogen, wobei die Grundgesamtheit in N äquidistante Zeitintervalle unterteilt wird und dann innerhalb eines Zeitintervalls eine zufällige Stichprobe gezogen wird. Auf diese Weise werden die Ergebnisse eines Messfahrzeugs, das in regelmäßigen Abständen entlang der untersuchten Relation Fahrzeiten aufzeichnet, nachgebildet. Das heißt, wenn z. B. im Zeitraum von 8:00 Uhr bis 9:00 Uhr sechs Stichproben gemacht werden sollen, so werden diese zufällig in den sechs zehnminütigen Zeitintervallen dieser Stunde gezogen. Bei einer komplett zufälligen Ziehung ist es unwahrscheinlich aber möglich, dass alle sechs Stichproben zwischen 8:00 Uhr und 8:05 Uhr gezogen werden und eine dementsprechend niedrigere Genauigkeit bezüglich des echten Mittelwerts vorliegt.

Da festgestellt werden soll, welche Stichprobengröße erforderlich ist, um mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % einen Fehler von maximal $\pm 5\%$ bezüglich des echten Mittelwerts zu erreichen, wird die Simulation jeweils 10.000 Mal durchgeführt und anschließend geprüft wie viele der 10.000 Simulationen einen Mittelwert innerhalb der gewünschten Grenzen aufweisen. Ist die Genauigkeit größer (kleiner) als gefordert, dann wird die Stichprobengröße reduziert (erhöht) und anschließend ein neues Simulationsset durchgeführt. Diese Suche nach der richtigen Stichprobengröße wird so lange durchgeführt bis die letzten 3 Simulationssets a 10.000 die gewünschte Genauigkeit vorweisen. Wobei der Prozess gegebenenfalls abgebrochen werden muss, wenn die gewünschte Genauigkeit nicht getroffen werden kann. Da nur ganzzahlige Stichprobengrößen gesucht werden, kann es bei normalverteilten Schichten

mit niedriger Streuung vorkommen, dass die erforderliche Stichprobengröße so klein ist, dass eine Stichprobe mehr oder weniger die erreichte Genauigkeit um mehrere Prozentpunkte schwanken lässt, so dass z. B. 14,6 Messfahrten notwendig wären.

Untersucht werden wieder die zuvor eingeführten 84 Schichten. Erstreckt sich eine Schicht über mehrere Tage (z. B. Dienstag-, Mittwoch- und Donnerstagmorgen mit lokal regelbasierter Steuerung) werden die Grundgesamtheiten der einzelnen Tage nicht vermischt sondern aneinander gereiht.

Im Folgenden wird der Begriff Messfahrzeug in der Einzahl verwendet, wobei sich die tatsächlich erforderliche Anzahl an Messfahrzeugen abhängig von der geforderten Stichprobengröße, Länge und Lage der Relationen usw. ergibt.

Abbildung 46 zeigt die Auswertung der Simulation einer realistischen Ziehung. Oben links ist die Grundgesamtheit dargestellt, die sich aus drei Vormittagen zusammensetzt. Rechts davon ist die Dichteverteilung dargestellt, die eine denkbar ungünstige Form hat und im Sinne der vorigen Klassifizierungen lediglich als „unbekannt“ eingestuft werden kann. Ferner sind Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und die erforderlichen Stichproben nach den Formeln angegeben. Diese fallen, bedingt durch den hohen Variationskoeffizienten von 0,38, sehr groß aus.

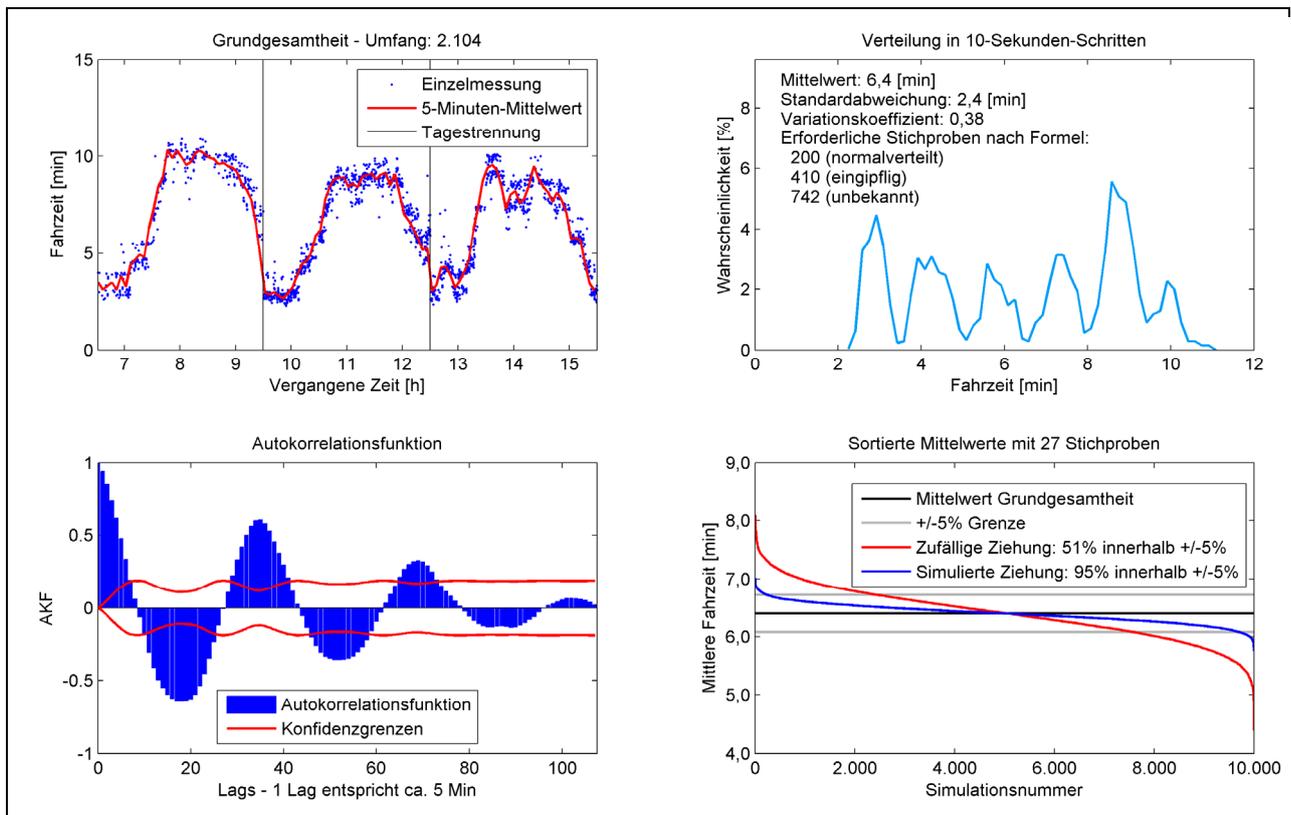


Abbildung 46: Auswertung der simulierten Ziehung für eine Schicht mit hoher Autokorrelation.

Unten links ist die Autokorrelationsfunktion mit ihren Konfidenzgrenzen dargestellt. Diese zeigt, dass die Zeitreihe der Grundgesamtheit deutlich autokorreliert ist. Die Ergebnisse der simulierten Ziehungen sind unten rechts aufgezeichnet. Hier findet sich der Zielmittelwert der Grundgesamtheit und dessen $\pm 5\%$ -Grenzen zwischen die 95 % der 10.000 Mittelwerte aller simulierten Stichprobenziehungen hineinfallen. Die in blau dargestellten und aus Gründen der Anschauung sortierten Mittelwerte der simulierten Ziehungen haben nur eine Stichprobengröße von 27, die deutlich geringer als die berechneten Werte ist. Ferner sind in rot die Mittelwerte einer komplett zufällig durchgeführten Ziehung dargestellt, die mit einer deutlich niedrigeren Wahrscheinlichkeit von nur 51 % einen Fehler von maximal $\pm 5\%$ aufweisen. Offenbar besteht bei der vorliegenden Grundgesamtheit eine hohe Wahrscheinlichkeit „unglückliche“ Stichproben zu ziehen.

Die Auswertung für ein Beispiel mit deutlich niedrigerer Autokorrelation ist in Abbildung 47 dargestellt. Da die Grundgesamtheit annähernd normalverteilt ist und der Variationskoeffizient sehr niedrig ist, ergibt sich für die erforderliche simulierte Stichprobengröße trotzdem ein relativ kleiner Wert von 11 (wobei sich mit einem Anteil von 96 % innerhalb der 5 % Grenze eine etwas höhere Genauigkeit ergibt als gefordert). Auffällig ist, dass für dieses Beispiel der für eine Normalverteilung berechnete Wert übereinstimmt und, dass die Genauigkeit der komplett zufälligen Ziehung und der simulierten Ziehung nahezu identisch ist. Ein Blick auf die Grundgesamtheit verdeutlicht, dass es nahezu irrelevant ist, zu welchem Zeitpunkt die Stichproben gezogen werden, weshalb die simulierte Ziehung nicht viel besser als die Zufällige abschneidet (96 % vs. 95 % innerhalb der 5 % Grenze).

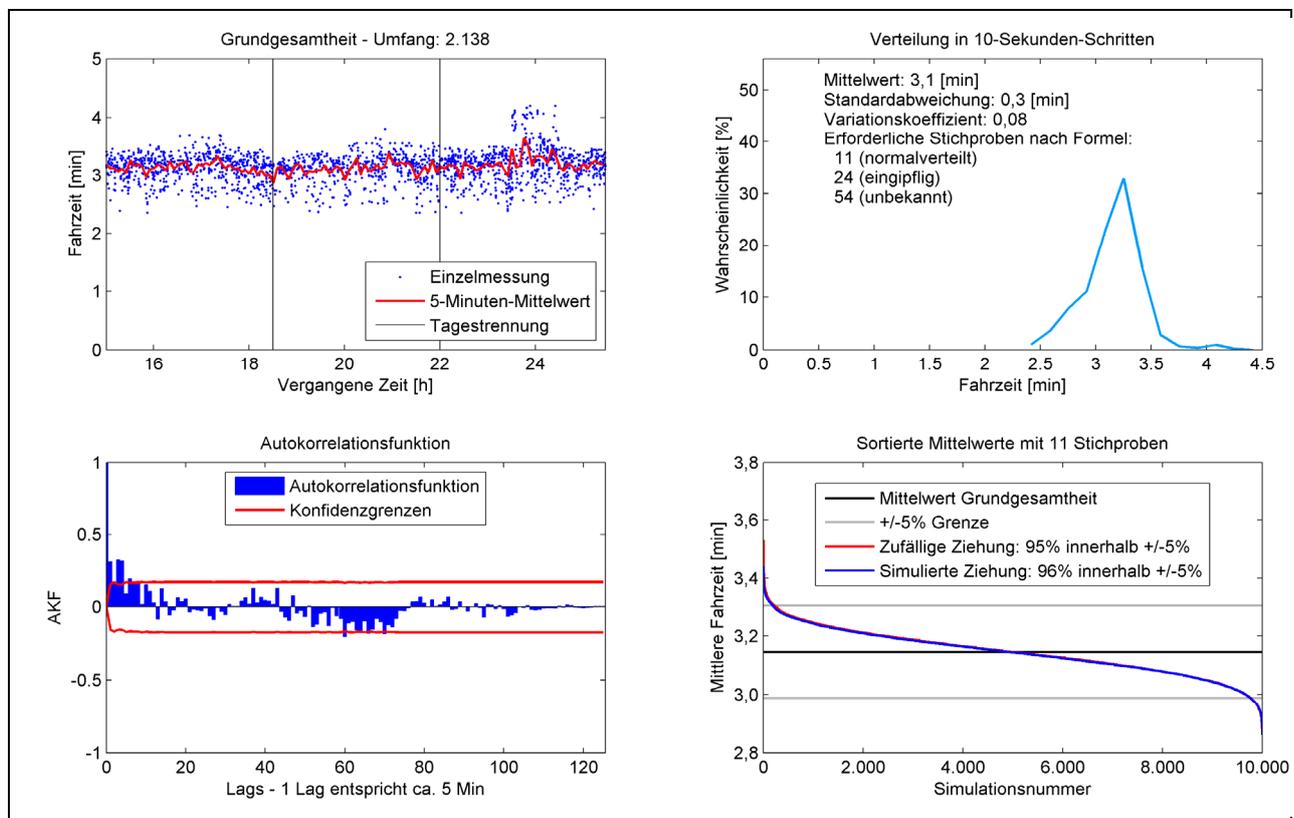


Abbildung 47: Auswertung der simulierten Ziehung für eine Schicht mit niedriger Autokorrelation.

Das obere Diagramm in Abbildung 48 zeigt die, mit Hilfe der simulierten Ziehung ermittelte, erforderliche Stichprobengröße aller Schichten in blau und die berechnete Stichprobe der jeweiligen Schicht in rot, wobei die Werte nach der simulierten Stichprobengröße aufsteigend sortiert sind. Die Abbildung zeigt, dass die simulierten Werte meist deutlich unter den Berechneten liegen. Das untere Diagramm gibt Aufschlüsse über die Gründe dieses Verhaltens. In blau ist hier der Variationskoeffizient aufgetragen und in rot ein Wert der als Indikator für die Autokorrelation innerhalb der jeweiligen Schicht dient. Dieser Indikator entspricht der mittleren Fläche der Autokorrelationsfunktion die außerhalb der Konfidenzgrenzen liegt, das heißt, je höher dieser Wert ist umso höher ist die Autokorrelation. Beide Kurven sind aus Gründen der Darstellung auf ihre Maximalwerte normiert. Beide Kurven sind aus Gründen der Darstellung auf ihre Maximalwerte normiert

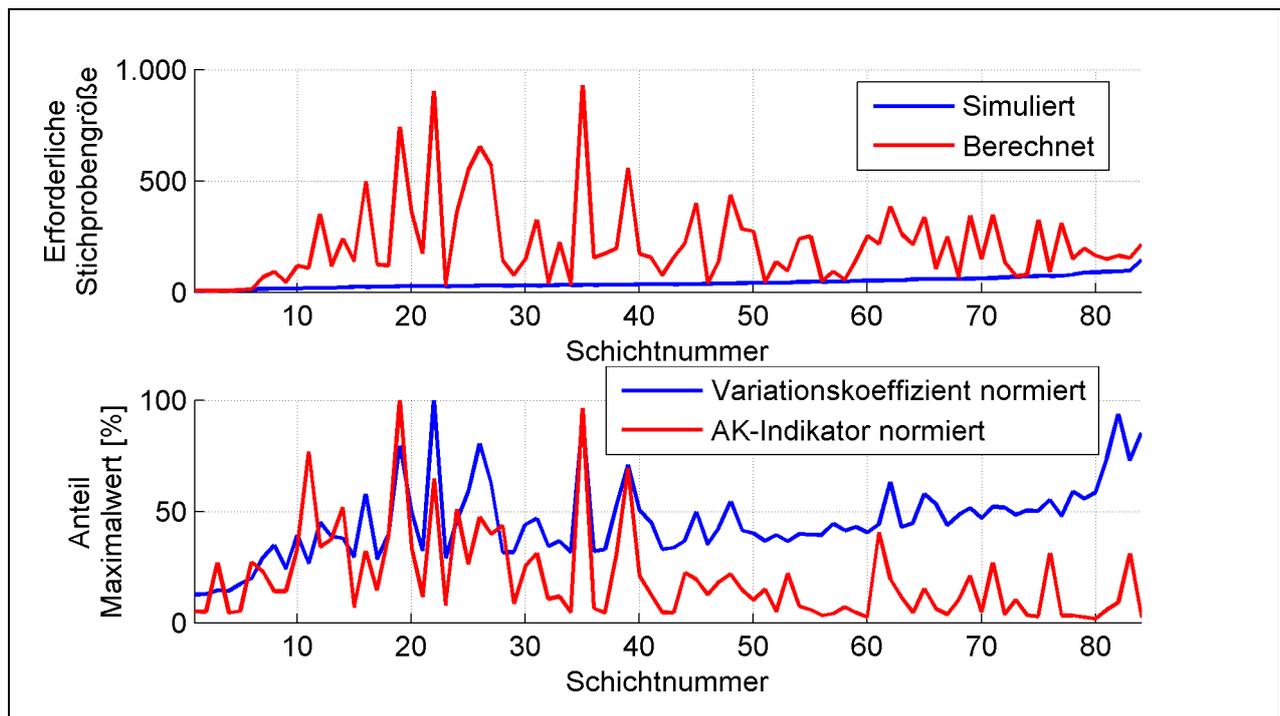


Abbildung 48: Übersicht über die simulierten Ziehungen für alle Schichten (sortiert nach der simulierten Stichprobengröße).

Folgende Zusammenhänge können festgestellt werden:

- Höhere Variationskoeffizienten haben eine höhere berechnete Stichprobengröße zur Folge (viele der roten Spitze oben fallen mit den blauen Spitzen unten zusammen). Die hier nicht dargestellte Sortierung nach berechneter Stichprobengröße bestätigt diesen Zusammenhang.
- Dies gilt auch für die simulierte Stichprobengröße (allerdings abgeschwächt).
- Spitzen in den Variationskoeffizienten fallen häufig mit einer hohen Autokorrelation zusammen. Wenn dies der Fall ist, dann wirkt sich diese Spitze kaum auf die simulierte Stichprobengröße aus.
- Eine hohe Autokorrelation geht mit niedrigeren simulierten Stichprobengrößen einher (hohe AK-Indikatoren sammeln sich in den Schichtnummern kleiner 40).

Weitere Auswertungen zeigen, dass unbekannte Dichteverteilungen mit einem AK-Indikator von 27 % die höchste Autokorrelation aufweisen (eingipflig 15 % und normalverteilt 11 %). Demzufolge ist davon auszugehen, dass sich die erforderliche Stichprobengröße besonders deutlich für extrem ungünstige Schichten mit ungünstigen Dichteverteilungen und hohen Variationskoeffizienten reduziert.

Empfehlung zur Stichprobengröße

Die Resultate für die simulierte Stichprobengröße werden wie zuvor in einer Tabelle, die die verschiedenen Dichtefunktionen berücksichtigt, zusammengefasst. Tabelle 22, die als Empfehlung zu verstehen ist, zeigt dass die erforderlichen Stichprobengrößen im Vergleich zu den berechneten Werten deutlich reduziert sind. Interessant ist, dass die unbekanntes Verteilungstypen, aufgrund ihrer tendenziell höheren Autokorrelation, die sogar die Effekte steigender Streuung überwiegt, nicht die höchsten Stichproben erfordern.

Werden diese Daten für das AMONES-Testfeld in Hamburg zugrunde gelegt, dann wären dort für die Bewertung aller zwölf Relationen ca. 3.700 Testfahrten notwendig gewesen. Diese hätten unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Umlaufdauer für die Fahrtzyklen eine Gesamtfahrzeit von ca. 360 Stunden erfordert. Im Rahmen von AMONES wurden in jedem Testfeld an zehn Tagen über 8,5 Stunden Messfahrten von einem Messfahrzeug durchgeführt. Dies bedeutet, dass für die 3.700 erforderlichen Stichproben mindestens vier Fahrzeugen benötigt worden wären (bei einer Erhebungsdauer von zehn Tagen). Die auf diese Weise erhobenen Fahrzeiten wären allerdings nur dazu geeignet verlässliche Aussagen für vier Steuerungsverfahren (oder Szenarien) und drei Tageszeitblöcke zu treffen. Die tatsächlich durchgeführte Erhebung mit ANPR-Systemen erlaubt ohne weiteres verlässliche Aussagen für die Fahrzeit in 15-Minutenintervallen. Für die Bewertung eines LSA-Steuerungsverfahrens ist eine solch feine Auflösung nicht unbedingt erforderlich, für die Kalibrierung einer Simulation allerdings unerlässlich. Hinzu kommt, dass der Personalaufwand für den Einsatz der ANPR-Systeme an den vier Standorten in Hamburg mit fünf bzw. sechs Personen (eine Person je Standort, ein Springer und ein Messfahrzeug) nur minimal höher war und somit lediglich die Verfügbarkeit solcher Systeme eine Hemmschwelle für deren Einsatz darstellen sollte.

Variationskoeffizient V		<0,18	<0,24	>=0,24
		Zunehmende Streuung (z. B. Überlastsituation, lange Strecken)		
Normalverteilt	Zunehmende Verschiebung (z. B. Gruppenbildung durch Umlaufzeiten) ↓	20	60	70
Eingipflig		30	30	80
Unbekannt		30	50	40

Tabelle 22: Empfehlung für die erforderliche Stichprobengröße einer Schicht in Abhängigkeit der zu erwartenden Dichtefunktion (gerundet auf 10).

5.1.12 Methodische Vorgehensweise bei der Messung und Analyse der verkehrlichen Kenngrößen in den AMONES-Testfeldern Bremerhaven und Hamburg

Tabelle 23 bietet einen Überblick über die relevanten vorgestellten Methoden zur Erfassung verkehrlicher Kenngrößen und deren Vor- und Nachteile. Im Rahmen des vorliegenden Dokuments ist zu beachten, dass die modellbasierte Erfassung und die Ableitung aus bereits erfassten Kenngrößen losgelöst von Tabelle 23 betrachtet werden. Die modellbasierte Erfassung ist in der Lage alle für die Simulation relevanten Daten ohne Genauigkeitsverlust zu „messen“ und die Kenngrößen, die sich aus bereits erfassten Kenngrößen ableiten lassen, hängen von der bereits durchgeführten Messung ab. In beiden Testfeldern können außerdem die vollständigen Protokolle der Signalgruppen ausgewertet werden. Diese Datenquelle stellt dabei keine Messung von Kenngrößen im eigentlichen Sinne dar, wird aber im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zur Erklärung von gemessenen Wirkungen verwendet und ist deshalb Teil des gesamten Bewertungsprozesses.

Methoden	Detektionsart	Erfasste Kenngrößen	Netzbezug	Bedeutung	Varianz	Erfassungsintervalle
Messfahrzeug	Mobil	Weg-Zeit-Verlauf	Niedrig	Sehr hoch	Hoch	Sekunden
Querschnittserfassung mit Detektor	Stationär	Verkehrsstärke	Mittel	Mittel	Niedrig	Minuten
Querschnittserfassung manuell	Stationär	Verkehrsstärke Fahrzeugklassen	Mittel	Niedrig	Niedrig	Minuten
Nicht fest installierte Kennzeichen-erfassungssysteme	Stationär	Fahrzeiten Durchgangsverkehrsanteile	Mittel	Hoch	Niedrig	Minuten
Signalgruppenprotokolle	Stationär	Signalbilder	Mittel	Mittel	Nicht zutreffend	Sekunden
Fahrzeugwiedererkennung mittels Induktionsschleifensignatur (nur Bremerhaven)	Stationär	Fahrzeiten	Niedrig	Niedrig (da keine Voll-erfassung)	Niedrig	Minuten

Tabelle 23: Methoden zur Erfassung verkehrlicher Kenngrößen.

Der Netzbezug beurteilt die Aussagekraft der erfassten Kenngrößen über ein Verkehrsnetz. Hier wird angenommen, dass klassische Querschnittserfassungen im gesamten Verkehrsnetz verteilt installiert sind. Im Gegensatz dazu können temporäre Kennzeichenerfassungssysteme zwar nur an wenigen ausgewählten Querschnitten aufgebaut werden, erlauben aber die Erfassung von $N \cdot (N-1)$ Fahrzeiten bei N Querschnitten, wobei die Aussagekraft einer Fahrzeit räumlich zeitlicher Natur ist. Ein Messfahrzeug kann hingegen nur eine der Trajektorien aller Fahrzeuge erfassen, diese ist zeitlich und räumlich hoch aufgelöst, aber nur ein kleiner Ausschnitt des Verkehrszustandes. Signalgruppenprotokolle ermöglichen die Bestimmung von Versatzeiten und Freigabezeitanteilen, die das Verkehrsangebot im Netz beeinflussen.

Die Bedeutung der erfassten Kenngrößen bewertet die Eignung der gemessenen Daten zur Qualitätsbeurteilung einer Verkehrsanlage. FCD-Daten erlauben die Ermittlung der Wartezeiten

und der Anzahl Halte an jedem Knotenpunkt. Die Geschwindigkeiten, Belegungsgrade und Verkehrsstärken, die ein Detektor misst oder eine Person zählt, haben eine gewisse Aussagekraft bezüglich der Ablaufqualität an einem Knotenpunkt. Fahrzeitmessungen sind dazu geeignet, die Qualität von Netzabschnitten zu bewerten. Die Protokolle der Signalgruppen wiederum erlauben erst in Verbindung mit der Verkehrsnachfrage eine Beurteilung der Qualität.

Die Varianz berücksichtigt die stochastische Streuung der Messverfahren. Prinzipiell gilt, dass diese durch die Beobachtung vieler Verkehrsteilnehmer und die Zusammenfassung auf lange Messzeitintervalle reduziert wird. Wobei die Erfassungszeitintervalle sinnvoll gewählt werden sollen, damit zeitliche Informationen nicht komplett verwaschen werden.

Allgemein muss festgehalten werden, dass Steuerungsverfahren auch die Qualität des Verkehrsablaufs von Fußgängern, Radfahrern und des öffentlichen Verkehrs beeinflussen. Diese Verkehrsteilnehmergruppen werden in den beiden Testfeldern Bremerhaven und Hamburg allerdings nicht erfasst und können damit auch nicht bewertet werden.

Im Testfeld Bremerhaven besteht zusätzlich die Möglichkeit, eine Fahrzeugwiedererkennung mittels Induktionsschleifensignatur durchzuführen. Um die Qualität dieser Messmethode zu beurteilen, werden die daraus abgeleiteten Fahrzeiten mit denen der Kennzeichenerfassungssysteme verglichen. Die Messmethode selbst dient nicht zur Beurteilung der Steuerungsverfahren.

5.1.12.1 Erhebungsmethodik

Messfahrzeug

In beiden Testfeldern wird ein mit einem GPS-Empfänger ausgestattetes Messfahrzeug morgens, mittags und nachmittags entlang bestimmter Routen eingesetzt. Die genauen Zeitfenster dabei sind:

- 06:30-09:30 Uhr
- 11:00-13:00 Uhr
- 15:00-18:30 Uhr

Ein zweites Fahrzeug, das primär als Versorgungsfahrzeug für die Messstationen der Kennzeichenerfassungssysteme dient, nimmt bei Möglichkeit ebenfalls GPS-Daten auf. Die GPS-Empfänger zeichnen die Position sekundenfein auf, wobei die Mitschriebe anschließend offline ausgewertet werden.

Querschnitterfassung mit Detektor

Die Zählraten von Induktionsschleifen, die in beiden Testfeldern zur Versorgung der Steuerungen dienen, werden von den Verkehrsrechnern mitgeschrieben. Diese Daten sind in Bremerhaven in 90-Sekunden-Intervallen und in Hamburg in 60-Sekunden-Intervallen zusammengefasst.

Querschnittserfassung manuell

In beiden Testfeldern wird zusätzlich manuell der Verkehr erfasst. Dabei wird an den Eingangsquerschnitten zu jeder vollen Stunde für jeweils 15 Minuten der Verkehr getrennt nach Pkw und Lkw erfasst. Diese Zählung ist zusätzlich notwendig, da die Induktionsschleifen nicht in der Lage sind, verschiedene Fahrzeugklassen zu unterscheiden und der Lkw-Anteil eine Eingangsgröße für die Simulationen darstellt. Darüber hinaus wird, an den zentralen Knotenpunkten an denen die Umweltkenngrößen aufgezeichnet werden, eine Zufahrt sekundenfein nach den Fahrzeugklassen Pkw, Lkw, Lastzug, Bus, Motorrad und leichte Nutzfahrzeuge erfasst. Diese detaillierte Erfassung ist notwendig, um einen Zusammenhang zwischen Verkehr und den zeitlich hochaufgelösten Schadstoffmessungen feststellen zu können (zur weiteren Verarbeitung dieser Datenquelle siehe Kapitel 5.2).

Nicht fest installierte Kennzeichenerfassungssysteme

Die Kennzeichenerfassungssysteme werden an den relevanten Eingangsquerschnitten aufgestellt und erfassen den Verkehr von 6:30-18:30 Uhr. In Hamburg werden 8 Systeme, die 12 verschiedene Relationen abdecken, eingesetzt und in Bremerhaven 6 Systeme, die 6 Relationen erfassen. In beiden Städten stehen die Systeme am Rand oder zwischen den Fahrbahnen. Dies verhindert, im Gegensatz zu einer Erfassung von oben, die exakte Erfassung eines einzelnen Fahrstreifens, was wiederum zur Folge hat, dass Durchgangsverkehrsanteile nicht einfach durch die Erfassungsraten abgeleitet werden können.

Signalgruppenprotokolle

Die Signalgruppenprotokolle stellen einen Mitschrieb des Verkehrsrechners der tatsächlich geschalteten Bilder (Rot, Grün, Gelb, Blinkend usw.) aller Signalgruppen der betrachteten Knotenpunkte dar. Die Mitschriften können dabei ereignisorientiert sein (Bremerhaven) oder in festen Zeitschritten (Hamburg) erfolgen.

Fahrzeugwiedererkennung mittels Induktionsschleifensignatur im Testfeld Bremerhaven

Die Induktionsdetektoren vom Typ LD4 der Firma Siemens bieten die Möglichkeit, Rohdaten der angeschlossenen Induktionsschleifen über eine serielle Datenschnittstelle auszulesen. Die so erhaltene zweidimensionale Datenreihe stellt die Verstimmung einer Induktionsschleife in Promille über die Zeit dar (siehe Abbildung 49). Diese Verstimmung wird durch die Änderung der Induktivität während der Überfahrt eines Fahrzeugs erzeugt; primäre Einflussgröße hierauf ist die Metallmassenverteilung des Fahrzeugs, sekundäre Einflussgrößen sind bauliche und wetterabhängige Randbedingungen.

Das Beispiel in Abbildung 49 stellt eine normierte Fahrzeugsignatur mit 21 Stützstellen dar.

Das Auslesen der Verstimmungsdaten aus den Streckenstationen stellt im vorliegenden Fall eine Besonderheit dar, da die Daten derzeit nur mit einer auf Microsoft Access basierenden Software, die von der Firma Siemens bereitgestellt wird, lokal am Detektor abgegriffen werden

können. Die Möglichkeit des parallelen Auslesens der Daten zweier angeschlossener Detektoren besteht.

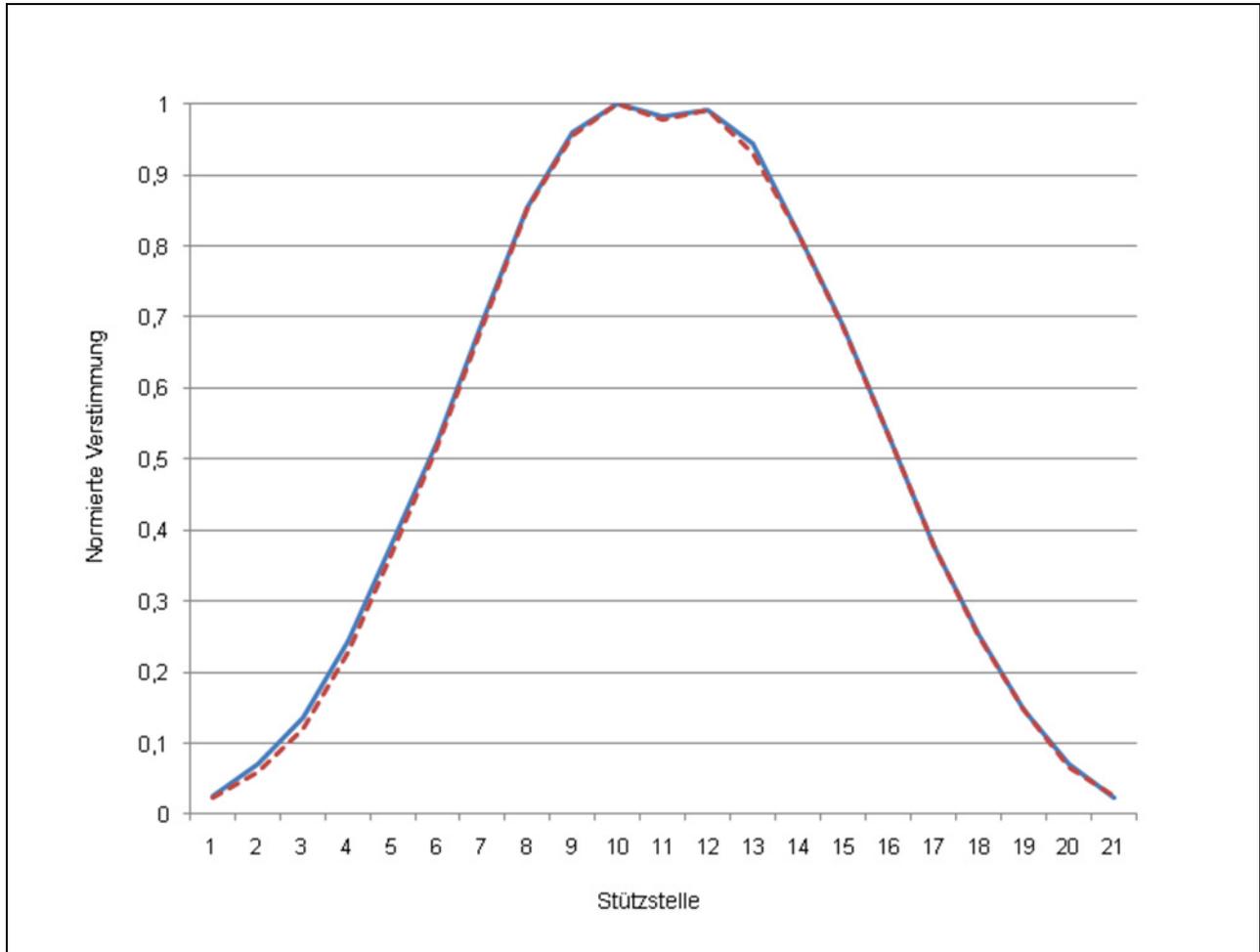


Abbildung 49: Gematchte normierte Fahrzeugsignaturen.

Mit dieser Software kann die Verstimmungskurve jeweils in zeitlich auf 32 Sekunden beschränkten Blöcken ausgelesen werden. Jeder so erzeugte Datensatz beinhaltet bei einer vorgegebenen Abtastrate von 125Hz genau 4000 Datenpunkte pro Schleife. Zu Beginn und am Ende eines solchen Erhebungsintervalls kann es, durch das Verfahren bedingt, zu Unstimmigkeiten im Kurvenverlauf kommen, weshalb die (Rand-) Daten später sorgfältig zu filtern sind. Nach dem Ende eines Intervalls wird die Aufzeichnung für das nächste Intervall automatisch gestartet.

Aus der so erhaltenen Verstimmungskurve können im Folgenden die Daten einzelner Fahrzeuge mithilfe eines Schwellwertverfahrens extrahiert werden. Die Verstimmungskurve eines solchen einzelnen Fahrzeugs, die sogenannte Signatur, bildet in Verbindung mit einem genauen Zeitstempel die Datengrundlage für das verwendete Verfahren zur Wiedererkennung von Fahrzeugen (VWF).

5.1.12.2 Qualitätssicherung und Datenaufbereitung

Messfahrzeug

Die GPS-Daten werden zunächst aufbereitet, dabei werden fehlende oder fehlerhafte Zeitstempel korrigiert. Da die Funktionsweise der verwendeten GPS-Empfänger nicht bekannt ist, kann nur vermutet werden, dass falsche Zeitstempel durch Störungen im GPS-Empfang (z. B. durch Gebäudeabschattungen, Brücken oder Tunnels) auftreten. In diesem Schritt werden Lücken von bis zu 5s ergänzt - eine Korrektur die für die insgesamt 765.706 aufgezeichneten Sekunden 450 Mal notwendig ist.

Die Zuordnung der GPS-Daten zu den relevanten Fahrtbeziehungen erfolgt durch ein geometrisches Verfahren. Hierfür werden virtuelle Querschnitte an den Eingangsquerschnitten des Testfeldes definiert. Ein Algorithmus prüft dann zu welchen Zeitpunkten die GPS-Daten einen solchen Querschnitt überschreiten und schneidet die GPS-Daten in einzelne Fahrten zwischen diesen Querschnitten auseinander. Anschließend wird kontrolliert, ob die auf diese Weise erkannte Fahrt eine plausible Länge und mittlere Geschwindigkeit aufweist - andernfalls wird diese Fahrt verworfen. Da die GPS-Daten die aktuelle Position nur mit einer gewissen Genauigkeit, im Bereich von Metern, enthalten, werden abschließend die Längen aller erkannten und akzeptierten Einzelfahrten auf die durchschnittliche Länge normiert. In einem letzten Schritt werden die erkannten GPS-Fahrten visuell geprüft und die letzten nicht plausiblen Fahrten entfernt.

Abbildung 50 zeigt das Ergebnis dieses Prozesses für die Relation von der Kreuzung Bramfelder Chaussee/Haldesdorfer Straße (Messquerschnitt 1) zur Kreuzung Bramfelder Straße/Fuhlsbüttler Straße (Messquerschnitt 3) in Hamburg am 2. Juni 2008, wobei die Legendeneinträge den Startzeitpunkt der Fahrten repräsentieren.

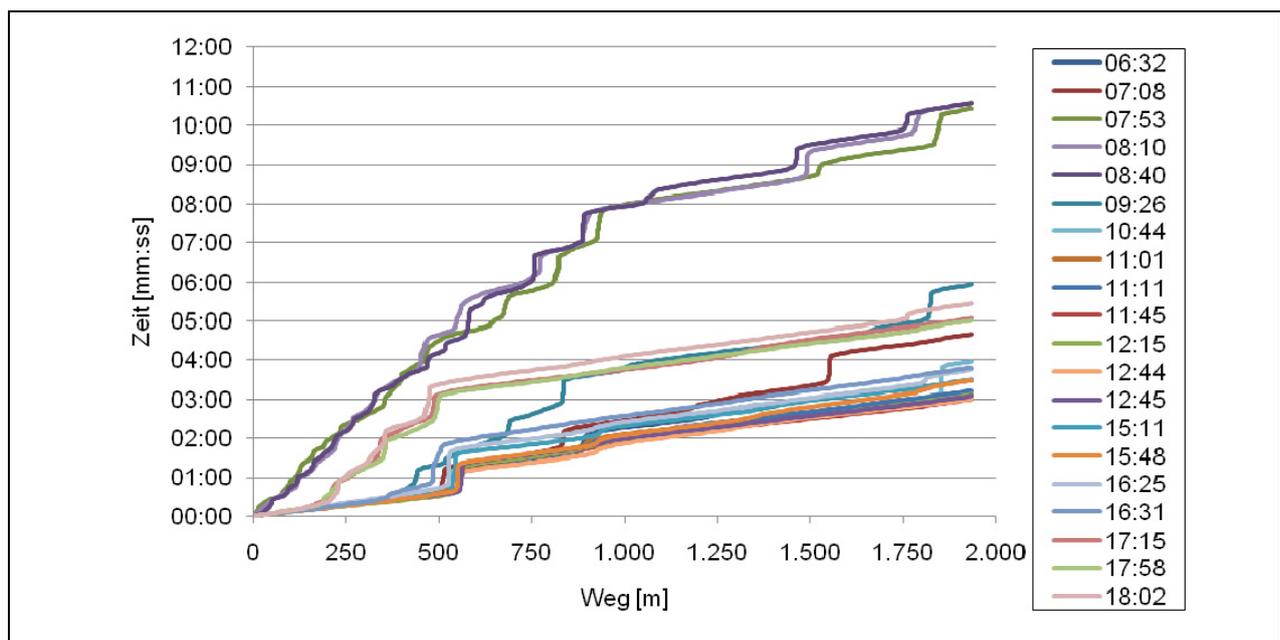


Abbildung 50: GPS-Fahrten am 2.6.2009 von Messquerschnitt 1 nach Messquerschnitt 3 in Hamburg.

Querschnittserfassung mit Detektor

Die Zählraten der Induktionsschleifen dienen zur Bestimmung der Nachfragesituation und zur Bewertung der gemessenen Fahrzeiten. Für diesen Zweck werden aus diesen Daten richtungsbezogene Messquerschnitte (RMQ) erzeugt und mit den Daten der ANPR-Systeme fusioniert (siehe nachfolgende Erläuterungen).

In Hamburg liegen die Zählwerte für jede Induktionsschleife einzeln vor. In Bremerhaven repräsentieren die Zählwerte (teilweise) bereits eine Zusammenfassung der Induktionsschleifen. In beiden Fällen müssen die Daten einzelner Detektoren so zusammengefasst werden, dass die für die nachfolgenden Zwecke notwendigen Querschnitte (Eingangsquerschnitte oder wichtige Abbieger) vorhanden sind. Abbildung 51 verdeutlicht diesen Vorgang, der additiv oder subtraktiv sein kann.

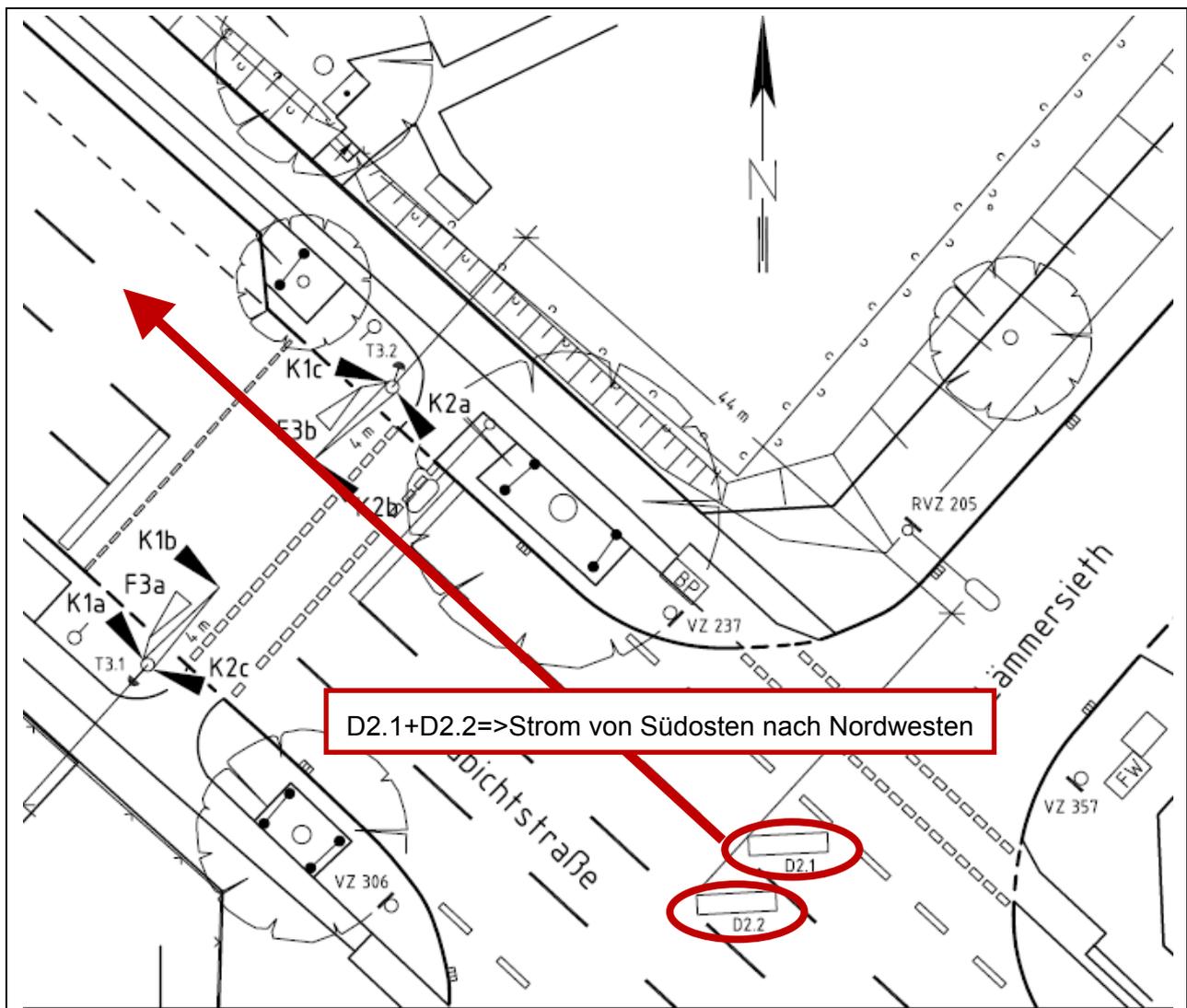


Abbildung 51: Zusammenfassen von Induktionsschleifen zu RMQs in Hamburg am Knotenpunkt Habichtstraße / Lämmersieth (Bildquelle: Stadt Hamburg).

Anschließend werden die Daten zeitlich aggregiert. Im Rahmen dieses Prozesses werden die Daten auf Vollständigkeit geprüft und gegebenenfalls interpoliert. Abschließend werden die

Ergebnisse, an den Stellen an denen manuelle Zählungen vorliegen, mit diesen verglichen und visuell auf Ausreißer und Plausibilität überprüft. Die zeitliche Aggregation für den Vergleich mit den manuellen Zählungen erfolgt in 15-Minuten-Intervallen und für die nachfolgenden Bewertungsprozesse in 60-Minuten-Intervallen.

Querschnittserfassung manuell

Die manuellen Zählungen an den Eingangsquerschnitten werden visuell geprüft. Einzelne Messlücken werden durch lineare Interpolation ergänzt. Längere Messlücken werden durch die Werte des entsprechenden Wochentags der anderen Messwoche im Testfeld ersetzt, wobei die Werte entsprechend den Verhältnissen der übrigen Zählwerte korrigiert werden, d. h.:

$$Q_{t,k,Woche1} = Q_{t,k,Woche2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n Q_{t,i,Woche1}}{\sum_{i=1}^n Q_{t,i,Woche2}} \quad i \in \{1, \dots, n | i \neq k\}$$

mit

$Q_{t,k,Woche1}$	Zählwert im Intervall t an der Messstelle k in der einen Woche
$Q_{t,k,Woche2}$	Zählwert im Intervall t an der Messstelle k in der anderen Woche
$Q_{t,i,Woche1}$	Zählwert im Intervall t an der Messstelle i in der einen Woche
$Q_{t,i,Woche2}$	Zählwert im Intervall t an der Messstelle i in der anderen Woche
i, k	Messstelle i beziehungsweise k
n	Anzahl Messstellen

Zum Vergleich mit den Zählwerten der Detektoren werden die manuellen Zählwerte, die nur für die ersten 15 Minuten jeder vollen Stunde vorliegen auf alle 15-Minuten-Intervalle interpoliert und anschließend zu 60-Minuten-Intervallen zusammengefasst (siehe Abbildung 52).

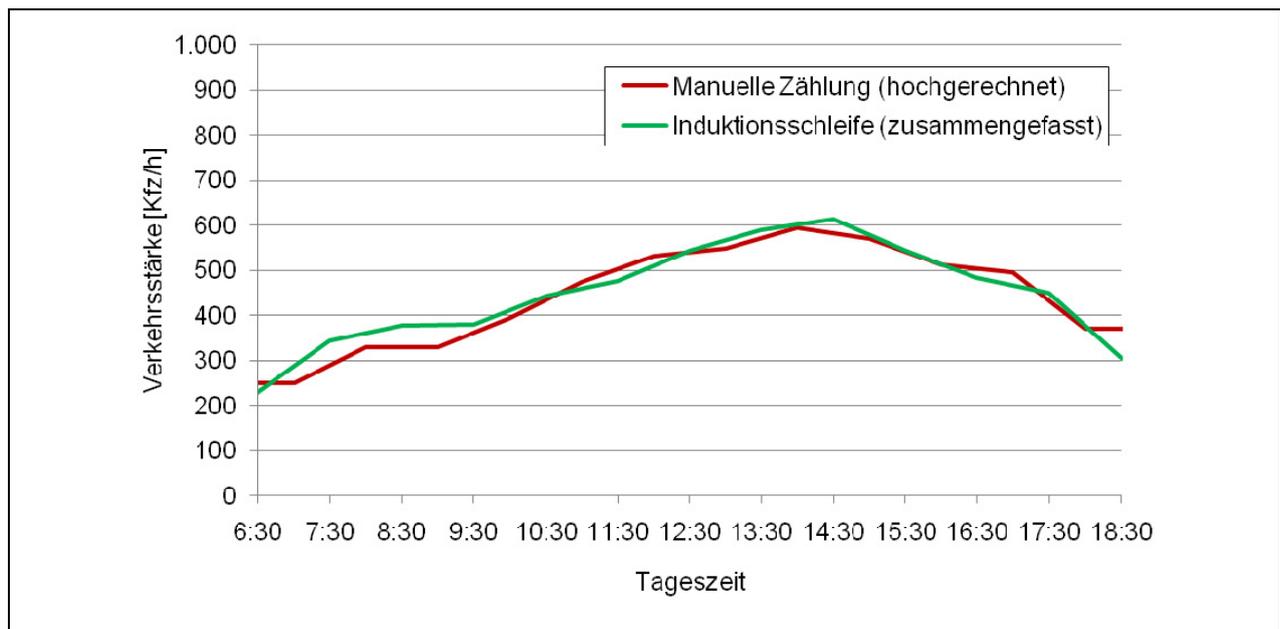


Abbildung 52: Vergleich von manueller Zählung und Induktionsschleife am 27.2.2009 in Bremerhaven am Knotenpunkt Columbusstraße / Lloydstraße.

Nicht fest installierte Kennzeichenerfassungssysteme

Die Kennzeichenerfassungssysteme liefern Datensätze, die die folgenden relevanten Informationen enthalten:

- Kfz-Kennzeichen
- Zeitstempel
- Messstelle (richtungsbezogen)

Aus diesen Daten können durch den Abgleich von Kennzeichen zwischen verschiedenen Messstellen Fahrzeiten generiert (siehe auch Friedrich et al. [2008]) werden. Taucht ein Kennzeichen an verschiedenen Messstellen auf, so kann die Fahrzeit durch eine Differenzbildung der Zeitstempel berechnet werden.

Um eine höchstmögliche Qualität zu erreichen wird eine exakte Übereinstimmung der erkannten Kennzeichen gefordert (bei niedrigen Durchgangsverkehrsanteilen kann es sinnvoll sein, kleine Abweichungen zu tolerieren). Außerdem wird in einem ersten Schritt gebrochener Durchgangsverkehr (Fahrten mit Unterbrechung, zum Beispiel durch einen Tankvorgang) dadurch gefiltert, dass keine Fahrten mit einer Fahrzeit von mehr als 20 Minuten akzeptiert werden. Ferner wird eine Fahrzeit nur für die jeweils zeitlich am nächsten liegenden Erfassungen gebildet. Auf diese Weise wird auch dann eine eindeutige Fahrzeit sichergestellt, wenn ein Fahrzeug das Testfeld in weniger als 20 Minuten mehrmals durchquert. Das Ergebnis dieses Prozess sind Einzelbeobachtungen von Fahrzeiten auf den Relationen zwischen den Messstellen.

Aus den einzelnen Fahrzeiten wird anschließend der gleitende Mittelwert der Fahrzeit für die jeweilige Relation gebildet, der eine wichtige Eingangsgröße für die Bewertung des Steuerungsverfahrens darstellt. Dieser wird in Fenstern von einer Stunde von 6:30-18:30 Uhr für jeden Erhebungstag berechnet. Um gebrochenen Durchgangsverkehr zu filtern werden dabei nur Fahrzeiten berücksichtigt, die zu den 85 % schnellsten Fahrzeiten innerhalb der betrachteten Stunde gehören - nur diese werden als Durchgangsverkehr und damit als valide Fahrzeit betrachtet. Ferner müssen mindestens 3 Fahrzeiten innerhalb dieser Stunde vorliegen, andernfalls wird eine Unterbrechung der Messung angenommen und kein gleitendes Mittel berechnet.

Für die Berechnung des Bufferindex (Kapitel 5.1.8.8) berechnet sich $t_{P95,i}$ aus den oben beschriebenen 85 % schnellsten Fahrzeiten.

Eine weitere Größe die aus den einzelnen Fahrzeiten abgeleitet wird, ist die Anzahl Halte im jeweiligen Zeitfenster. Dafür werden alle beobachteten Einzelmessungen die zu den schnellsten 85% gehören in Klassen eingeteilt. Abbildung 53 zeigt das Ergebnis dieses Prozesses.

Der Begriff Halte ist dabei so zu verstehen, dass es sich um zusätzliche Umläufe handelt, die der Verkehrsteilnehmer zur Bewältigung der Strecke benötigt und die mit großer Wahrscheinlichkeit in mindestens ebenso vielen zusätzlichen Halten resultieren. Die Klassifizierung erfolgt abhängig von der aktuellen Umlaufzeit der Lichtsignalanlagen. Dabei wird angenommen, dass alle Verkehrsteilnehmer, die die betrachtete Relation innerhalb der

Wunschfahrzeit und der Wunschfahrzeit plus die aktuelle Umlaufzeit bewältigen, maximal einen Halt einlegen müssen. Die Anzahl notwendiger Umläufe und damit der Halte steigt dann mit dem Vielfachen der Umlaufzeit. Als Wunschfahrzeit werden 90 % der Fahrzeit bei 50 km/h unterstellt (demzufolge beträgt die Wunschgeschwindigkeit 55,6 km/h). Die Ergebnisse die sich mit diesem Wert einstellen, weisen visuell plausible Resultate auf und stehen im Einklang mit den Beobachtungen aus den GPS-Daten. Zur Bewertung werden im Folgenden die Verhältnisse zwischen den verschiedenen Halteklassen verwendet.

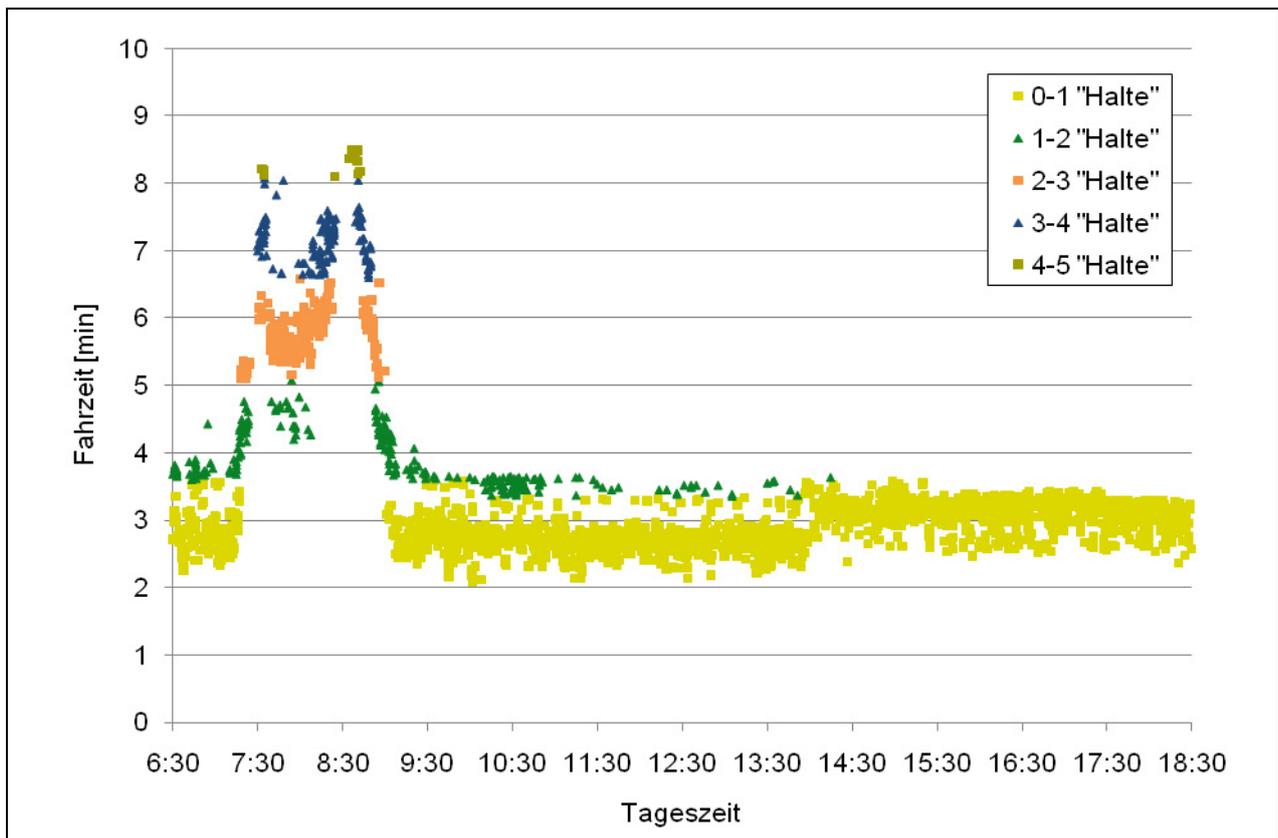


Abbildung 53: Gemessene Fahrzeiten klassifiziert nach Haltegruppen am 6.10.2009 von Messquerschnitt 1 nach Messquerschnitt 3 in Hamburg.

Signalgruppenprotokolle

Die Protokolle der Signalgruppen werden im Rahmen der Datenaufbereitung auf ein gemeinsames Format übertragen. Im Laufe dieses Prozesses werden die Protokolle auf Vollständigkeit geprüft und Zeitsprünge im Protokoll der Wellensekunde (aktuelle Umlaufsekunde) korrigiert.

Fahrzeugwiedererkennung mittels Induktionsschleifensignatur im Testfeld Bremerhaven

Um ein Fahrzeug an verschiedenen Querschnitten wiedererkennen zu können, muss dessen Signatur an zwei (aufeinanderfolgenden) Querschnitten identifiziert werden. Um dies zu erreichen und die Signatur korrekt zuzuordnen zu können, müssen zuerst die durch unterschiedliche Detektoren erfassten Signaturen so aufbereitet werden, dass diese

miteinander verglichen werden können. Dies erfolgt durch die Normierung der Verstimmungsdaten sowie durch die Kalibrierung der Detektoren, da diese unterschiedlich stark, bspw. abhängig von den baulichen Gegebenheiten oder den umgebenden Umwelt und Wettersituationen ansprechen. Zum Abgleich ganzer Messquerschnitte ist die Kalibrierung für jede Schleifenkombination einzeln durchzuführen.

Die Normierung der Einzelfahrzeugsignaturen erfolgt sowohl in horizontaler wie auch in vertikaler Richtung. Zielsetzung hierbei ist der Ausgleich unterschiedlicher Geschwindigkeiten der Fahrzeuge beim Überfahren der Induktionsschleifen und die Garantie einer einheitlichen Anzahl von Stützstellen für den späteren Vergleich.

Die Normierung der Signaturen erfolgt im Normalfall durch eine Interpolation mit anschließender äquidistanter Abtastung mit einer festen Anzahl von Stützstellen in horizontaler Richtung sowie einer Normierung auf den Maximalwert eins in vertikaler Richtung. Alle Signaturen erhalten so die gleiche Länge und die Verstimmung bewegt sich im Bereich zwischen 0 (Minimum) und 1 (Maximum). Um die ursprünglichen Verstimmungsdaten nicht zu vernachlässigen, werden die charakteristischen Eigenschaften einer Signatur weiterhin vorgehalten. Dies sind allem voran die maximale Verstimmung des Detektors während der Überfahrt eines Fahrzeugs, die Anzahl der Stützstellen der originalen Signatur sowie ein zugehöriger Zeitstempel mit Sekundengenauigkeit. Zusätzlich dazu wird die Ableitung (Steigungsverhalten) der Signatur berechnet, da diese später beim Signaturenvergleich aussagekräftigere Werte liefert.

Zur anschließenden Kalibrierung werden die Fahrzeuge anhand der Verstimmung an einer charakteristischen Stützstelle der normierten Signatur einer von drei unterschiedlichen Fahrzeugklassen zugeordnet und die mittlere maximale Verstimmung der Klasse 1 (PKW) als Referenz herangezogen. Diese Kalibrierung erfolgt im Normalfall automatisch [Palici2009] und kann durch manuelle Anpassungen und durch eine sinnvolle Wahl des Kalibrierungsintervalls noch weiter verfeinert werden.

Als nächstes erfolgt der Abgleich der normierten Signaturen, die an zwei aufeinanderfolgenden kalibrierten Induktionsschleifen gesammelt werden. Hierfür wird die Ähnlichkeit derselben untersucht. Als Verfahren mit der höchsten Genauigkeit hat sich die Berechnung des sog. Ähnlichkeitsmaßes (U) nach folgender Formel herausgestellt:

$$U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\min(y_{A,i}, y_{B,i})}{\max(y_{A,i}, y_{B,i})}$$

n : Anzahl abzugleichender Merkmale
y : Merkmalsausprägung
A, B : Querschnitt
i : Index

Die Wiedererkennung ist positiv für die Signaturen mit der größten Ähnlichkeit bzw. für Signaturen, deren Ähnlichkeitsmaß einen festgelegten Schwellwert überschreitet. Die Ähnlichkeit der maximalen Verstimmung unter Berücksichtigung des errechneten Kalibrierungsfaktors findet ebenfalls Einfluss.

$$U_V = \frac{\min(V_A, V_B)}{\max(V_A, V_B)}$$

V : mittlere maximale Verstimmung
A, B : Querschnitt

Aus den gesicherten Zeitstempeln lässt sich die Fahrzeit vom Start- zum Zielquerschnitt errechnen und das Ergebnis in einer Fahrzeitanglinie darstellen.

Protokollierung von Störungen

Während der Messung protokollierte Störungen, die einen signifikanten Einfluss auf den Verkehrsfluss haben, werden dazu verwendet einzelne Stunden aus der Bewertung auszuschließen (siehe auch Tabelle 24). Da zu diesen Zeitpunkten eine mögliche Vergleichbarkeit mit anderen Stunden nicht sichergestellt werden kann.

Situation	Relevant	Begründung
Durchfahrt eines Rettungsfahrzeuges mit Blaulicht und Sirene.	Nein	Zufälliges Ereignis, das jederzeit auch unbeobachtet eintreten kann und keinen signifikanten längeren Einfluss auf den Verkehrsfluss hat.
Vollsperrung durch Feuerwehreinsatz.	Ja	Signifikanter längere Veränderung der Kapazität der betroffenen Strecke und damit Beeinflussung der gemessenen Fahrzeiten.
Längerer Ausfall eines ANPR-Systems.	Ja	Bei einer zu großen Zeitlücke (bis zu ca. 60 Minuten, abhängig von der zeitlichen Lage zum gleitenden Mittel) fehlen für die Bewertung notwendige Daten.

Tabelle 24: Beispiele für Störungen.

5.1.12.3 Methodik zur Bewertung der Steuerungsverfahren

Messfahrzeug

Die GPS-Fahrten werden zur Kontrolle und räumlichen Auflösung der aus den Kennzeichenerfassungssystemen abgeleiteten Größen verwendet.

Zum Einen werden die aus den Punktwolken der ANPR-Fahrzeiten abgeleiteten Halteklassen (siehe nachfolgende Erläuterungen) verifiziert und zum Anderen werden die GPS-Fahrten dazu verwendet, um festzustellen an welcher Stelle im Netz Verlustzeiten entstehen. Die Ergebnisse der GPS-Fahrten alleine sind nicht ausreichend um eine Bewertung der Steuerungsverfahren durchzuführen, da pro Tag und Relation im Schnitt nur zwischen 15 und 20 Fahrten vorliegen.

Die Lokalisation von Rückstau erfolgt durch Abmessen der Entfernung im Straßennetz und visuellem Erkennen von Rückstau- beziehungsweise Störungsbereichen. Darüber hinaus fließen hier die vor Ort gesammelten Erkenntnisse während der Erhebung mit ein. Halte werden beim Erreichen einer sehr niedrigen Geschwindigkeit (ca. <5km/h) erkannt. Abbildung 54 verdeutlicht die Vorgehensweise an einer einzelnen Fahrt zur Morgenspitze in Hamburg.

Die Abbildung zeigt die vergangene Zeit (grün/linke Achse) und die momentane Geschwindigkeit (rot/rechte Achse) an jeder Position der Fahrt. Halte werden durch blaue Kreise hervorgehoben. Der Rückstaubereich, der sich an stetigem Stop-and-Go erkennen lässt, erstreckt sich über die ersten 950m, was der Lage des zentralen Knotenpunkts Bramfelder

Straße/Habichtstraße entspricht (gestrichelte schwarze Linie). Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei dem Fahrer des Messfahrzeugs nicht immer um dieselbe Person handelt und das Auffahrverhalten dadurch variiert, ist es nicht möglich diese Auswertung zu automatisieren.

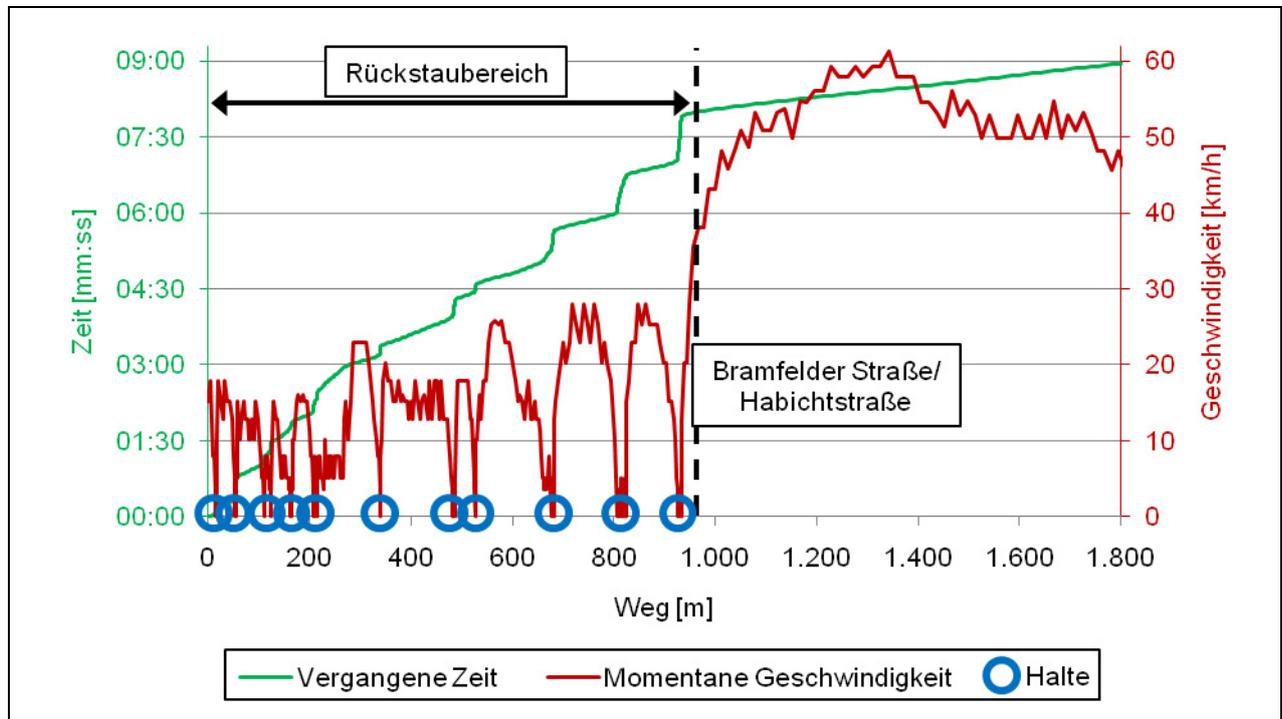


Abbildung 54: GPS-Fahrt am 6.6.2009 um 8:35 Uhr von Messquerschnitt 1 nach Messquerschnitt 3 in Hamburg.

Querschnittserfassung mit Detektor

Die aus den Induktionsschleifen erzeugten RMQs finden in zwei Bereichen der Bewertung der Steuerungsverfahren Verwendung.

Bestimmen der Verkehrsnachfrage (Nachfrageverkehrsstärken)

Die gemessenen Verkehrsstärken an bestimmten Querschnitten werden entweder direkt (Bremerhaven) oder zusammen mit dem Verfahren der Entropiemaximierung (Hamburg, siehe nachfolgende Erläuterungen) zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage verwendet. Anhand der Verkehrsstärken dieser RMQs werden die Verkehrsnachfragen geclustert, so dass nur ähnliche Nachfragesituationen miteinander verglichen werden (siehe nachfolgende Erläuterungen). Für diesen Zweck sind RMQs notwendig, die für die Nachfragesituation relevante Ströme erfassen, wie zum Beispiel Einfahrtsquerschnitte oder wichtige Abbiegeströme.

Bewerten des Verkehrsangebots (Bewertungsverkehrsstärken)

Die gemessenen Verkehrsstärken an relevanten Querschnitten oder Abbiegern werden zusammen mit den Ergebnissen der Kennzeichenerfassungssysteme (Durchgangsverkehrsanteile / Abbiegeanteile) dazu verwendet, Fahrzeiten und Halte quantitativ zu

bewerten. Hierfür sind RMQs von Bedeutung, die die Nachfrage entlang der Relationen auf denen Fahrzeiten gemessen werden, beschreiben.

Querschnittserfassung manuell

Die manuell erfassten Querschnitte dienen nicht zur Bewertung der Steuerungsverfahren. Lediglich in Bremerhaven ersetzt die manuelle Zählung, bedingt durch eine defekte Induktionsschleife, einen RMQ als Eingang des Clusterungsverfahrens und der Bewertung. Ansonsten sind die auf diese Weise erfassten Lkw-Anteile Eingangswerte für die Simulation und die Zählwerte eine Kontrolle der Induktionsschleifen.

Nicht fest installierte Kennzeichenerfassungssysteme

Die Ergebnisse der ANPR-Systeme fließen, wie auch die der RMQs, in zwei Bereiche der Bewertung der Steuerungsverfahren ein.

Bestimmen der Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage wird zum Einen durch die Summe aller Fahrzeuge beschrieben und zum Anderen durch die Routen, denen diese Fahrzeuge folgen. Während die Verkehrsstärke von den RMQs nur lokal erfasst wird, können die Ergebnisse der ANPR-Systeme die Aufteilung (und damit in gewissem Sinne die befahrenen Routen) erfassen. Bei einer vollständigen Erfassung aller Fahrstreifen kann, zusammen mit der Erkennungsrate, aus den Durchgangsverkehrsanteilen, eine sehr gute Abschätzung des tatsächlichen Durchgangsverkehrs zwischen den Messstellen berechnet werden. Da die Messstellen in beiden Testfeldern meist seitlich an mehrstreifigen Straßen liegen und demzufolge keine Vollerfassung möglich ist, lässt sich dieser Ansatz nicht verfolgen. In Hamburg wird stattdessen das Verfahren der Entropiemaximierung zur Berechnung einer Nachfragematrix, deren Grundlage der Durchgangsverkehr aus den ANPR-Systemen ist, verwendet (siehe nachfolgende Erläuterungen). In Bremerhaven sind die Durchgangsverkehrsanteile zur Beschreibung der Nachfrage komplett ungeeignet, da nicht auf allen Fahrtbeziehungen zwischen den Messstellen ausreichend Durchgangsverkehr vorhanden ist (dort wird die Verkehrsnachfrage nur von den RMQs beschrieben).

Bewerten des Verkehrsangebots

Zusammen mit den Bewertungsverkehrsstärken werden die gemessenen Fahr- und Verlustzeiten quantitativ bewertet. Ohne eine Verkehrsstärke, das heißt die Anzahl betroffener Verkehrsteilnehmer, ist es nicht möglich, die gemessenen Zeiten verschiedener Relationen sinnvoll gegenüberzustellen - sei es durch die Summe aller Fahr- und Verlustzeiten oder deren Mittelwerte. Für die Berechnung von Summen und Mittelwerten gilt im Folgenden allgemein:

$$X_{t,sum} = \sum_{i=1}^n X_{t,i} \cdot Q_{t,i}$$

mit

$X_{t,sum}$ Summe der Kenngröße X im Intervall t

$X_{t,i}$ Kenngröße X im Intervall t auf der Relation i

$Q_{t,i}$ Verkehrsstärke im Intervall t auf der Relation i

i Relation i

n Anzahl Relationen

und

$$X_{t,MW} = \frac{X_{t,sum}}{\sum_{i=1}^n Q_{t,i}}$$

mit

$X_{t,MW}$ Gewichteter Mittelwert der Kenngröße X im Intervall t

Unabhängig von den Bewertungsverkehrsstärken kann der Bufferindex, der die Zuverlässigkeit der Verkehrsanlage beschreibt, berechnet werden. Zur Bewertung der Qualität einer Verkehrsanlage ist dieser alleine allerdings ebenfalls nicht ausreichend. Hier ist zusätzlich die Information notwendig, ob zuverlässig eine hohe oder niedrige Qualität des Verkehrsablaufs erreicht wird.

Signalgruppenprotokolle

Die Protokolle der Signalgruppen werden nicht zur Bewertung der Steuerungsverfahren sondern zur Analyse der Stellgrößen verwendet. Die Stellgrößen sind in diesem Fall die Freigabezeiten jeder Richtung und jedes Knotenpunktes, die die verkehrabhängigen Steuerungsverfahren beeinflussen können. Eine Betrachtung der Freigabezeitanteile einzelner Fahrtbeziehungen kann zur Erklärung unterschiedlicher gemessener Fahrzeiten bei ähnlichen Verkehrsnachfragen beitragen.

Da die Bewertung eines Steuerungsverfahrens bei einer bestimmten Verkehrsnachfrage in Stundenblöcken erfolgt, bestimmt sich der Freigabezeitanteil einer bestimmten Fahrtbeziehung durch den Anteil aller Sekunden der betrachteten Stunde in denen die relevanten Signalgruppen Grün anzeigen. Abhängig von der gewünschten Betrachtung kann auf diese Weise der Freigabezeitanteil einer Fahrtrichtung an einem einzelnen Knotenpunkt oder einer Fahrtbeziehung als Abfolge von Knotenpunkten bestimmt werden.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass sich diese Werte für eine (tageszeitabhängige) Festzeitsteuerung direkt aus den Signalzeitplänen (und der Tageszeit) bestimmen lassen, für jegliche Form einer verkehrabhängigen Lichtsignalanlage jedoch ein Protokoll der tatsächlich angezeigten Signalbilder notwendig ist.

Fahrzeugwiedererkennung mittels Induktionsschleifensignatur im Testfeld Bremerhaven

Die aus der Fahrzeugwiedererkennung mittels Induktionsschleifensignatur abgeleiteten Fahrzeiten können Fahrzeiten über einen einzelnen Knotenpunkt hinweg ermitteln. Es wird hierzu keine zusätzliche spezielle Messtechnik benötigt. Da die Daten derzeit allerdings nur lokal am Steuergerät abgegriffen werden können (je Kanal (2 Detektoren) wird ein Rechner benötigt), wurden von vornherein nur Signaturen der Induktionsschleifen in Richtung Südwest erhoben. Aufgrund defekter und für die Auswertung ungeeigneter Detektoren konnte die Fahrzeit allerdings nur für einen Knotenpunkt für den gesamten Messzeitraum bestimmt werden. Zudem konnte die Messmethode selbst anhand der von den Kennzeichenerfassungssystemen gemessenen Fahrzeiten bewertet werden.

Entropiemaximierung

Für die Bestimmung der Verkehrsnachfrage in Hamburg ist es möglich das Verfahren der Entropiemaximierung mit historischen Informationen (siehe auch Friedrich [2009]) nach dem Ansatz von Willumsen [1978] anzuwenden (vgl. auch Kapitel 4.2.2.2).

Um eine Schätzung der Verkehrsverteilung durchzuführen werden für diesen Ansatz eine historische Matrix und Zählwerte benötigt. Die historische (stundenfeine) Matrix wird dabei durch den von den ANPR-Systemen erkannten Durchgangsverkehr repräsentiert und hat demzufolge 4 Quellen und 4 Ziele, die den Messstellen entsprechen. Die RMQs an diesen Stellen liefern die Zählwerte, mit denen die historische Matrix in Einklang gebracht werden soll. Da die Zählwerte Ein- und Ausgangsquerschnitte aus dem betrachteten System darstellen und zum Einen keine absolut fehlerfreie Messung vorliegt und zum Anderen weitere (unbedeutende) Ein- und Ausfahrtstraßen existieren, müssen die Zählwerte nach folgender Formel normiert werden:

$$Q_{t,k,zu,normiert} = Q_{t,k,zu} \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{t,i,zu} + Q_{t,i,ab})}{\sum_{i=1}^n Q_{t,i,zu}}$$

mit

$Q_{t,k,zu,normiert}$ Normierter Zufluss im Intervall t an der Messstelle k

$Q_{t,k,zu}$ Zufluss im Intervall t an der Messstelle k

$Q_{t,i,zu}$ Zufluss im Intervall t an der Messstelle i

$Q_{t,i,ab}$ Abfluss im Intervall t an der Messstelle i

i,k Messstelle i beziehungsweise k

n Anzahl Messstellen

Die Werte der historischen Matrix werden in einem iterativen Prozess mit Korrekturfaktoren verrechnet. Die Korrekturfaktoren berechnen sich als Quotient aus Soll- und Ist-Verkehrsstärken, wobei die Soll-Verkehrsstärken durch die Zählwerte repräsentiert werden und die Ist-Verkehrsstärke von der Matrix des aktuellen Iterationsschrittes geliefert wird. Die

Korrektur erfolgt dabei wechselseitig quell- beziehungsweise zielbezogen und wird abgebrochen, wenn die verbleibende Abweichung zwischen Zählwert und Matrix kleiner als 1 % ist.

Clustering der Verkehrsnachfrage

Die Bewertung und der Vergleich verschiedener Steuerungsverfahren sollen nicht pauschal für ganze Tage oder bestimmte Tageszeiten durchgeführt werden, sondern abhängig von der Verkehrsnachfrage. Aus diesem Grund wird eine Clustering basierend auf den Nachfrageverkehrsstärken durchgeführt. Mit dem Ergebnis der Clustering wiederum können durchschnittliche Tage generiert werden, für die der Verlauf der Bewertungskenngrößen der verschiedenen Steuerungsverfahren direkt gegenübergestellt werden kann.

Eine Clustering hat das Ziel Gruppen ähnlicher Objekte zu bilden. Im vorliegenden Fall sind die Objekte die 12 Stunden der 10 Messtage von 6:30-7:30 Uhr. Die Ähnlichkeit wird über eine Distanzfunktion berechnet, deren Eingangsgrößen die Nachfrageverkehrsstärken sind.

Distanzfunktion

Die Distanzfunktion berechnet den Mittelwert der mittleren GEH [UK Highway Agency 1996] aller Nachfrageverkehrsstärken und der Summe aller Nachfrageverkehrsstärken. Der GEH definiert sich dabei wie folgt:

$$GEH_{(Q_1, Q_2)} = \sqrt{\frac{2 \cdot (Q_1 - Q_2)^2}{Q_1 + Q_2}}$$

Wobei Q_1 und Q_2 die zu vergleichenden Verkehrsstärken darstellen. Der GEH ist eine selbstskalierende Größe und hat deshalb die Eigenschaft, dass er für Vergleiche von Wertepaaren unterschiedlicher Größenordnungen eine gemeinsame Basis liefert. Die Verwendung von relativen oder absoluten Distanzmaßen hätte den Nachteil, dass diese bei unterschiedlich hohen Verkehrsstärken eine unterschiedliche Bewertung mit sich bringen. Tabelle 25 veranschaulicht dies.

Die Schwäche einer relativen Bewertung ist, dass diese nicht in der Lage ist zwischen dem ersten und dem dritten Paar zu unterscheiden. Wobei es offensichtlich ist, dass die Abweichung von 10 Fahrzeugen weniger bedeutend ist als die von 1000. Die absolute Betrachtung wiederum kennt keinen Unterscheid zwischen dem ersten und dem zweiten Vergleich - eine Differenz von 10 Fahrzeuge ist zwar in den meisten Fällen klein, dennoch nimmt die Bedeutung mit steigender Verkehrsstärke ab. Der GEH ist in der Lage diese Punkte zu berücksichtigen. Im Allgemeinen, wobei dies problemangepasst betrachtet werden sollte, trifft die Aussage zu, dass ein GEH von bis zu 5 im Bereich gängiger Verkehrsstärken (bis ca. 6000 Kfz/h) bedeutet, dass die Werte ähnlich sind.

Nr.	Q_1 [Kfz/h]	Q_2 [Kfz/h]	GEH [-]	Relativ Q_1/Q_2 [%]	Absolut $Q_1 - Q_2$ [Kfz/h]
1	10	20	2,58	50	-10
2	990	1000	0,32	99	-10
3	1000	2000	25,82	50	-1000

Tabelle 25: Beispielberechnung zu Abständen von Verkehrsstärken.

Die Distanzfunktion berechnet den Abstand zwischen 2 Stunden $t1$ und $t2$ dann zu

$$Distanz_{(t1,t2)} = a \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2 \cdot (Q_{t1,i} - Q_{t2,i})^2}{Q_{t1,i} + Q_{t2,i}}}}{n} + b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\sum_{i=1}^n (Q_{t1,i} - Q_{t2,i}))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{t1,i} + Q_{t2,i})}}$$

mit

- a Gewichtungsfaktor Struktur (0,5)
- b Gewichtungsfaktor Gesamtnachfrageverkehrsstärke (0,5)
- $Q_{t1,i}$ Nachfrageverkehrsstärke i der Stunde $t1$
- $Q_{t2,i}$ Nachfrageverkehrsstärke i der Stunde $t2$
- n Anzahl verschiedener Nachfrageverkehrsstärken

wobei der erste Term den Mittelwert der einzelnen GEHs und der zweite Term den GEH der Summe repräsentiert. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Distanz nicht nur durch die Struktur, sondern auch durch die Gesamtnachfrageverkehrsstärke beeinflusst wird - ein Wert der für die Qualität einer Lichtsignalanlage über die diese Nachfrage abgefertigt werden soll von Bedeutung ist. Die Berechnung in Tabelle 26 erläutert diesen Einfluss.

	$t1$	$t2$	$t3$	$GEH(Q_{t1,y}, Q_{t2,y})$	$GEH(Q_{t1,y}, Q_{t3,y})$
$Q_{tx,1}$	100	110	90	0,98	1,03
$Q_{tx,2}$	120	130	130	0,89	0,89
Summe	220	240	220	1,32	0,00
				$Distanz(t1,t2)$	$Distanz(t1,t3)$
			$a=1; b=0$	0,94	0,96
			$a=b=0,5$	1,13	0,48

Tabelle 26: Beispielberechnung Distanzfunktion.

In dieser Beispielrechnung werden die Distanzen der Stunden $t2$ und $t3$ zur Stunde $t1$ berechnet. Die Nachfrage wird durch die zwei Verkehrsstärken $Q_{tx,y}$ mit $y \in [1;2]$, wobei für alle Stunden gilt, dass $Q_{tx,1}$ kleiner ist als $Q_{tx,2}$ aber nur $t1$ und $t3$ dieselbe Gesamtnachfrage aufweisen. Wird die Distanz ohne Berücksichtigung der Summe berechnet ($a=1$ und $b=0$) dann ist $t2$ mit 0,94 etwas ähnlicher zu $t1$ als $t3$. Werden Summe und Struktur gleich gewichtet ($a=b=0,5$), dann ist $t3$ die zu $t1$ mit einer Distanz von 0,48 deutlich ähnlichere Stunde. Für die Untersuchungen im Rahmen von AMONES wird eine Gleichgewichtung von Struktur und

Nachfrage gewählt, da die von den Steuerungsverfahren abzufertigende Verkehrsstärke von Bedeutung für die zu erreichende Qualität ist.

Clusterverfahren

Die Clusterung nach der Average-Linkage Methode (siehe auch Jain Dubes [1988] oder Zahn [1971]) wird mit der Software MATLAB von The Mathworks durchgeführt.

Dieses Verfahren berechnet zunächst die Distanzmatrix zwischen allen Objekten, das heißt allen Stunden eines Testfeldes (im Idealfall 120 Stunden aus 10 Tagen mit je 12 Stunden - wobei aufgrund von Störungen in Bremerhaven nur 117 und in Hamburg 118 Stunden vorliegen). Zu Beginn des Prozesses befinden sich alle Objekte in einer eigenen Gruppe beziehungsweise Cluster. Schrittweise werden dann die beiden Cluster mit der geringsten Distanz zueinander zusammengefasst und die Distanzmatrix neu berechnet. Die Distanzen zu dem neuen zusammengeführten Cluster ergeben sich dabei aus dem Mittelwert der Einzeldistanzen aller enthaltenen Objekte. Dieser Zusammenführungsprozess wird so lange fortgeführt, bis die aktuell kleinste Distanz zwischen zwei Clustern einen bestimmten Grenzwert überschreitet (wahlweise kann auch eine festgelegte Anzahl von Clustern als Abbruchkriterium verwendet werden). Wird ein beliebig großer Grenzwert gewählt, fallen folglich alle Objekte in denselben Cluster. Umgekehrt hat ein zu kleiner Grenzwert zur Folge, dass alle Objekte einen eigenen Cluster bilden. Demzufolge ist es notwendig diesen Grenzwert passend zu wählen. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl und Größenordnung der Nachfrageverkehrsstärken ist dieser Grenzwert in beiden Testfeldern unterschiedlich (siehe Kapitel 8.5.2.2 und 9.5.2.2).

Erzeugung eines durchschnittlichen Tages

Basierend auf dem Ergebnis der Clusterung kann der Verlauf der Bewertungskenngrößen (mittlere Fahrzeit, mittlere Anzahl Halte, usw.) für einen durchschnittlichen Tag berechnet werden. Tabelle 27 verdeutlicht die Vorgehensweise.

Diese Tabelle führt in der ersten durchgängigen Zeile die Anteile der enthaltenen Cluster im Zeitraum von 8:00-9:00 Uhr auf. Demzufolge sind je 50 % aller beobachteten Stunden in diesem Zeitraum den Clustern eins und zwei zugeordnet, die eine Nachfrage morgendlicher Struktur mit hoher beziehungsweise mittlerer Verkehrsstärke repräsentieren.

In den Zeilen darunter finden sich die nach Verkehrsstärken gewichteten mittleren Fahrzeiten aller in diesen Clustern enthaltenen Stunden, wobei eine Trennung zwischen den Steuerungsverfahren, die gegenübergestellt werden sollen, bestehen bleibt. Die Spalte ganz rechts enthält schließlich die nach den Clusteranteilen berechnete durchschnittliche Fahrzeit für jedes Verfahren in diesem Zeitraum. So ergeben sich die 4,5 Minuten durchschnittliche Fahrzeit für das Verfahren eins im Zeitraum von 8:00-9:00 Uhr aus folgender Berechnung:

$$0,5 \cdot 5,0 \text{ min} + 0,5 \cdot 4,0 \text{ min} + 0,0 \cdot 4,0 \text{ min} = 4,5 \text{ min}$$

Die auf diese Art und Weise für jeden Zeitraum und jedes Steuerungsverfahren berechneten Kenngrößen und daraus erzeugten Ganglinien eines durchschnittlichen Tages, lassen sich direkt gegenüberstellen. Da diese im Gegensatz zu einem Vergleich von einzelnen

(Wochen)tagen (zum Beispiel Dienstag mit Donnerstag oder Freitag) von den tagesabhängigen Schwankungen bereinigt sind.

Zeitraum		Cluster			Aggregierte Größen	
		1 Morgens hoch	2 Morgens mittel	3 Mittags		
8:00-9:00	Anteil von Cluster im Zeitraum	50 %	50 %	0 %	Summe	100 %
	Mittlere Fahrzeit von Verfahren 1 im Cluster	5,0 min	4,0 min	4,0 min	Durchschnittliche Fahrzeit Verfahren 1 im Zeitraum	4,5 min
	Mittlere Fahrzeit von Verfahren 2 im Cluster	6,0 min	4,0 min	3,5 min	Durchschnittliche Fahrzeit Verfahren 2 im Zeitraum	5,0 min
9:00-10:00	Anteil von Cluster im Zeitraum	75 %	0 %	25 %	Summe	100 %
	Mittlere Fahrzeit von Verfahren 1 im Cluster	6,0 min	4,5 min	4,0 min	Durchschnittliche Fahrzeit Verfahren 1 im Zeitraum	5,5 min
	Mittlere Fahrzeit von Verfahren 2 im Cluster	

Tabelle 27: Auf Clusterung basierende Berechnung von durchschnittlichen Kenngrößen.

5.1.13 Methodische Vorgehensweise bei der Simulation der verkehrlichen Kenngrößen

Das folgende Kapitel beschreibt das Vorgehen bei der Simulation der beiden realen Testfelder in Bremerhaven (MOTION) und Hamburg (BALANCE) sowie beim virtuellen Testfeld, vom Aufbau der Simulationsnetze über deren Kalibrierung bis hin zur Auswertungsmethodik.

5.1.13.1 Aufbau der Simulationsnetze

Für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation im Projekt AMONES wird das Programm VISSIM in der Version 5.10 [PTV 2008] der Firma *PTV Planung Transport Verkehr AG* genutzt.

Bremerhaven

Für die Simulationen in Bremerhaven lag bereits Netz der Siemens AG vor, welches genutzt werden konnte. Das Netz enthielt sämtliche Streckenabschnitte inklusive der Fahrstreifen, sowie Signalgeber und Detektoren. Die Verkehrsnachfragen für den MiV, ÖPNV (in Form mehrerer Buslinien) und nMiV, sowie Abbiegebeziehungen, Querverkehrsstörungen und Fahrverhaltensparameter waren in diesem Netz noch nicht versorgt.

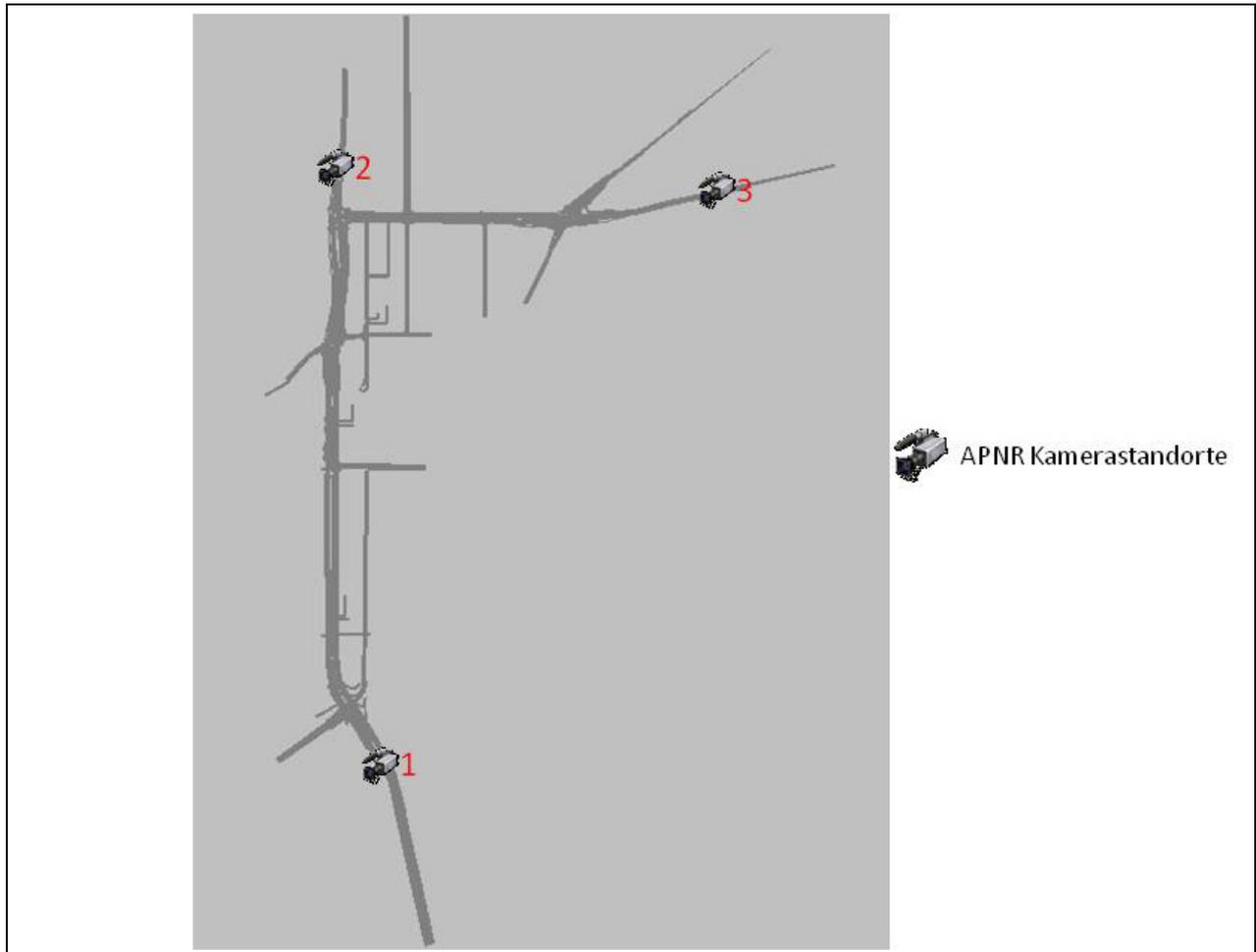


Abbildung 55: Simulation des Testfelds Bremerhaven in VISSIM mit Standorten der Fahrzeitmessungen.

Hamburg

Für das Testfeld Hamburg existierte kein VISSIM-Netz, so dass dieses für die Simulation komplett neu aufgebaut werden musste. Dazu wurde zunächst das Grundnetz mit Strecken und Verbindern, Querverkehrsstörungen und Konfliktflächen sowie Signalgebern und Detektoren anhand von Luftbildern und Plänen aufgebaut. Die Versorgung der LSA-Steuerungen konnte von der Stadt Hamburg bzw. der Firma GEVAS zur Verfügung gestellt und direkt in die Simulation übernommen werden. Die Fahrverhaltensparameter wurden im Rahmen der unten beschriebenen Kalibrierung eingestellt.

Die Verkehrsnachfrage für den MIV (in VISSIM modelliert als Fahrzeugzusammensetzungen, Zuflüsse und Routen) wurde aus den im Feldtest erhobenen Detektordaten und manuellen Zählungen abgeleitet. Die Nachfrage des ÖPNV (8 Buslinien) basiert auf Fahrplandaten. Für den Fuß- und Radverkehr (NMIV) lagen weder aus den Feldtests noch aus anderen Quellen belastbare Daten zur Nachfrage vor. Da die Freigabe für Fußgänger und Radfahrer im Testgebiet an den meisten Furten nur auf Anfrage erfolgt, hat die Modellierung des NMIV große Auswirkungen auf den Verkehrsablauf im MIV. Daher wurde aus den Signalgeberprotokollen ermittelt, wie oft im Feldtest an den einzelnen Knoten/Furten im Tagesverlauf eine Freigabe (aufgrund einer Anforderung durch den NMIV) geschaltet wurde. Anschließend wurde daraus

für jede Furt die Anzahl der Verkehrsteilnehmer im NMIV bestimmt, die dort poissonverteilt ankommen müssen, um das beobachtete Anforderungsverhalten abzubilden.

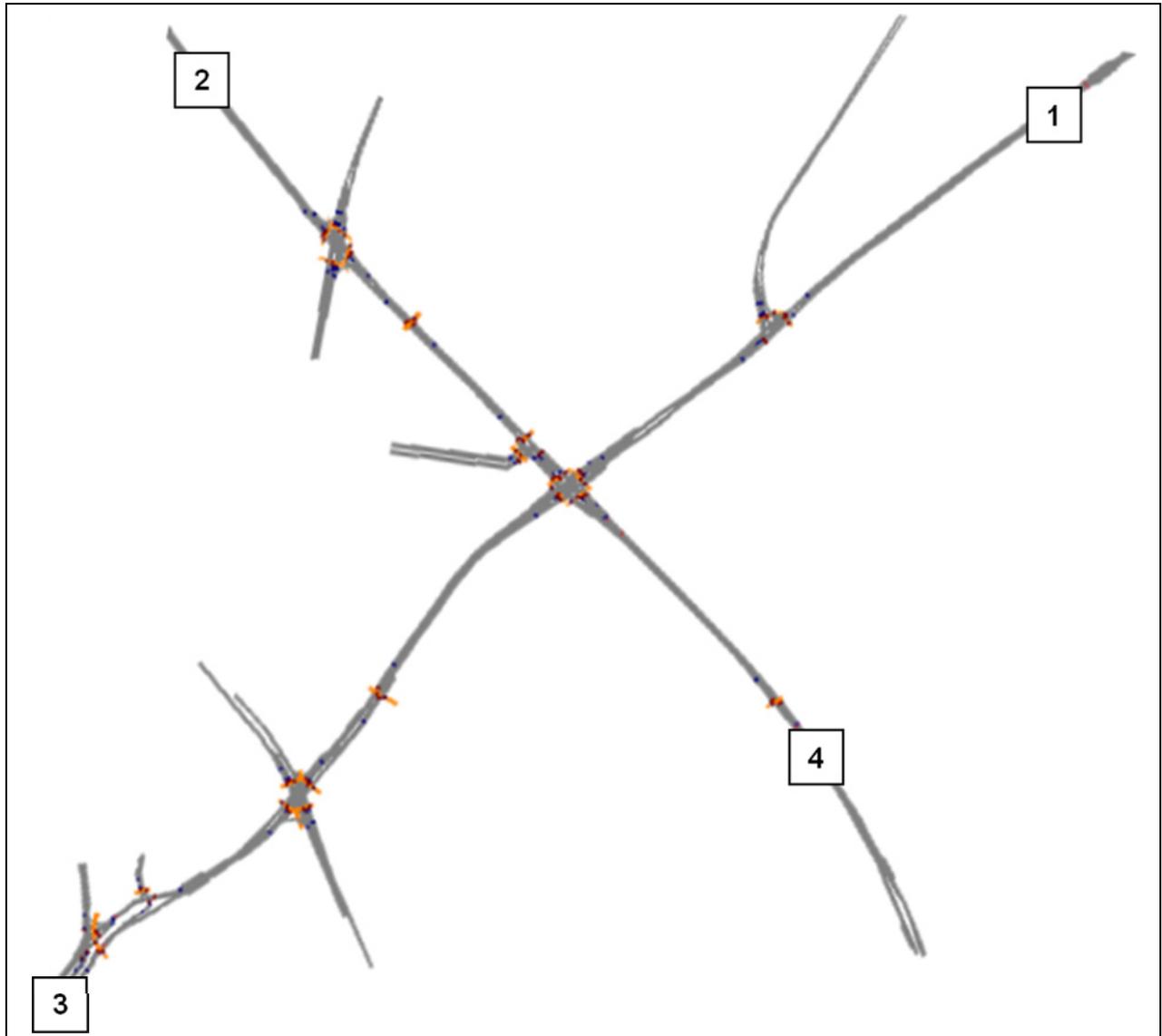


Abbildung 56: Simulationsnetz des Testfelds Hamburg in VISSIM.

Virtuelles Testfeld

Das virtuelle Testfeld orientiert sich an typischen innerstädtischen Straßennetzen in Deutschland. Die konkrete Ausgestaltung wurde in AMONES frei gewählt und hat keine direkte Entsprechung in der Realität. Eine ausführliche Beschreibung des virtuellen Testfeldes befindet sich in Kapitel 10.

5.1.13.2 Simulation der Lichtsignalsteuerung

Die Steuerung für die Simulation der realen Testfelder wird eins zu eins für die Simulation übernommen. Die Versorgung der Steuerung für das virtuelle Testfeld wird von den Partnern

selbst übernommen. Die lokale Verkehrsabhängigkeit wurde dabei so konzipiert, dass sich in beiden Systemwelten, die gleichen Schaltungen ergeben sollen.

Siemens Systemwelt

Für die Simulation von MOTION, den lokalen Verkehrsabhängigkeiten und der Festzeitsteuerung werden verschiedene SITRAFFIC Komponenten benötigt. Für die Simulation ist eine vollständige Versorgung von SITRAFFIC C900V Steuergeräten [Siemens 2003] nötig, wie sie auch für ein reales Steuerungsgebiet umzusetzen wäre. Für das Testfeld Bremerhaven wurde diese Versorgung von Siemens aus dem realen Testfeld übernommen und bereitgestellt. Für das virtuelle Testfeld wurde die Versorgung vom AMONES Partner der TU München übernommen. [Siemens 2008a]

Für die Planung von Knoten, Netz und des MOTION Bereich wird der Verkehrsingenieursarbeitsplatz SITRAFFIC Office [Siemens 2007] verwendet. Die Versorgung von MOTION für die Optimierung der Freigabezeiten geschieht direkt aus SITRAFFIC Office. Die Parametrierung für Umlaufzeit-, Phasenfolge- und Versatzzeitoptimierung wird aktuell über Parameterdateien vorgenommen.

Die Geräteversorgung der virtuellen Steuergeräte erfolgt mittels des Programms SITRAFFIC Control [Siemens 2008c]. Ein Großteil der Daten kann hierfür aus SITRAFFIC Office übernommen werden.

Die lokalen Verkehrsabhängigen Steuerungen werden mit dem Programm SITRAFFIC Language [Siemens 2005b] erstellt. Sowohl im Testfeld Bremerhaven als auch im virtuellen Testfeld werden Befehle des Verfahrens SITRAFFIC PDMe (Phasensteuerung mit dezentraler Modifikation) [Siemens 2008d] sowie für die MOTION Funktionalitäten Befehle des Verfahrens SITRAFFIC M-Xe [Siemens 2008e] verwendet.

Die Schnittstelle CvSim ermöglicht die Bedienung der Steuergeräte. Sie ist außerdem für den Datenaustausch zwischen der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation VISSIM und den zentralenseitigen Komponenten wie SITRAFFIC MOTION und der der Verkehrszentrale zuständig. Im Gegensatz zur reinen VA-Simulation in VISSIM ist es hiermit auch möglich zwischen verschiedenen Signalplänen umzuschalten. Es ist somit zum Beispiel möglich eine Tagesplanabhängige Festzeitsteuerung zu simulieren.

Für die MOTION Simulation wird zusätzlich noch die Zentralenkomponente SITRAFFIC Concert [Siemens 2009] aus der Verkehrsmanagementzentrale SITRAFFIC Scala benötigt. SITRAFFIC Concert übernimmt dabei die Datenhaltung für MOTION.

BALANCE/TRENDS Systemwelt

Zur Simulation von BALANCE und den mittels TRENDS-Kern realisierten lokalen Steuerungen (regelbasierte Verkehrsabhängigkeiten und Festzeitsteuerung) werden verschiedene Komponenten (vgl. Abbildung 57) benötigt.

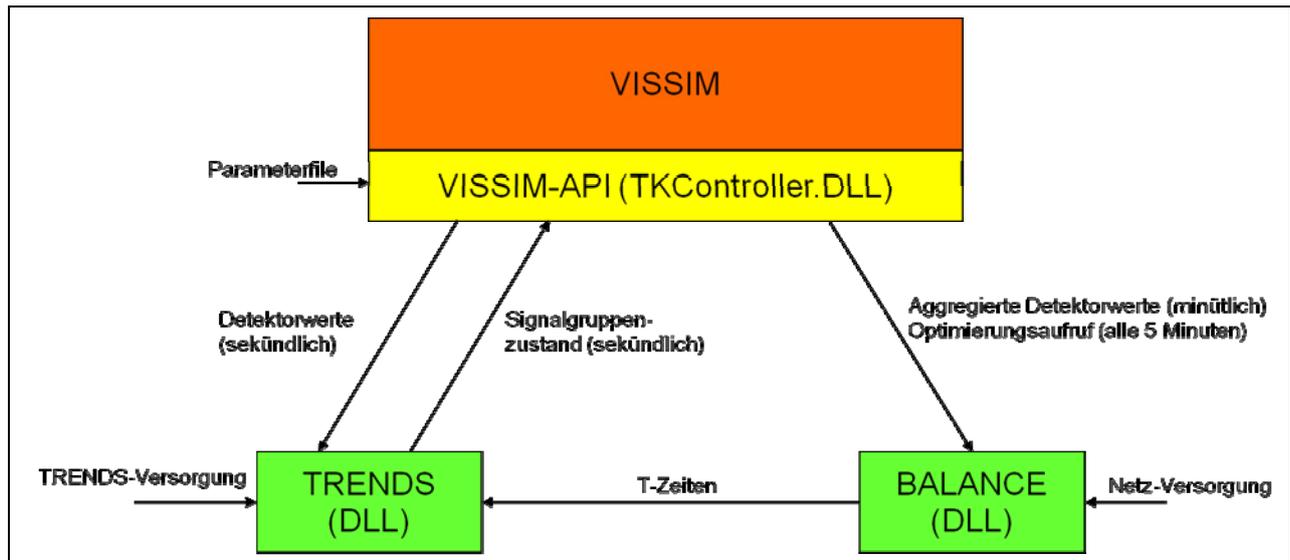


Abbildung 57: Systemübersicht zur Anbindung von TRENDS/BALANCE an VISSIM (Quelle: GEVAS Software).

Für die Simulation ist eine vollständige TRENDS-Versorgung für die Einzelknoten sowie eine zusätzlich BALANCE-Versorgung (mit Netz- und Knotenbezug) nötig, wie sie auch für ein reales Steuerungsgebiet umzusetzen wäre. Für das Testfeld Hamburg wurde diese Versorgung aus dem realen Testfeld bereitgestellt. Für das virtuelle Testfeld wurde sie von der TU Braunschweig in Abstimmung mit der TU München erstellt.

Die Planung und Bearbeitung der Versorgung für die Einzelknoten (Festzeitsteuerung, LRS und knotenspezifische BALANCE-Parameter) erfolgte mit der Verkehrsingenieursarbeitsplatzsoftware CROSSIG. Die netzspezifische BALANCE-Versorgung wurde mittels der Mikrosimulationssoftware NONSTOP erstellt und bearbeitet. Beide Programme wurden der TU Braunschweig für die Bearbeitung des Projektes von der Firma GEVAS Software kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Die Schnittstelle zur Anbindung von BALANCE an die Mikrosimulationssoftware VISSIM wurde von der Firma GEVAS Software im Rahmen eines Unterauftrages entwickelt. Die TKController-DLL dockt dabei an die von VISSIM angebotene API zur Einbindung externer Lichtsignalsteuerungen an und dient damit als Vermittler zwischen VISSIM und dem TRENDS-Kern bzw. der BALANCE-Steuerung, die beide jeweils als DLL vorliegen (Abbildung 57). Der TRENDS-Kern erhält von der TKController-DLL sekundlich die aktuellen Detektorwerte übermittelt und sendet seinerseits die zu schaltenden Signalgruppenzustände an VISSIM. Die BALANCE-Komponente erhält von der TKController-DLL minütlich die aggregierten Detektorwerte mitgeteilt, zudem wird alle fünf Minuten der Optimierungsprozess gestartet. Das Optimierungsergebnis, die neuen T-Zeiten, werden von BALANCE direkt an den TRENDS-Kern übermittelt. Die Versorgungsdaten und alle Parameter werden dem System über mehrere Konfigurationsdateien bereit gestellt.

5.1.13.3 Kalibrierung und Validierung

Die Kalibrierung wurde gemäß der beschriebenen Vorgehensweise in „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ [FGSV 2006b] und den in „Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software“ der Federal Highway Administration [2004] empfohlenen Schritten durchgeführt. Als Kenngößen werden Verkehrsstärken und Fahrzeiten aus den Feldmessungen verwendet.

Im ersten Schritt wird dazu die Kapazität der Fahrstreifen bzw. Querschnitte festgelegt. Wie in den meisten mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen kann auch in VISSIM dieser Wert nur indirekt festgelegt werden. In innerstädtischen Straßennetzen, sind in der Regel die Sättigungsverkehrsstärken der lichtsignalgeregelten Knotenpunkte für die Kapazität maßgebend. Diese werden vor allem durch die Anfahrvorgänge an der Haltelinie und das Verhalten beim Auffahren auf einen Rückstau bestimmt. In VISSIM können hierfür die Parameter zum Fahrermodell und das Beschleunigungsverhalten (Wunschbeschleunigung) der einzelnen Fahrzeugklassen (Pkw; Lkw), sowie daraus folgend auch die Verkehrszusammensetzung zum Einstellen genutzt werden.

Im zweiten Schritt werden die Verkehrsstärken im Netz kalibriert. Die gemessenen Verkehrsstärken an den Zufahrten dienen dabei als Eingangsgrößen. Die Routenentscheidungen, sofern diese nicht z. B. wegen eigener Fahrstreifen (bei lokalen Routenentscheidungen z. B. für den Linksabbieger) direkt gemessen werden können, und die Zuflüsse aus nicht erfassten Zufahrten ins Netz sind hier die zu kalibrierenden Parameter.

Im dritten Schritt werden die Fahrzeiten, Staulängen und Staudauern kalibriert. Aus den Testfeldern stehen hier im Wesentlichen Fahrzeiten über einen ausreichenden Zeitraum zur Verfügung. Die zu kalibrierenden Parameter sind hier Wunschbeschleunigungen und Wunschgeschwindigkeiten der verschiedenen Fahrzeugklasse, die Verkehrszusammensetzung und Querverkehrsteuerungen.

Als Kalibrierungsziele werden, wie in „Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software“ [Federal Highway Administration 2004] beschrieben, die Verkehrsstärke und die GEH Distanzfunktion [UK Highway Agency 1996] verwendet (siehe auch 5.1.12.3 Methodik zur Bewertung der Steuerungsverfahren, Distanzfunktion):

$$GEH_{(E,V)} = \sqrt{\frac{2 \cdot (E - V)^2}{E + V}}$$

mit

E simulierter Wert

V realer Wert

Der GEH Wert darf in maximal 15 Prozent der zur Kalibrierung verwendeten Zeitintervalle einen Wert von 5 überschreiten.

Als Kalibrierungsziel für die Fahrzeiten, soll diese in maximal 15 Prozent der Zeitintervalle nicht mehr als 15 Prozent vom realen Wert abweichen.

Für die Validierung sollte ein weiterer, unverbraucher Datensatz verwendet werden, mit dem die kalibrierten Parameter für eine andere Verkehrssituation überprüft werden.

Bremerhaven

Für die Kalibrierung werden die erhobenen Daten vom Mittwoch, den 25.2.2009 verwendet. Die Steuerung lief an diesem Tag in Festzeit.

Im ersten Schritt werden die Parameter, die Einfluss auf die Kapazität der Querschnitte und Fahrstreifen haben festgelegt. Da in Bremerhaven während der Feldmessungen, kaum Rückstaus an den Haltelinien zu beobachten waren und diese daher auch nicht erhoben wurden, werden für die Parameter, die die Kapazität der Fahrstreifen und Querschnitte beeinflussen Standardparameter gewählt oder Einstellungen aus anderen Projekten, die ebenfalls mit dem Simulationsprogramm VISSIM [PTV 2008] im innerstädtischen Bereich arbeiten, verwendet.

Als Fahrermodell wird das in VISSIM verwendete Modell von Wiedemann [1974] mit den voreingestellten Werten genutzt.

Die Wunschbeschleunigungen für PKW und LNF (leichte Nutzfahrzeuge) orientieren sich an den im Projekt GAVE (Grazer Adaptive Verkehrssteuerung - Ansätze für eine emissionsminimierende Lichtsignalsteuerung) [Hirschmann 2009] ermittelten Beschleunigungsverhalten für den lichtsignalgeregelten Verkehr. Die Wunschbeschleunigungen für LKW wurden hier nicht erhoben. Das Beschleunigungsverhalten lehnt sich daher an Beschleunigungs-Wegdiagramme von teilbeladenen Lkw an [Fürbeth 1993]. Die Bremsverzögerungen entsprechen den Default Einstellungen in VISSIM.

Die Verkehrszusammensetzung wurde im Testfeld an den drei Hauptzuflüssen des Netzes an den APNR Standorten (siehe Abbildung 55) jeweils in der ersten Viertelstunde jeder Stunde erhoben. Der Schwerverkehrsanteil liegt dabei zwischen null und 15 Prozent. Da die Werte sehr stark schwanken, wird für die drei Hauptzufahrten der Mittelwert über alle Messtage zugrunde gelegt, wobei extreme Ausschläge für die gesamte Stunde übernommen werden. Für die übrigen, nicht erhobenen, Zufahrten wird ein Schwerverkehrsanteil von einem Prozent angenommen.

Im zweiten Schritt werden die Verkehrsstärken im Netz kalibriert. Im simulierten Netz gibt es 17 Zufahrten. Für 10 dieser Zufahrten liegen Verkehrsstärken aus Messungen von Induktionsschleifen vor. Diese dienen als Eingangsgrößen. Bei den restlichen 7 Zufahrten handelt es sich um 2 Parkhäuser, sowie um 5 unsignalisierte Rechtseinbieger bzw. Zufahrten an generell unsignalisierten Knotenpunkten. Die Zuflüsse dieser Zufahrten dienen als Stellgrößen für die Kalibrierung.

Für die Linksabbieger und Linkseinbieger stehen in der Regel eigene, detektierte Fahrstreifen zur Verfügung. Die Abbiegeraten können hierfür direkt ermittelt werden. Für Rechtsabbieger und Geradeausfahrer, sowie für Rechtseinbieger und kreuzende Fahrzeuge gibt es dagegen in der Regel einen Mischfahrstreifen. Die Abbiegeraten hierfür dienen als Stellgrößen für die Kalibrierung.

Für die Kalibrierung können nur neun der elf Messquerschnitte im Netz verwendet werden, da die Daten an zwei Messquerschnitten nicht plausible Werte haben.

Da in Bremerhaven während der Feldmessungen kaum Rückstaus und somit auch keine Staudauern vorhanden und diese damit auch nicht zu messen waren, werden im dritten Schritt der Kalibrierung nur Fahrzeiten kalibriert. Aufgrund der geringen Verkehrsbelastung der Verbindung 1-3 und 3-1 (siehe Abbildung 55) im realen Testfeld, und somit auch in der Simulation, werden nur die übrigen vier Fahrbeziehungen (1-2; 2-1; 2-3; 3-2) für die Kalibrierung verwendet. Als Stellgröße für die Kalibrierung der Fahrzeiten dienen Querverkehrsstörungen (im Besonderen die Fußgängerströme beim bedingt verträglichen Rechtsabbiegen), Wunschgeschwindigkeiten der verschiedenen Fahrzeugklassen (Pkw und Lkw), sowie der Schwerverkehrsanteil. Dieser bewegt sich im Rahmen, der an den Hauptzufahrten erhobenen Anteile.

Die Kalibrierung der Fahrzeiten gestaltet sich aufgrund von taktischem Fahren im realen Testfeld jedoch schwierig. Da den Fahrern, im Besonderen denjenigen mit Ortskenntnissen, die Schaltzeiten der Koordinierung vertraut sind, sind die Geschwindigkeiten zum Ende der Freigabezeit auf der koordinierten Route im Schnitt höher als es zu Beginn der Freigabezeit ist. Es sind dabei Differenzen in der Durchschnittsgeschwindigkeit von bis zu 20 km/h zu beobachten, so dass es gegen Ende der Freigabezeit zu Geschwindigkeiten von ca. 70 km/h kommen kann. Besonders auf der Columbusstraße, welche sich im Vergleich zur Lloydstraße durch größere Knotenpunktabstände und ein geringeres Verkehrsaufkommen auszeichnet, schlägt sich dieses Verhalten deutlich in den Fahrzeiten nieder. Dieses taktische Fahren kann in der Simulation nicht abgebildet werden.

In Bremerhaven sind die Abweichungen in den Verkehrsstärken und Fahrzeiten für die einzelnen Steuerungen nicht allzu groß. Die Reisezeiten der unterschiedlichen Tage, an denen die Festzeitsteuerung lief, erfüllen, trotz unterschiedlicher Verkehrsnachfragen, bei einer stündlichen Auswertung, die für die Untersuchung angesetzten Kalibrierungsziele. Auf eine explizite Validierung wurde daher verzichtet.

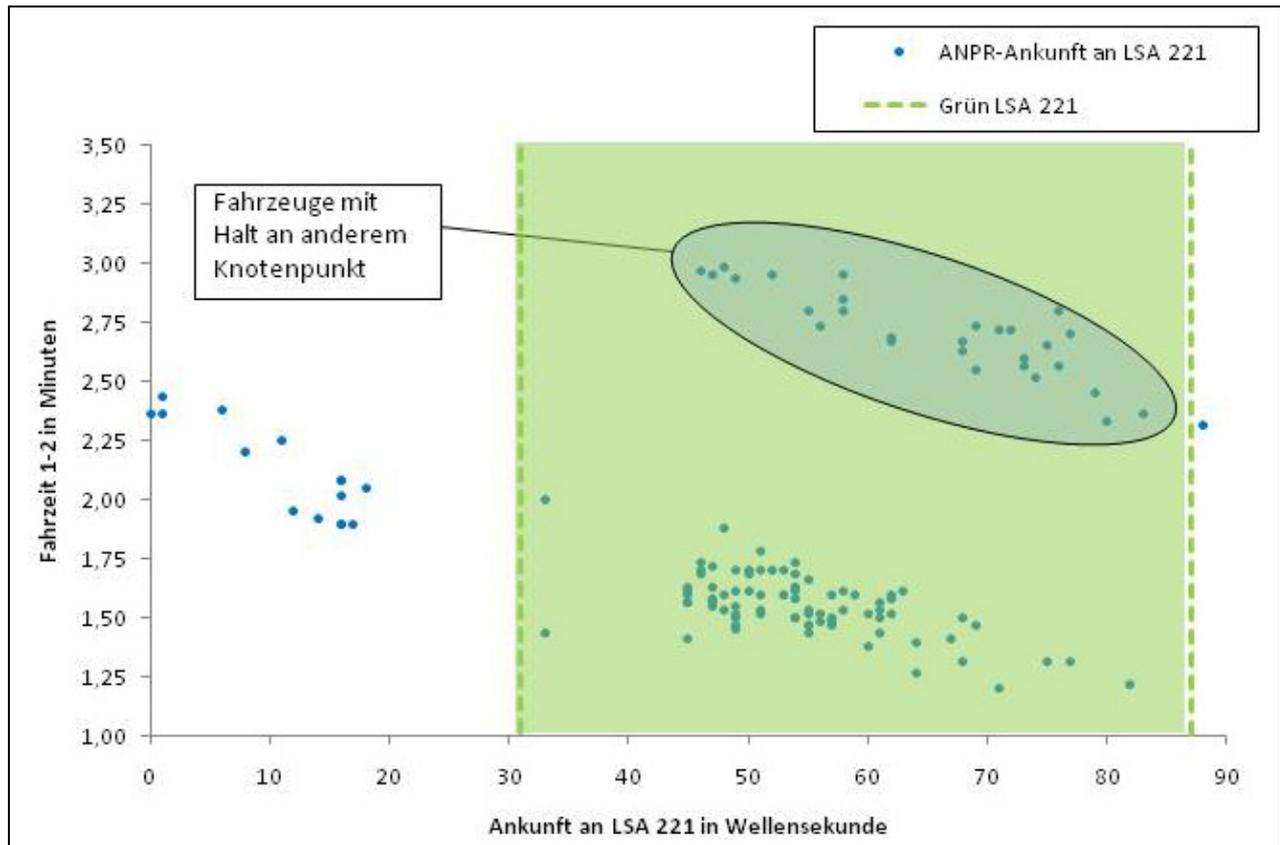


Abbildung 58: Beispiel für taktisches Fahren: Je später ein Fahrzeug während der Freigabezeit ankommt desto höher ist seine Geschwindigkeit um in der Koordinierung zu bleiben.

Hamburg

Für die Kalibrierung wurden zunächst ebenfalls die erhobenen Daten eines Tages mit Festzeitsteuerung (Mittwoch, 8.10.2008) verwendet. Hierbei wurden mit nur geringen Veränderungen der Standardparameter in VISSIM bereits befriedigende Ergebnisse erzielt. Eine versuchte Validierung mit verkehrsabhängiger Steuerung (LRS) und den Messdaten eines entsprechenden Tages (Donnerstag, 9.10.2008) schlug jedoch fehl. Es zeigte sich, dass die Auswirkungen der Verkehrsabhängigkeit (Bedarfsphasen für Abbieger und Fußgänger) mit den eingestellten Parametern nur unzureichend abgebildet werden konnten. Daher wurde eine erneute Kalibrierung unter Verwendung der lokal regelbasierten Steuerung (LRS) und der Messdaten vom 9.10.2008 wie nachfolgend beschrieben durchgeführt.

Als Fahrermodell wird das in VISSIM verwendete Modell von Wiedemann [1974] mit den voreingestellten Werten genutzt. Lediglich der Parameter „Mittlerer Stillstandsabstand“ wird von 2,0 m auf 0,75 m reduziert. Analog zum Testfeld Bremerhaven orientieren sich die Wunschbeschleunigungen für PKW und LNF (leichte Nutzfahrzeuge) an den in GAVE [Hirschmann 2009] ermittelten Beschleunigungsverhalten bzw. für Lkw an den Beschleunigungs-Wegdiagrammen von teilbeladenen Lkw [Fürbeth 1993]. Die Bremsverzögerungen entsprechen den Default Einstellungen in VISSIM.

Die Verkehrszusammensetzung wurde in der zweiten Erhebungswoche an den vier Hauptzuflüssen (und Abflüssen) des Netzes (siehe Abbildung 56) jeweils in der ersten Viertelstunde jeder Stunde erhoben. Der ermittelte Schwerverkehrsanteil liegt zwischen 1 und 15 Prozent und schwankt stark. Daher werden für die vier Hauptzufahrten je Stunde zunächst die Mittelwerte über alle Messtage gebildet. Die so entstandenen mittleren Ganglinien der Schwerverkehrsanteile weisen jeweils an den Zu- und Abflüssen 1 und 3 bzw. 2 und 4 ähnliche Verläufe auf und werden zu insgesamt zwei Schwerverkehrsanteilsganglinien zusammen gefasst. Der Schwerverkehrsanteil liegt zwischen 2% und 6% (Zuflüsse 1 und 3) bzw. 2% und 10% (Zuflüsse 2 und 4). Die übrigen Zuflüsse erhalten je nach Lage im Netz eine der beiden Ganglinien zugewiesen.

Im zweiten Schritt werden die Verkehrsstärken im Netz kalibriert. Im simulierten Netz gibt es jeweils 12 Zu- und Abflüsse. Für alle 12 Zuflüsse sowie 4 Abflüsse liegen Verkehrsstärken aus Messungen von Induktionsschleifen vor. An den Knotenpunkten stehen für die Linksabbieger und Linkseinbieger in der Regel eigene, detektierte Fahrstreifen zur Verfügung. Die Abbiegeraten können hierfür direkt ermittelt werden. Für Rechtsabbieger und Geradeausfahrer, sowie für Rechtseinbieger und kreuzende Fahrzeuge können die Verkehrsstärken aufgrund von Mischfahrstreifen dagegen in der Regel nur gemeinsam detektiert werden. Die Abbiegeraten dort sowie die acht nicht detektierten Abflüsse dienen als Stellgrößen für die Kalibrierung.

Für die Kalibrierung können grundsätzlich 20 Messquerschnitte verwendet werden, wovon jedoch drei aufgrund nicht plausibler Detektorwerte ausgeschlossen werden mussten. Als Zeitintervall wurde für diesen Kalibrierungsschritt 15 Minuten gewählt.

Da die Rückstaulängen an den Knoten während des Feldtests nicht erhoben wurden, stehen für die Kalibrierung keine entsprechenden Daten zur Verfügung. Die in den Spitzenstunden auftretenden Staulängen aus der Simulation werden jedoch anhand der Daten aus den GPS-Fahrten aus Plausibilität geprüft.

Für den dritten Schritt der Kalibrierung werden somit ausschließlich die erhobenen Fahrzeiten als Vergleichsgröße verwendet. Als problematisch erweist sich dabei der Umstand, dass die realisierbaren Fahrzeiten im Feldtest zufallsbedingt schwanken, so dass die Messwerte trotz ähnlicher Verkehrsnachfrage an den verschiedenen Tagen insbesondere bei Betrachtung kleiner Zeitintervalle teilweise deutliche Unterschiede aufwiesen. Als Zeitintervall für diesen Kalibrierungsschritt wurde daher 60 Minuten gewählt.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl per ANPR erfasster Fahrzeiten auf den Abbiegerelationen (im Mittel weniger als 50 Messwerte pro Stunde, vgl. Tabelle 69) können nur die Fahrzeiten auf den vier Hauptrelationen (1-3; 2-4; 3-1; 4-2) sinnvoll verwendet werden. Bei diesen liegt der relative Fehler bei der Schätzung der mittleren Fahrzeit aus den ANPR-Daten in der Regel unterhalb von 3,5 % (Konfidenzniveau 95 %).

Als Stellgröße für die Kalibrierung der Fahrzeiten dienen die Wunschbeschleunigungs- und Wunschgeschwindigkeitsverteilungen der verschiedenen Fahrzeugklassen sowie die Parameter der Querverkehrsstörungen und Konfliktflächen.

Virtuelles Testfeld

Da das virtuelle Testfeld rein fiktiv ist, ist hier keine Kalibrierung möglich beziehungsweise nötig. Die Fahrverhaltensparameter wurden aus dem Testfeld Bremerhaven übernommen.

5.1.13.4 Kalibrierungsergebnisse

Bremerhaven

Für die Simulation des Testfelds Bremerhaven würde eine Kalibrierung für 15 Minutenintervalle vorgenommen.

Für die Querschnittsmessungen stehen Daten zwischen 0:00 und 24:00 zur Verfügung. Von den elf Querschnitten im Netz liefern neun Plausible Daten.

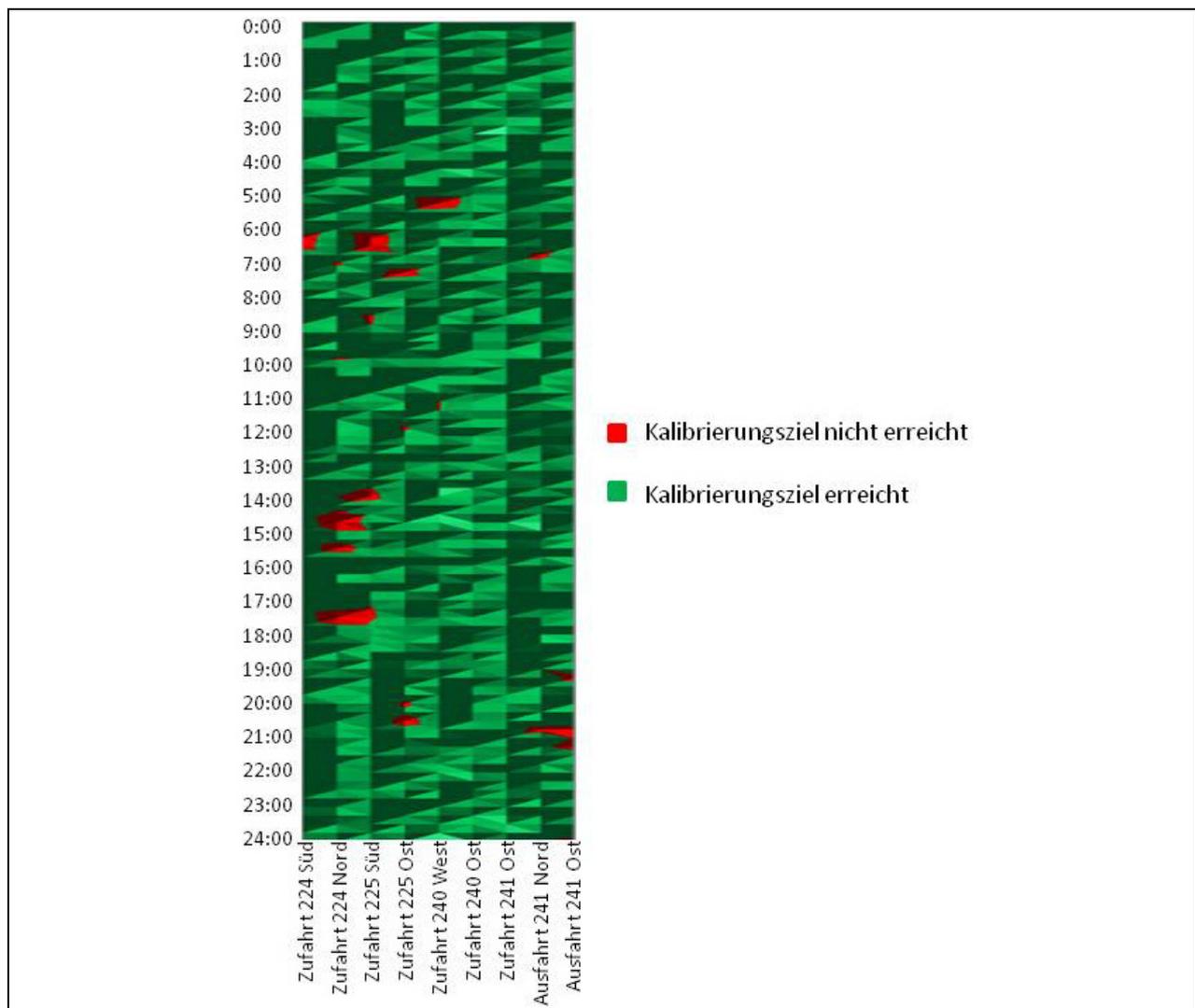


Abbildung 59: Kalibrierungsergebnisse für die Querschnittsmessungen.

Von den 864 Zeitintervallen erreichen 833 einen GEH Wert, der kleiner als 5 ist. Damit wird der GEH Wert von 5 in 3,59 Prozent der Fälle überschritten. Das Kalibrierungsziel ist somit erreicht. Im Schnitt wird ein GEH Wert von 1,825 erreicht.

Für die Fahrzeiten stehen für die Zeit von 6:00 bis 18:15 Daten aus den Messungen im Testfeld zur Verfügung. Für die Kalibrierung wurden nur die Routen 1-2, 2-1, 2-3 und 3-2 verwendet, da auf den Routen 1-3 und 3-1, für eine Bewertung, zu wenige Fahrzeuge vorhanden sind.

Von 192 Zeitintervallen ist die Abweichung der Fahrzeiten von denen in der Realität gemessenen in 172 Fällen kleiner als 15 Prozent. Damit tritt in 10,42 Prozent der Fälle eine Abweichung größer 15 Prozent auf. Das Kalibrierungsziel ist damit erreicht. Im Schnitt weichen die Fahrzeiten um 8,25 Prozent von den realen Messungen ab.

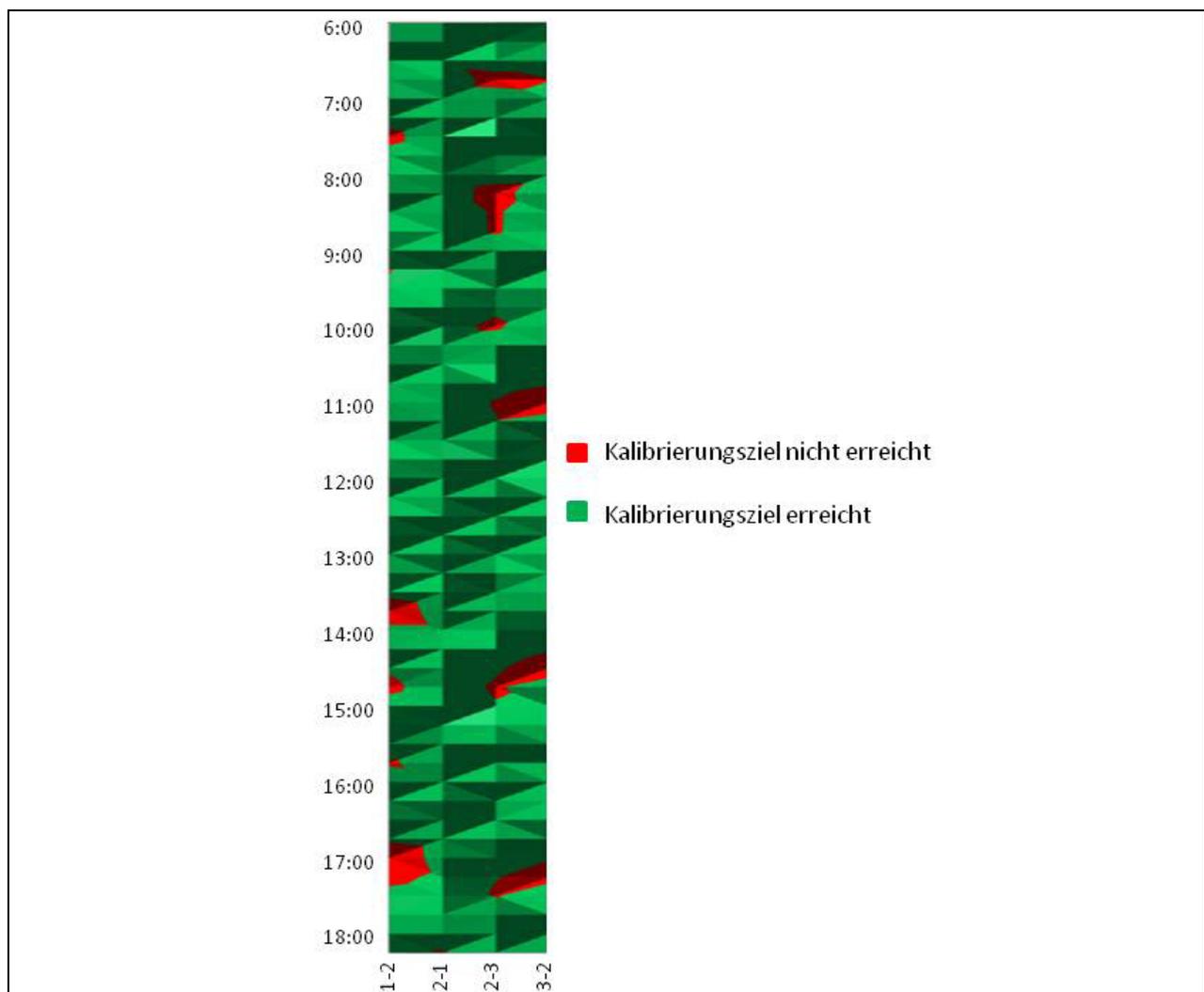


Abbildung 60: Kalibrierungsergebnisse für die Fahrzeiten.

Hamburg

Bei der Kalibrierung wurden jeweils die Mittelwerte aus 10 Simulationsläufen mit den korrespondierenden Daten aus der Erhebung verglichen.

Bei der Verkehrsnachfrage wurden dazu die plausibilitätsgeprüften Daten von 17 Messquerschnitten verwendet. Es wurde eine Kalibrierung für 15 Minutenintervalle und für den Zeitraum von 6:30 Uhr – 18:30 Uhr durchgeführt.

Alle 816 Werte (48 Zeitintervallen x 17 Messquerschnitte) erreichen dabei einen GEH Wert kleiner 5 und auch die Summe über alle Querschnitte erreicht in allen Zeitintervallen einen GEH Wert kleiner 4. Das Kalibrierungsziel ist somit klar erreicht. Der durchschnittliche GEH Wert beträgt 0,79.

Die Kalibrierung der Reisezeiten erwies sich dagegen als schwierig. Das gesetzte Ziel, in mindestens 85% der Fälle eine Abweichung von maximal 15% zwischen Mittelwert aus der Simulation und Messwert zu erzielen, wurde trotz intensiver und zeitaufwändiger Bemühungen nicht erreicht.

Ein möglicher Grund hierfür ist, dass die Simulationsergebnisse im Testfeld Hamburg bei Einsatz verkehrabhängiger Steuerungen (LRS bzw. BALANCE) zwischen den einzelnen Simulationsläufen stark streuen (vgl. z. B. Abbildung 134). Die im Testfeld realisierbaren Fahrzeiten hängen dabei im Wesentlichen vom Verkehrsablauf am Knoten Bramfelder Straße / Habichtstraße und hier insbesondere von der Anzahl der bedarfsweise zusätzlich geschalteten Linksabbiegerphasen (nur bei Rückstau auf dem Abbiegefahrstreifen, geringe Mengen an Linksabbiegern fließen im Phasenwechsel ab) ab. Sowohl die absolute Menge der Linksabbieger (aufgrund des stochastischen Routenwahlverhaltens) als auch deren zeitliche Verteilung der Ankünfte am Knoten variiert zwischen den Simulationsläufen, was zu Unterschieden in der Anzahl der geschalteten „Bedarfsphasen“ führt. Insbesondere in den Spitzenstunden, wenn der Auslastungsgrad an einzelnen Zufahrten größer 1 ist, führen bereits kleine Verschiebungen in der Freigabezeitverteilung zu großen Auswirkungen auf die Rückstaus und damit auf die Wartezeiten.

Als bestes Kalibrierungsergebnis wurden in 83,3% der Fälle Abweichungen von maximal 18% erreicht. Die mittlere Abweichung betrug dabei knapp 17%. Eine zusätzliche Validierung wurde aus Zeitgründen nicht durchgeführt.

5.1.13.5 Kenngrößen der Auswertung

Für die verkehrliche Bewertung werden in den Simulationsszenarien im Wesentlichen die Verlustzeiten und die Anzahl der Halte auf ausgewählten Relationen sowie im gesamten Netz betrachtet. In Bremerhaven und im virtuellen Testfeld werden die Halte und die daraus resultierenden Wartezeiten des Öffentlichen Personennahverkehrs dabei gesondert ausgewertet.

„In einer Verlustzeitmessung wird über alle betrachteten Fahrzeuge auf einem oder mehreren Streckenabschnitten der mittlere Zeitverlust gegenüber der idealen Fahrt (ohne andere Fahrzeuge, ohne Signalisierung) ermittelt.“ [PTV 2008]

Es wird also die Fahrzeit mit der für das jeweilige Fahrzeug ermittelten Wunschgeschwindigkeit mit der tatsächlichen Fahrzeit verglichen. Im Gegensatz zur Auswertungen der realen Messungen (vgl. Abschnitt 5.1.12.2) wird hier allerdings keine einheitliche Wunschgeschwindigkeit angenommen, sondern die dem Fahrzeug in der Simulation tatsächlich zugewiesene Wunschgeschwindigkeit. Daraus ergeben sich für die Auswertung leichte Unterschiede im Absolutwert zwischen Simulation und realen Messungen.

„Ein Halt ist dadurch definiert, dass ein Fahrzeug, was sich nicht im Stau befindet, die Eintrittsgeschwindigkeit der Staubedingung unterschreitet.“ [PTV 2008]

„Ein Fahrzeug erfüllt die Staubedingung, sobald es den Beginn-Wert unterschreitet und noch nicht wieder schneller fährt als der Wert, der bei Ende eingetragen ist.“ [PTV 2008]

Für die Staubedingungen wurden die Standardeinstellungen aus VISSIM übernommen. Danach wird zunächst ein Halt gezählt, sobald ein Fahrzeug eine Geschwindigkeit von 5 km/h unterschreitet. Ein weiterer Halt für dasselbe Fahrzeug kann erst gezählt werden, wenn es zuvor eine Geschwindigkeit von 10 km/h wieder überschritten hat.

„Für jedes ÖV-Fahrzeug wird jeder Halt, der nicht aufgrund eines Fahrgastwechsels oder wegen eines Stoppschildes stattfindet, mit Zeitdauer protokolliert.“ [PTV 2008]

Die eingesetzte VISSIM-Version ist mit Emissionskennfeldern verknüpft, die auf Messreihen der Universität Graz und des Volkswagen Konzerns beruhen. Emissionskennfelder beschreiben die Emissionen von Kraftfahrzeugen in Abhängigkeit von operativen Parametern wie der Drehzahl oder dem Luft-Kraftstoff-Verhältnis. In VISSIM werden die Pkw-Emissionen auf Grundlage der Geschwindigkeit und dem Produkt aus Beschleunigung und Geschwindigkeit und die Lkw-Emissionen auf Grundlage von Drehzahl und Leistung für eine definierte Flottenzusammensetzung modelliert [PTV 2005]. Ausgewertet werden schließlich die Emissionen und der Kraftstoffverbrauch in Kilogramm auf den Hauptrelationen und im gesamten Netz, differenziert nach Fahrzeugklassen und Kraftstoffkonzepten (siehe auch Kapitel 5.2).

5.2 Umweltkenngrößen

5.2.1 Grundlagen

5.2.1.1 Übersicht

Die Umweltwirkungen des Verkehrs sind in den vergangenen Jahren vor allem durch die EU-Gesetzgebung noch stärker in das Bewusstsein von Öffentlichkeit und Verkehrsplanung gerückt. Neben der Lärminderung steht dabei vor allem die Einhaltung von Belastungsgrenzwerten für verschiedene Luftschadstoffe im Vordergrund.

Die Quantifizierung der Wirkungen von verkehrlichen Maßnahmen im Allgemeinen und von Maßnahmen zur Koordinierung des Verkehrs im Besonderen gestaltet sich jedoch schwierig: So lassen sich mittels Immissionsmessungen die Einflüsse des Verkehrs nicht isoliert, sondern nur in Kombination mit einer Vielzahl weiterer Einflüsse, die zum Teil ebenfalls in Wechselwirkung miteinander stehen, erfassen (Abbildung 61). Beispielhaft seien hier die Wechselwirkungen zwischen der Temperatur und den Kaltstartemissionen des Verkehrs oder zwischen der Temperatur und der Luftfeuchte genannt. Zudem werden Eingangsdaten für immissionsbezogene Auswertungen meist mit einer zeitlichen Auflösung von Stunden- oder Tagesmittelwerten verwendet, so dass die hohe Varianz des Verkehrsablaufs nicht ausreichend berücksichtigt wird.

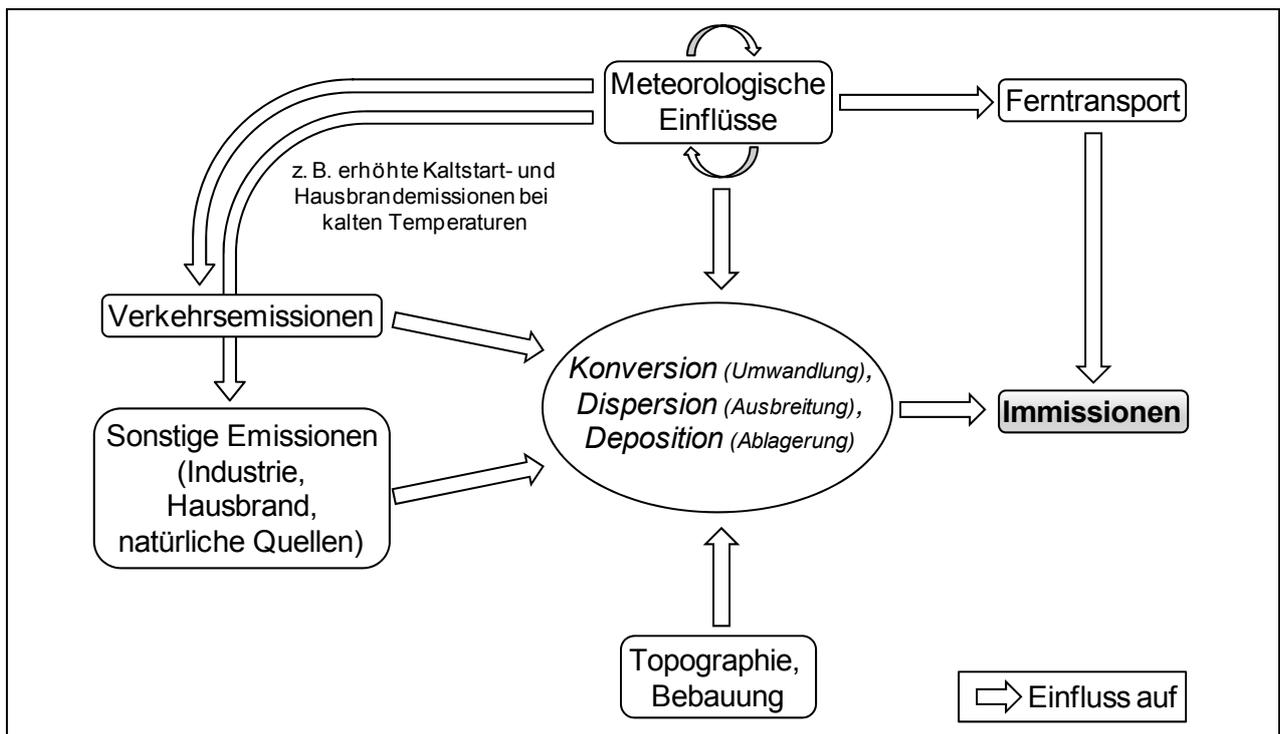


Abbildung 61: Vereinfachte Darstellung der Einflüsse auf die Immissionsbelastung mit Luftschadstoffen.

Alternativ zur physikalischen Messung können die Wirkungen verkehrlicher Maßnahmen mittels Modellen quantifiziert werden. Neben günstigeren Betriebskosten und der hohen Transparenz ihrer Ergebnisse bieten Modelle den wesentlichen Vorteil, dass nicht nur punktuelle, sondern auch flächendeckende Aussagen bezogen auf ein ganzes Straßennetz möglich sind. Allerdings weisen die heutigen Modelle aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge, aber auch aufgrund ungenauer sowie zeitlich und/oder räumlich stark aggregierter Eingangsgrößen Abweichungen zu physikalisch gemessenen Werten in einer Größenordnung von 20 % bis 40 % auf. Für Maßnahmen zur Verbesserung des Verkehrsablaufs kann hingegen von einem

Reduktionspotenzial von etwa 10 %¹ ausgegangen werden - eine Bewertung dieser Maßnahmen mit gängigen Ansätzen und Eingangsgrößen erscheint daher nicht ausreichend.

Eine Recherche der Maßnahmendatenbank MARLIS [bast 2006] bestätigt diese grundsätzlichen Schwierigkeiten der Wirkungsermittlung: Unter den dort erfassten ca. 1.400 Maßnahmen wurden etwa 120 Maßnahmen zum Stichwort „Verflüssigung des Verkehrs“ erfasst. Hiervon wurden weniger als 20 überhaupt quantitativ bewertet, und lediglich an drei Standorten wurde die Bewertung anhand physikalischer Messungen vor Ort vorgenommen.

Im Rahmen von AMONES sollen daher die Umweltkenngroßen und die Einflüsse hierauf möglichst detailliert (zeitlich hochaufgelöst) und möglichst genau erfasst werden, um Rückschlüsse auf die Wirkungsbeziehungen zu verkehrlichen Parametern ziehen zu können. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf Beiträge zur Berücksichtigung der Partikelkonzentration und der Stickstoffoxidkonzentration. Am Rande werden auch Kenngroßen zum Kohlendioxidausstoß und Kraftstoffverbrauch mit behandelt. Aufgrund der z. T. umfangreichen Inhalte der folgenden Unterkapitel werden diese nachfolgend zur besseren Übersicht tabellarisch dargestellt.

Unterkapitel	Behandelte Inhalte
5.2.1 Grundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Chemisch/physikalische, gesundheitliche und rechtliche Grundlagen • Verursacheranteil des Verkehrs • Verkehrliche und meteorologische Einflüsse auf die Emissionen und die Immissionen
5.2.2 Verfahren zur Messung immissionsbezogener Kenngroßen	<ul style="list-style-type: none"> • Gängige Verfahren zur Messung der Partikel- und Stickstoffoxidkonzentration • Durch die Messverfahren erfasste Kenngroßen. • Aussagekraft der Messergebnisse für die zu untersuchende Fragestellung.
5.2.3 Verfahren zur Modellierung immissionsbezogener Kenngroßen	<ul style="list-style-type: none"> • Gängige Verfahren zur Modellierung immissionsbezogener Kenngroßen. • Hinweise zur Aussagekraft der Modellierungsergebnisse.
5.2.4 Verfahren zur Beurteilung der Qualität	<ul style="list-style-type: none"> • Gänge Ansätze zur Beurteilung der Luftqualität.
5.2.5 Allgemeine Empfehlungen zur Erfassung von Umweltkenngroßen	<ul style="list-style-type: none"> • Hinweise zu umweltbezogenen Zielkonzepten der Aufgabenträger • Hinweise zu unterschiedlichen Erfassungskonzepten in Abhängigkeit des Zielkonzeptes. • Hinweise zur erforderlichen Ausstattung und zum Umfang der Erfassung im Rahmen eines Qualitätsmanagements.
5.2.6 Methodische Vorgehensweise bei der Analyse der umweltbezogenen Kenngroßen in den AMONES-Testfeldern Bremerhaven und Hamburg	<ul style="list-style-type: none"> • Detaillierte Darstellung des methodischen Ansatzes zur Bewertung der umweltbezogenen Wirkungen der Netzsteuerung.

Tabelle 28: Übersicht der Inhalte der Unterkapitel von 5.2 Umweltkenngroßen.

¹ Beispielsweise zeigen umfassende Untersuchungen von Hirschmann, Fellendorf [2009] zur Reduzierung von Emissionen mittels einer verbesserten Koordinierung von Lichtsignalanlagen ein Reduktionspotenzial von 14 % für motorbedingte PM₁₀ und 11% für NO_x Emissionen.

5.2.1.2 Eigenschaften der untersuchten Schadstoffe

Partikel

Partikel sind in der Atmosphäre als Bestandteile von Aerosolen zu finden. Die Partikel in den Aerosolen unterscheiden sich in Form, Größe und in ihren Bestandteilen. Partikel können als primäre (direkt emittierte) und sekundäre (aus Vorläufergasen gebildete) Partikel in die Atmosphäre gelangen. Die Partikel können anthropogenen oder natürlichen Ursprungs sein.

Eingeatmete Partikel können in Abhängigkeit der Eindringtiefe und der Verweildauer im Atemtrakt schädliche Wirkungen auf die menschliche Gesundheit haben. Während grobe Partikel in den oberen Atemwegen zurückgehalten werden, können kleine Partikel über das Alveolargewebe der Lunge in den Blutkreislauf eintreten. Schwermetalle oder krebserzeugende Stoffe, die kleinen Partikeln anhaften, können entsprechend tief in die Atemwege eindringen [Umweltbundesamt 2009b]. Die negativen gesundheitlichen Wirkungen stehen in einem Zusammenhang mit der Partikelkonzentration, jedoch ohne einen Schwellenwert unterhalb dem keine schädlichen Wirkungen zu erwarten sind (Schwartz [2009] und Daniels et al. [2000] zitiert in Vester [2006]). Folglich ist eine Erhöhung der Partikelbelastung unabhängig vom Ausgangsniveau als schädlich anzusehen.

Die gesundheitlichen Wirkungen sowie die Koagulations-, Depositions- und Sedimentationsprozesse von Partikeln hängen maßgeblich von ihrem aerodynamischen Durchmesser² ab [BAFU 2006]. Eine Klassifizierung nach dieser Größe bietet sich demnach an. Folgende Größenkategorien werden üblicherweise verwendet:

- *TSP* (Totally suspended particulate matter): Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 57 µm.
- *PM₁₀* (Particulate matter): Partikel, die einen größenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm eine Abscheideeffizienz von 50 % erreicht.
- *PM_{2,5}* („feine Partikel“): Partikel, die einen größenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 2,5 µm einen Abscheidegrad von 50 % erreicht.
- *PM_{10-2,5}* („grobe Partikel“): Differenz zwischen *PM₁₀* und *PM_{2,5}*.
- *PM_{0,1}* oder *UFP* („Ultrafeine Partikel“): Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser unter 0,1 µm.

Abbildung 62 zeigt den Anteil der verschiedenen Größenfraktionen an der derzeit rechtlich vorgeschriebene Messgröße *Massenkonzentration*. Demnach haben die Fraktionen der mittleren und groben Partikel den größten Anteil an der Partikelmasse. Für straßennahe

² Der aerodynamische Durchmesser entspricht dem Durchmesser, den ein kugelförmiges Teilchen der Dichte 1 g/m³ haben müsste, um in der Luft die gleiche Sinkgeschwindigkeit aufzuweisen wie das betrachtete Teilchen [Bafu 2006].

Messungen liegt der Massenanteil der PM_{2,5}-Fraktion an der PM₁₀-Fraktion bei 55 % bis 65 % [BAFU 2006].

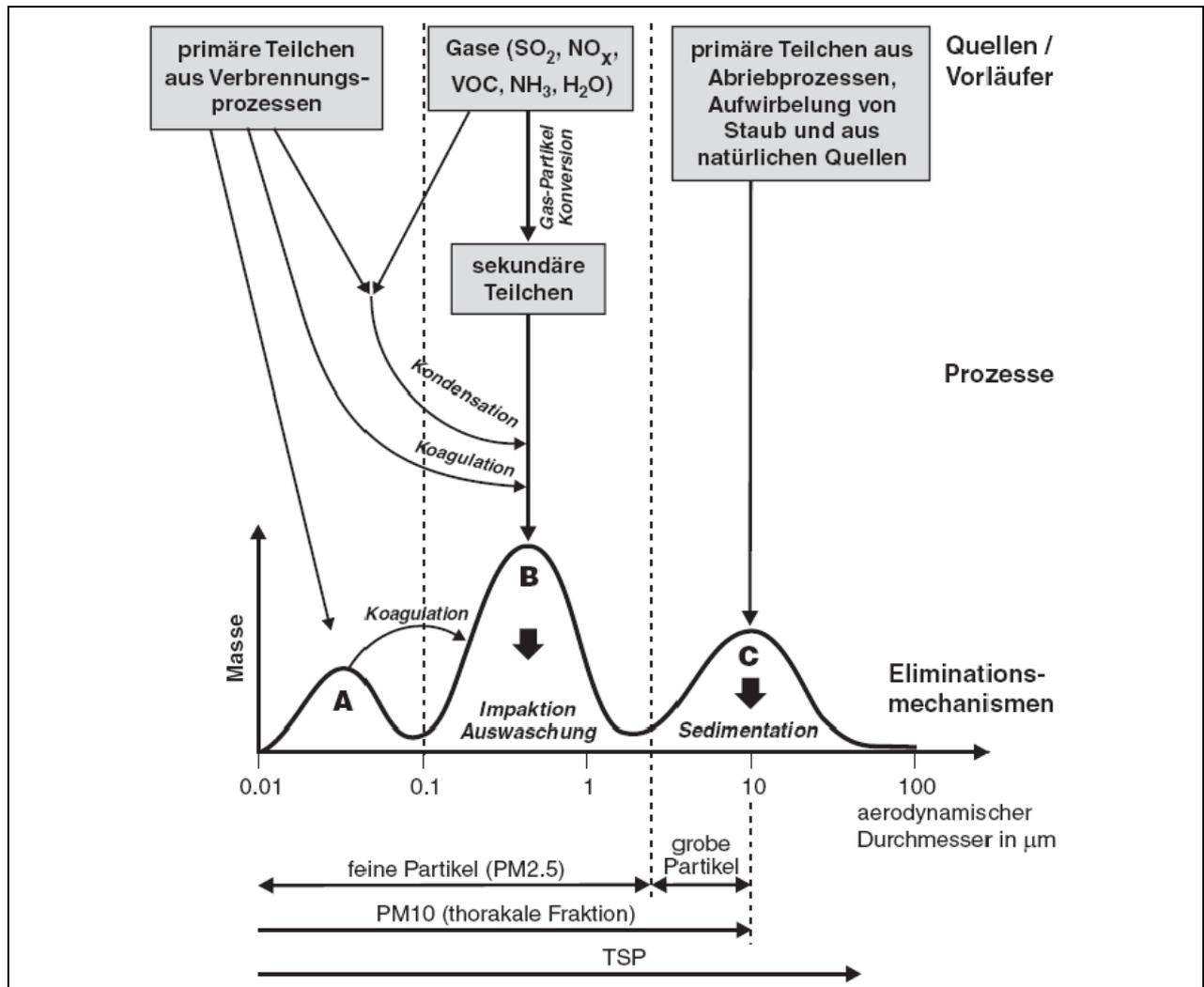


Abbildung 62: Vereinfachte schematische Darstellung der Größenverteilung des atmosphärischen Aerosols in Quellennähe und der Anteile der Größenfraktionen an der Partikelmasse. A: ultrafeine Partikel, B: Akkumulationsmodus, C: grobe Partikel [Bafu 2006].

Für die Messgröße *Anzahlkonzentration* ergibt sich eine deutlich abweichende Größenverteilung: So ist hier die Fraktion kleiner 0,1 µm klar dominierend, während die größeren Partikel, die das Volumen und damit auch die Masse einer Probe bestimmen, nur in einer sehr geringen Anzahl auftreten. Eine Studie mit Messungen an einem belasteten Stadtstandort in Erfurt ergab die Resultate in Tabelle 29 [Tuch et al. 1997].

Im urbanen Aerosol haben die primären Teilchen aus unvollständigen Verbrennungsprozessen einen großen Anteil an den *feinen und ultrafeinen Partikeln* mit einem Durchmesser von zumeist unter 0,3 µm. *Partikel im mittleren Größenbereich* sind überwiegend sekundären Ursprungs und bilden sich aus verschiedenen Vorläufergasen, unter anderem aus Stickstoffoxid und Schwefeldioxid. Den *groben Partikeln* können zumeist Teilchen aus Aufwirbelung und

Abrieb zugeordnet werden. Anthropogene Quellen für die groben Partikel sind beispielsweise Reifen-, Brems- oder Fahrbahnabrieb.

Größenklasse	Anteil an Partikelzahl	Anteil an Partikelmasse
0,01 bis 0,1 µm	72 %	1 %
0,1 bis 0,5 µm	27 %	83 %
>0,5 µm	0,3 %	16 %

Tabelle 29: Anteile bestimmter Größenfraktionen an der Partikelanzahl und der Partikelmasse (Daten entnommen aus Tuch et al. [1997]).

Hierzu ist festzuhalten, dass einige der Vorläufergase der genannten Salze, zum Beispiel Schwefeldioxid, bereits als gesundheitsschädigende Stoffe von der EU-Luftqualitätsrichtlinie erfasst sind, die hierfür erfassten spezifischen Grenzwerte jedoch keinen unmittelbaren Handlungsbedarf aufzeigen ([Umweltbundesamt 2009a], [Umweltbundesamt 2010]).

Für die hier untersuchten kurzfristigen lokalen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ist zudem die Zeitspanne *von der Emission bis zur Messung* als Partikel im Straßenraum relevant. Als ein Indiz für die Erkennbarkeit kurzfristiger Zusammenhänge wird die Verweildauer von Partikeln in der Atmosphäre angesehen. Eine lange Verweildauer deutet auf lange Transportwege der Partikel und damit eher regionale Zusammenhänge hin. Die Verweildauer von Partikeln hängt nach Vester [2006] ebenfalls von ihrer Größe ab: Für Partikel im mittleren Größenbereich (feine Partikel) werden lange Verweildauern festgestellt. Kurze Verweildauern können hingegen für ultrafeine und für grobe Partikel festgestellt werden. Die ultrafeinen Partikel koagulieren schnell und werden zu größeren Partikeln. Diese Teilchen haben allerdings nur einen geringen Anteil an der Massenkonzentration. Die groben Partikel setzen sich gravitationsbedingt schnell ab. Diese Partikelfraktion dominiert zwar die Partikelmasse und kann zu wesentlichen Teilen dem Abrieb und der Aufwirbelung des Straßenverkehrs zugeordnet werden, zeigt allerdings abweichende Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge im Vergleich zu den anderen Partikelfraktionen. *Es wird davon ausgegangen, dass dieser Sachverhalt ein wesentliches Hemmnis bei der Quantifizierung der Wirkungen verkehrlicher Maßnahmen darstellt.*

Abbildung 63 zeigt die Verursacheranteile an der PM₁₀-Belastung und ihre zeitliche Entwicklung in Deutschland. Der Anteil des Verkehrs liegt hier bei 20 %. Nach Untersuchungen von Diegmann et al. [2007] ist hiervon jedoch nur etwa die Hälfte den motorbedingten Emissionen zuzuordnen. Die andere Hälfte sind nicht-motorbedingte Emissionen aus Aufwirbelungs- und Abriebsprozessen.

Für die untersuchte Fragestellung kann festgehalten werden: Für eine Ursache-Wirkungs-Analyse zwischen Partikelmissionen und Verkehrskenngrößen mit dem Fokus auf kurzfristige Effekte sind primär die groben und die ultrafeinen Partikel relevant. Eine Analyse der Massenkonzentration der groben Partikel ist eher aus Sicht der gesetzlich festgelegten Grenzwerte sinnvoll; aus gesundheitlicher Sicht ist dagegen die Untersuchung der Anzahlkonzentration der ultrafeinen Partikel wichtiger. Aufgrund des relativ geringen Anteils der primären motorbedingten Partikelemissionen an den Gesamtemissionen ist es fraglich, ob

Wirkungen aus Änderungen des Verkehrsablaufs für die Messgrößen PM₁₀- und PM_{2,5}-Massenkonzentration oberhalb der Messschwelle der verfügbaren Messtechnik liegen.

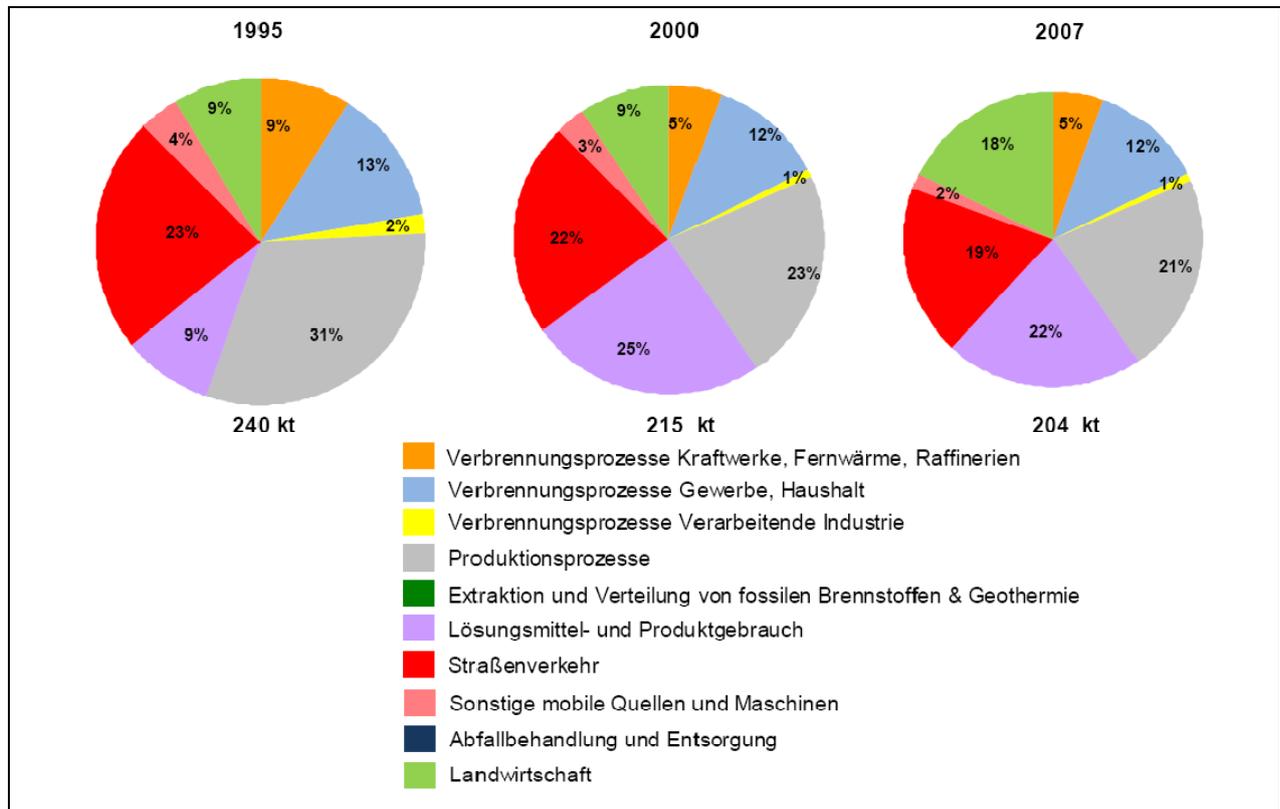
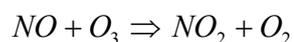
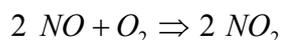


Abbildung 63: PM10-Emissionsanteile nach Quellsektoren und ihre zeitliche Entwicklung in Deutschland [Umweltbundesamt 2009b].

Stickstoffoxide

Stickoxide oder Stickstoffoxide oder NO_x sind Sammelbezeichnungen für die gasförmigen Oxide des Stickstoffs. Stickoxide entstehen unter anderem bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Stickstoffdioxid (NO₂) wird nur in geringen Mengen direkt freigesetzt. In den meisten Fällen wird beim Verbrennungsvorgang zunächst Stickstoffmonoxid (NO) emittiert, welches in der Atmosphäre schnell mit Luftsauerstoff zu Stickstoffdioxid reagiert. Je nach vorhandener Ozonkonzentration erfolgt ebenfalls eine Stickstoffdioxidbildung. Unter Sonneneinstrahlung kann sich zudem Stickstoffdioxid aus Stickstoffmonoxid und reaktiven gasförmigen Peroxidradikalen (aus Abbauprozessen flüchtiger organischer Kohlenwasserstoffverbindungen) bilden. Unter Sonneneinstrahlung und Sauerstoff erfolgt wiederum eine wichtige Abbaureaktion von Stickstoffdioxid zu Stickstoffmonoxid und Ozon [Witten, Stec-Lazaj 2007]. Die wichtigsten Bildungsreaktionen und die beschriebene Abbaureaktion sind nachstehend vereinfacht dargestellt.



Stickstoffdioxid hat negative Wirkungen auf die menschliche Gesundheit und auf das Ökosystem. Beim Menschen bewirken hohe Stickstoffdioxidkonzentrationen eine Reizung der Augen und der Atemwege. Stickstoffdioxid kann tief in die Atemwege und über die Alveolen in den Blutkreislauf eindringen. Schädliche Wirkungen von Stickstoffdioxid können bereits bei kurzfristiger Exposition und bei Konzentrationen von 10 bis 100 µg/m³ auftreten. In Böden und Gewässern führt Stickstoffdioxid zu Versauerungen und Eutrophierungen, in der Atmosphäre trägt es zur Bildung von Feinstaub und Ozon bei [Witten, Stec-Lazaj 2007].

Wegen der hohen Reaktivität zwischen NO und NO₂ wird bei verkehrsbezogenen Untersuchungen häufig NO_x als Summe aus NO und NO₂ betrachtet und als NO₂ ausgewiesen. Die am Verkehrs-HotSpot gemessenen NO_x-Konzentrationen weisen in der Regel einen hohen Anteil an NO auf, weil die Transportzeit zum verkehrsnahen Messort meist kürzer ist als die Reaktionszeit von NO zu NO₂ [Umweltbundesamt 2009b]. Abbildung 64 stellt die Verursacheranteile an der NO_x-Belastung in Deutschland dar.

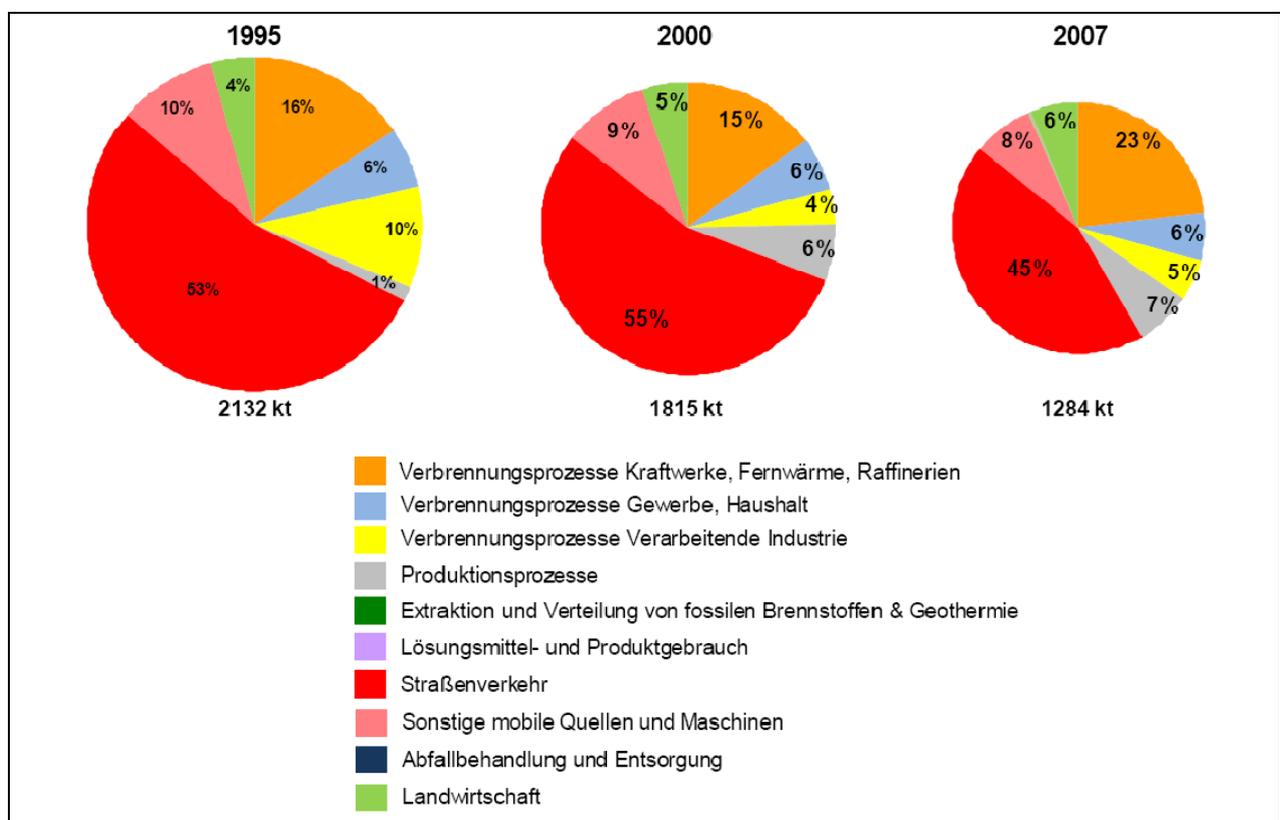


Abbildung 64: NO_x-Emissionsanteile nach Quellsektoren und ihre zeitliche Entwicklung in Deutschland [Umweltbundesamt 2009b].

Für die untersuchte Fragestellung kann festgehalten werden:

Die Abhängigkeit der NO₂-Konversion von dem Vorhandensein weiterer Reagenzien und auch der Zeit, lassen für zeitlich hochaufgelöste Betrachtungen eine Untersuchung von NO_x als Summe aus NO und NO₂ sinnvoll erscheinen. Aufgrund des hohen Verursacheranteils des Straßenverkehrs ist davon auszugehen, dass Schwankungen der Verkehrsnachfrage und des Verkehrsablaufs physikalisch messbare Wirkungen in der NO_x-Konzentration aufweisen.

5.2.1.3 Rechtliche Aspekte

Luftschadstoffgrenzwerte

Die EG-Tochtrichtlinie 1999/30/EG zur Rahmenrichtlinie Luftqualität wurde über das siebte Gesetz zur Änderung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) im September 2002 in nationales Recht umgesetzt. Dies führte zur Novellierung der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) und der Neufassung der 22. Bundesimmissionsschutzverordnung (22. BImSchV). Zum 21.5.2008 wurde eine Überarbeitung der oben genannten EU-Luftqualitätsrichtlinie 1999/30/EG als neue Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG verabschiedet, deren Änderungen im Laufe des Jahres 2010 als 39. Bundesimmissionsschutzverordnung (39. BImSchV) in nationales Recht umgesetzt werden. Die wesentlichen Änderungen der neuen Richtlinie betreffen die folgenden Punkte:

- Zusammenführung der ursprünglichen Rahmenrichtlinie sowie ihrer ersten drei Tochtrichtlinien zu einer einzigen Richtlinie,
- Einführung von Regelungen zu PM_{2,5},
- Ausnahmen zur Anwendung bestehender PM₁₀- und NO₂-Grenzwerte und
- Aufhebung der in 1999/30/EG für 2010 vorgesehenen zweiten Stufe für PM₁₀-Grenzwerte.

Tabelle 30 zeigt die nach 39. BImSchV bundesweit gültigen Grenzwerte für Stickstoffoxide und Partikel zur Vermeidung schädlicher Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die als Kenngrößen zur Beurteilung der Luftqualität herangezogen werden können.

Kenngröße	Grenzwerte und Zielwerte nach 39. BImSchV	
PM ₁₀	Seit 2005 Jahresmittelgrenzwert:	40 µg/m ³
	Seit 2005 Tagesmittelgrenzwert:	50 µg/m ³ bei 35 erlaubten Überschreitungen pro Jahr
PM _{2,5}	Seit 2010 Jahresmittelzielwert:	25 µg/m ³
	Ab 2015 Jahresmittelgrenzwert:	25 µg/m ³
	Ab 2015 3-Jahresmittelgrenzwert:	20 µg/m ³ (Expositionskonzentration)
	Ab 2020 Reduktionsziel Jahresmittel in Abhängigkeit der Ausgangskonzentration:	
	< 8,5 µg/m ³ :	– 0 %
	8,5 - < 13 µg/m ³ :	– 10 %
	13 - < 18 µg/m ³ :	– 15 %
18 - < 22 µg/m ³ :	– 20 %	
> 22 µg/m ³ :	Alle angemessenen Maßnahmen, um den Zielwert 18 µg/m ³ zu erreichen.	
	Ab 2020 Jahresmittelgrenzwert:	20 µg/m ³
Stickstoffdioxid	Seit 2010 Jahresmittelgrenzwert:	40 µg/m ³
	Seit 2010 Stundenmittelgrenzwert:	200 µg/m ³ bei 18 erlaubten Überschreitungen pro Jahr
	Seit 2001 Alarmschwelle:	400 µg/m ³ in 3 aufeinanderfolgenden Stunden

Tabelle 30: Grenzwerte und Zielwerte für die Belastung mit Partikeln und Stickoxiden nach 39. BImSchV.

Einzuhaltende Randbedingungen zur Überwachung der Luftqualität

Die Mitgliedstaaten müssen die Luftqualität in ihren Ballungsräumen und Gebieten überwachen. Ein Ballungsraum ist definiert als ein städtisches Gebiet mit einer Bevölkerung von mindestens 250.000 Einwohnern oder einem Gebiet mit einer Bevölkerungsdichte von mindestens 1.000 Einwohnern pro km² auf einer Fläche von mindestens 100 km². Ein Gebiet ist ein Teil der Fläche eines Mitgliedsstaats, das dieser für die Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität abgegrenzt hat.

Sofern die Luftschadstoffbelastung *unter einer festgelegten unteren Beurteilungsschwelle* liegt, kann die Luftqualität mittels Modellrechnungen oder objektiven Schätzungen beurteilt werden. Sofern die Belastung *zwischen der festgelegten oberen und unteren Beurteilungsschwelle* liegt, kann die Luftqualität mittels einer Kombination von Messungen und Modellrechnungen und/oder orientierenden Messungen beurteilt werden. Bei einer Belastung *oberhalb der festgelegten oberen Beurteilungsschwelle* ist die Durchführung von stationären Messungen erforderlich. Zusätzlich sind Hintergrundmessungen durchzuführen, um Informationen über Gesamtmassenkonzentration und die Konzentration von Staubinhaltsstoffen von Partikeln im Jahresdurchschnitt zu erhalten. Die Einstufung eines Gebietes ist spätestens alle fünf Jahre zu überprüfen.

Anforderungen an Messungen und Modellrechnungen

Tabelle 31 zeigt die in der 39. BImSchV definierten Anforderungen an die *Genauigkeit bei der Messung und Modellierung* der Luftqualität.

Schadstoff	zulässige Unsicherheit bei Messungen		zulässige Unsicherheit bei Modellrechnungen		
	orientierend	kontinuierlich	Jahresmittelwerte	Tagesmittelwerte	Stundenmittelwerte
PM ₁₀ und PM _{2,5}	50 %	25 %	50 %	-	-
NO ₂	25 %	15 %	30 %	50 %	50 %

Tabelle 31: Datenqualitätsziele für die Beurteilung der Luftqualität nach 39. BImSchV.

Sowohl für NO₂ als auch für PM₁₀ müssen mindestens 90 % der Daten des Beurteilungszeitraumes erfasst werden. Stichprobenartige Messungen können durchgeführt werden, sofern die Abweichung der Messung im Vergleich zu den Daten einer kontinuierlichen Messung mit einer 95 %igen Sicherheit unter 10 % liegt.

Sofern Messungen durchzuführen sind, sollen die *Probenahmestellen* so gelegt werden, dass Daten von den Bereichen gewonnen werden, in denen die höchsten Konzentrationen auftreten, denen die Bevölkerung über einen längeren Zeitraum ausgesetzt ist. Die Probenahmestellen an Straßen sollten für einen Straßenabschnitt von mindestens 100 m Länge repräsentativ sein. Die Probenahme sollte mindestens 25 m von großen Kreuzungen und höchstens 10 m vom Fahrbahnrand entfernt sein. Der lokale Standort einer Probenahmestelle sollte einige Meter von Gebäuden und anderen Hindernissen entfernt und in einer Höhe zwischen 1,5 m und 4 m

angeordnet sein. Die Anzahl der Probenahmestellen in Ballungsräumen ist abhängig von der Bevölkerung des Ballungsraums und den Beurteilungsschwellen des Schadstoffs.

Für die untersuchte Fragestellung kann festgehalten werden:

Die Anforderungen an die Genauigkeit von Immissionsmessungen und -modellierungen sind für eine präzise Bewertung von Minderungsmaßnahmen mit einem erwarteten Wirkungspotenzial in einer Größenordnung von 10 % zunächst nicht ausreichend. Sofern die absoluten oder relativen Abweichungen von Messungen und Modellen zu den tatsächlichen Immissionskonzentrationen konstant sind, sollte eine Bewertung dennoch möglich sein.

5.2.1.4 Einflussgrößen auf die Emissions- und Immissionsbelastung

Eine nachvollziehbare Interpretation der Messdaten, die im Rahmen der AMONES-Feldmessungen erhoben werden, ist nur bei Kenntnis der verschiedenen Einflussgrößen und der Größenordnung ihres Einflusses auf die Immissionswerte möglich. Die nachfolgenden Ausführungen stellen daher die wesentlichen Einflüsse auf die verkehrliche Zusatzbelastung des Emittenten „Straße“ dar.

Bebauung

In Straßenschluchten mit hoher und beidseitig geschlossener Randbebauung treten wegen geringer Durchlüftung häufig höhere Luftschadstoffimmissionen auf (siehe Abbildung 65). Die Stärke des Einflusses einer Straßenschlucht hängt wiederum erheblich von

- der Anströmrichtung des Windes,
- von lokalen Durchlüftungsmöglichkeiten („Porosität“),
- vom Verhältnis zwischen Schluchthöhe und Schluchtbreite ab.

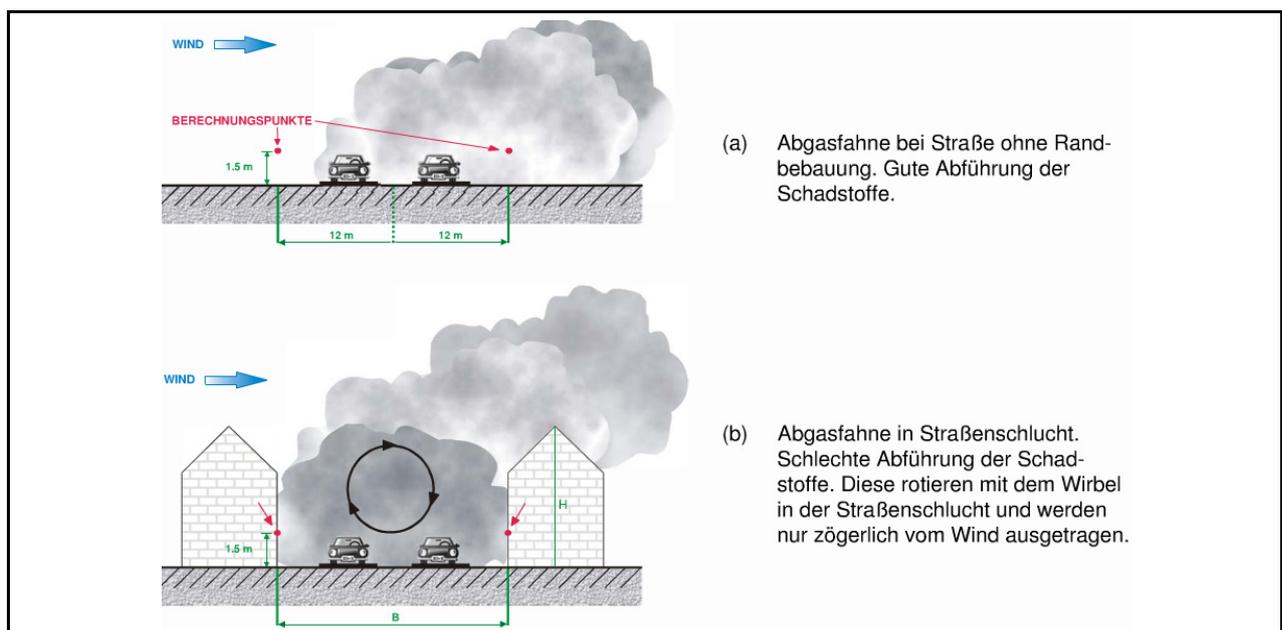


Abbildung 65: Einfluss der Bebauung auf die Schadstoffbelastung [Düring 2006].

Detaillierte Untersuchungen zu den aufgeführten Zusammenhängen zwischen Immissionsbelastung und der Bebauung in Kombination mit den genannten Parametern wurden von Schatzmann et al. [1999] und Flassak et al. [1996] durchgeführt.

Straßenlängsneigung

Die Straßenlängsneigung hat Einfluss auf die PM_{x-} und NO_x -Emissionen. Abbildung 66 zeigt die motorbedingten Emissionen in Abhängigkeit der Längsneigung, die nach dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA, INFRAS [2010]) ermittelt wurde. Eine größere Steigung bewirkt demnach einen überproportional hohen Anstieg der Emissionen.

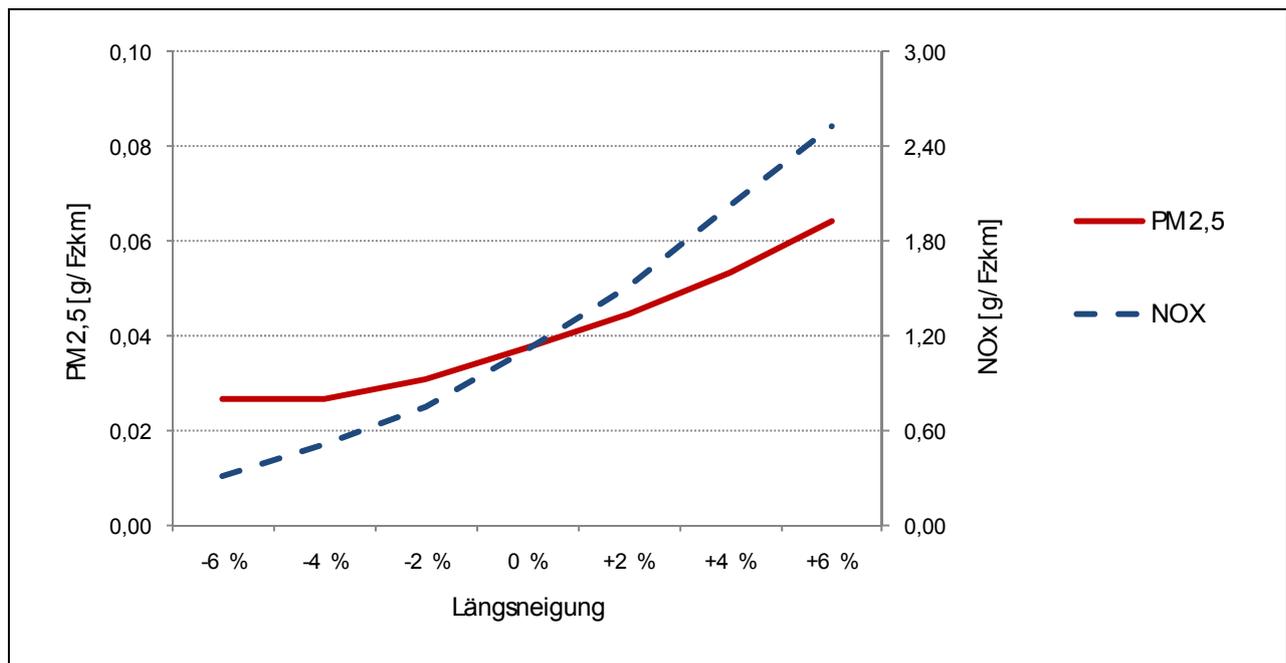


Abbildung 66: $PM_{2,5}$ und NO_x -Emissionen in Abhängigkeit der Längsneigung bei einem Schwerverkehrsanteil von 10 % (nach HBEFA, INFRAS [2010], Flottenzusammensetzung Basisentwicklung 1994-2020, Bezugsjahr 2005, Verkehrssituation IO LSA2).

Zustand und Material der Fahrbahnoberfläche

Der *Zustand der Fahrbahnoberfläche* beeinflusst vor allem die nicht motorbedingten Partikelemissionen durch Straßenabrieb und durch aufgewirbeltes Material.

Für einen schlechten Fahrbahnzustand³ in der Lützner Straße, Dresden, wurden um den Faktor 1,4 höhere $PM_{10-2,5}$ -Emissionen im Vergleich zu einem guten Straßenzustand festgestellt. Für

³ Zur Bewertung des Zustands der Fahrbahnoberfläche hinsichtlich seines Potenzials für erhöhte Partikelemissionen haben Düring et al. [2004] ein Verfahren entwickelt: Die Zuweisung einer Straßenzustandsklasse im Sinne der Emissionsmodellierung richtet sich dabei nach dem Schadenswert TWRIO der Fahrbahn und der angrenzenden Flächen, die nach dem Merkblatt für Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) [FGSV 2006] bestimmt werden, und dem Fahrbahnmaterial.

die Berliner Straße in Nauen wurden für einen schlechten Fahrbahnzustand 3,6-mal höhere $PM_{10-2,5}$ -Emissionen im Vergleich zu einem guten Straßenzustand festgestellt. Für die Bergstraße in Erfurt mit einem geringfügig besseren Schadenswert als in Dresden und Nauen liegt der ermittelte Faktor bei 0 bis 1,4 [bast 2008]. Die Autoren der Untersuchungen empfehlen wegen der hohen Bandbreite der festgestellten Wirkungen weitere Untersuchungen hinsichtlich Kenngößen wie Fahrzeuggeschwindigkeit, Längsneigung etc., die ebenso wie der Fahrbahnzustand die nicht-motorbedingten Partikelemissionen beeinflussen.

Das *Fahrbahnmaterial* wird, wie oben geschildert, zur Bewertung des Fahrbahnzustands (im Sinne der Abriebsfestigkeit) herangezogen und hat damit einen Einfluss auf die nicht-motorbedingten Partikelemissionen. Unabhängig vom Fahrbahnzustand zeigt das Fahrbahnmaterial weitere Einflüsse: So kann offener Asphalt durch seine Drainagewirkung eine vorhandene Staubbelastung bei Niederschlagsereignissen durch Entwässerung austragen. Im trockenen Zustand kann die vorhandene Staubbelastung durch den höheren Porenanteil stärker gebunden werden als bei Splitt-Mastix-Asphalt [Baum et al. 2009].

Daneben kann das Fahrbahnmaterial auch einen Einfluss auf die NO_x -Immissionen haben: Nach Angaben verschiedener Hersteller kann die NO_x -Immissionskonzentration mittels einer speziellen Oberflächenbeschichtung reduziert werden. Hierbei werden die NO_x -Moleküle an der Straßenoberfläche angelagert, unter Sonneneinwirkung zu Nitrat (NO_3) oxidiert und schließlich vom Regen ausgewaschen [Heidelberg, Cement 2008], [Burgeth et al. 2008]. Untersuchungen zur Bewertung der Wirksamkeit der Oberflächenbeschichtung sind dem Verfasser nicht bekannt.

Fahrzeugart, Kraftstoffkonzept und Schadstoffklasse

Die Fahrzeugart, das Kraftstoffkonzept und die Schadstoffklasse haben erheblichen Einfluss auf die PM_x - und NO_x -Emissionen.

Abbildung 67 zeigt die durchschnittlichen *motorbedingten Partikelemissionen* für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge (LNF), Lkw und Busse, differenziert nach Schadstoffklasse und Kraftstoffkonzept auf Grundlage von HBEFA, INFRAS [2010] für eine typische innerörtliche Verkehrssituation mit geringem Störungsgrad.

Deutlich erkennbar sind darin folgende Sachverhalte:

- Die motorbedingten Partikelemissionen von Benzinfahrzeugen⁴ sind in ihrer Größenordnung vernachlässigbar.
- Im Vergleich zu Diesel-Pkw der Schadstoffklassen Euro 2 und Euro 3 emittieren Fahrzeuge der Schadstoffklassen Euro 4 und Euro 5 nur einen Bruchteil der Partikel.

⁴ Auch Ottomotoren stoßen Partikel aus. Die Emissionen liegen jedoch um eine bis drei Größenordnungen niedriger als bei Dieselmotoren. Zudem haben die Partikel aus Dieselmotoren eine höhere gesundheitliche Relevanz aufgrund der erhöhten Anzahl kanzerogener Rußpartikel [Rabl 2003].

- Die Partikelemissionen der schweren Fahrzeugklassen sind für alle Schadstoffklassen um den Faktor 2 bis 4 höher als die Partikelemissionen der leichten Fahrzeugklassen.

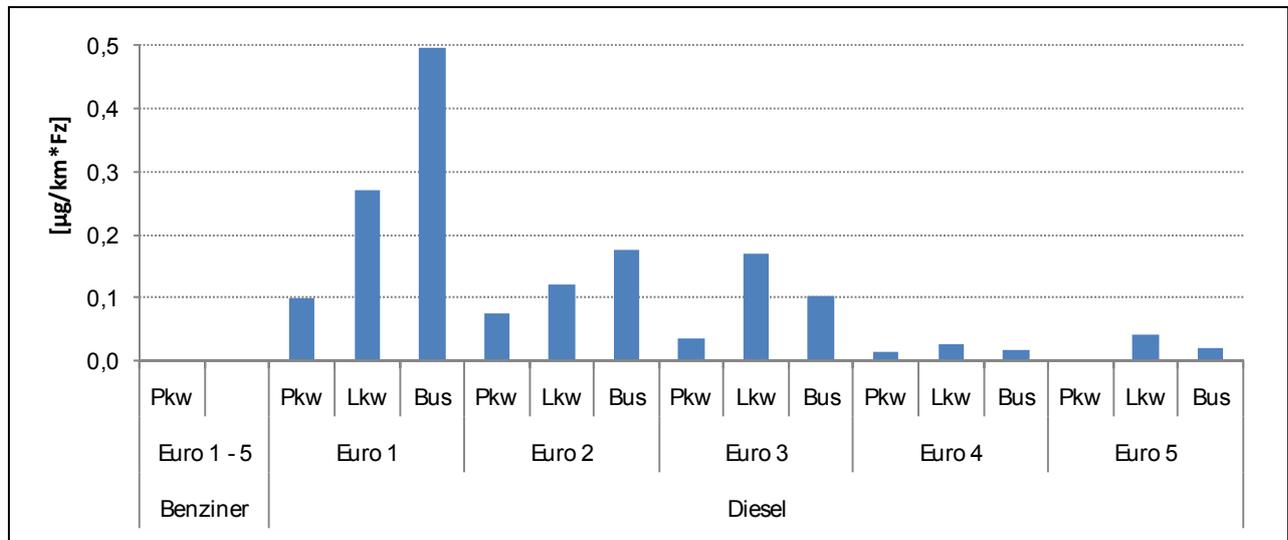


Abbildung 67: Durchschnittliche motorbedingte Partikelemissionen je Fahrzeug und Kilometer für verschiedene Fahrzeugarten, Kraftstoffkonzepte und Schadstoffklassen (ermittelt nach HBEFA (2010), Bezugsjahr 2008, Verkehrssituation gesättigte Hauptverkehrsstraße innerorts).

Die obige Darstellung berücksichtigt nur motorbedingte Partikelemissionen. Die nicht-motorbedingten Partikelemissionen sind unabhängig von Kraftstoffkonzept und Schadstoffklasse, nicht jedoch von der Fahrzeugart. In aktuellen Modellen geht beispielsweise das Fahrzeuggewicht mit der Potenz 2,14 (nach Düring, Lohmeyer [2001]) in die Berechnung der nicht-motorbedingten Emissionen ein [IVU Umwelt 2010].

Abbildung 68 zeigt die durchschnittlichen NO_x -Emissionen für Pkw, LNF, Lkw und Busse, differenziert nach Schadstoffklasse und Kraftstoffkonzept auf Grundlage von HBEFA, INFRAS [2010] für eine innerörtliche Verkehrssituation mit geringem Störungsgrad.

Folgende Sachverhalte sind in Bezug auf die NO_x -Emissionen erkennbar:

- Sowohl Benzin- als auch Diesel-Pkw tragen erkennbar zu den NO_x -Emissionen bei.
- Die Emissionen der schweren Fahrzeugklassen und insbesondere von Bussen liegen um etwa das Zehnfache höher als die Emissionen der leichten Fahrzeugklassen.
- Die Schadstoffklassen Euro 1 bis Euro 5 zeigen bezogen auf einzelne Fahrzeugarten nur eine geringe oder gar keine Reduzierung der NO_x -Emissionen. Erst die Schadstoffklasse Euro 6 wird hier deutliche Verbesserungen zeigen [Umweltbundesamt 2009b].

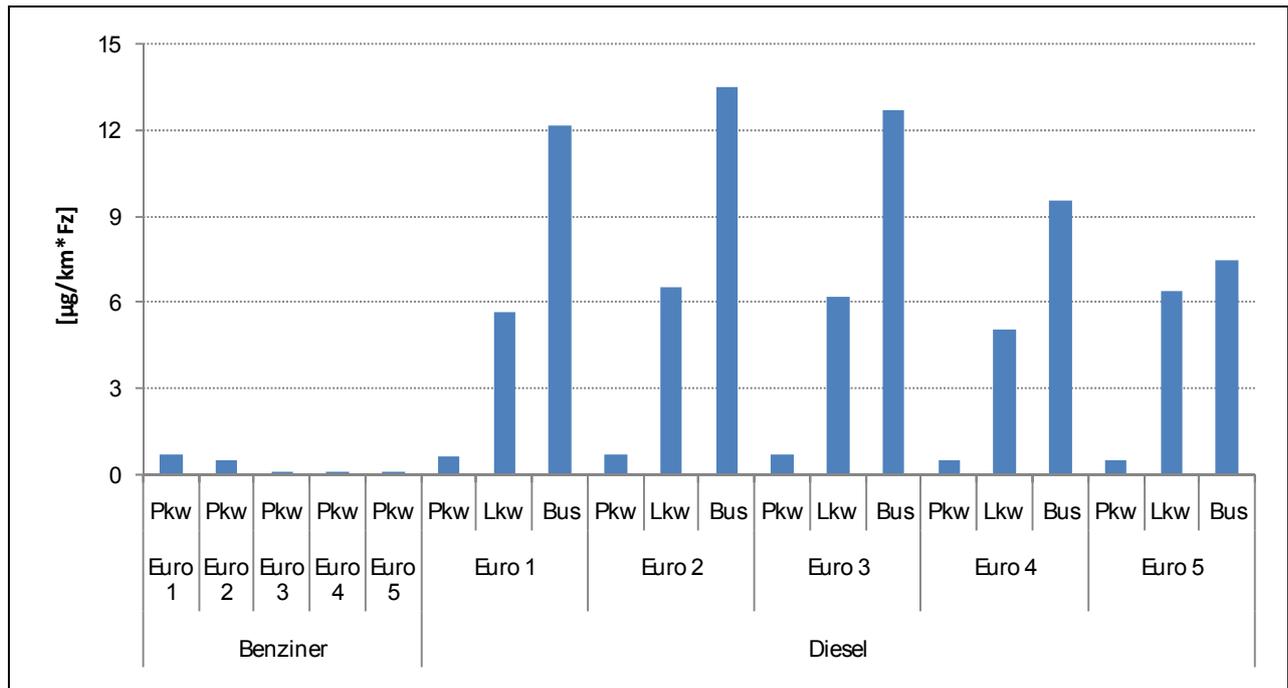


Abbildung 68: Durchschnittliche NO_x-Emissionen je Fahrzeug und Kilometer für verschiedene Fahrzeugarten, Kraftstoffkonzepte und Schadstoffklassen (ermittelt nach HBEFA (2010), Bezugsjahr 2008, Verkehrssituation gesättigte Hauptverkehrsstraße innerorts).

Geschwindigkeit und Verkehrsflusszustand

Die Geschwindigkeit und die Qualität des Verkehrsablaufs haben einen Einfluss auf die Emissionen des Straßenverkehrs. Höhere Geschwindigkeiten und ein schlechter Verkehrsablauf führen zu höheren Emissionen, wobei der Einfluss des Verkehrsablaufs größer ist als der Einfluss der Geschwindigkeit. Das Ergebnis der Literaturrecherche zeigt allerdings, dass sowohl die angewendeten Methoden ebenso wie die Ergebnisse der Untersuchungen große Unterschiede aufweisen. In mehreren Untersuchungen lassen sich der Einfluss der Geschwindigkeit und der Einfluss des Verkehrsablaufs nicht zweifelsfrei trennen. Nur wenige Untersuchungen lassen Rückschlüsse auf die Partikel- und Stickoxidbelastung anhand „gängiger“ Kenngrößen zum Verkehrsablauf, beispielsweise nach HBS, FGSV [2005], zu.

Geschwindigkeit

Cerwenka [1997] zeigt einen vereinfachten Ansatz zur Berechnung von Emissionen E in Abhängigkeit von Geschwindigkeit v , Kraftstoffkonzept und Fahrzeugart. Die Schadstoffe, Kraftstoffkonzepte und Fahrzeugarten werden darin über die Regressionskoeffizienten C_x berücksichtigt:

$$E(v) = C_0 + C_1 \cdot v^2 + \frac{C_2}{v} \left[\frac{\text{g}}{\text{Kfz} \cdot \text{km}} \right]$$

Prinzipiell hängt der Schadstoffausstoß aber neben der Geschwindigkeit auch von der Motorauslastung und Beschleunigung ab, die wiederum eine Funktion von Drehzahl,

Drehmoment und gewähltem Gang sind. Aktuelle Modelle berücksichtigen diese Zusammenhänge weitestgehend ([Park et al. 2000], [Kuwahara et al. 2001], [PTV AG 2009]).

Verschiedene Untersuchungen zu Partikelemissionen zeigen erhebliche Einflüsse für eine Geschwindigkeitsreduktion von 50 km/h auf 30 km/h:

- Rabl, Deimer [2001] zeigen anhand von Rollenprüfstandmessungen eine Reduktion von über 50 % der motorbedingten *Pkw*-Partikelemissionen.
- Karajan [2007] zeigt eine Reduktion der motorbedingten *Lkw*-Partikelemissionen von etwa 70 %.
- Das norwegische VLuft-Modell und das schwedische PM₁₀-Emissionsmodell gehen von einer Reduktion der nicht-motorbedingten Emissionen in einer Größenordnung von 70 % aus (Gustafsson [2001] und Bringfielt et al. [1997], zitiert in BAST [2008]).
- Untersuchungen von Düring, Pöschke, Lohmeyer [2009] ergaben für die nicht-motorbedingten Partikelemissionen eine Reduktion von 10 bis 20 %.

Eine weniger deutliche Tendenz des Einflusses einer Geschwindigkeitsreduzierung von 50 km/h auf 30 km/h auf die Partikelemissionen ergab sich bei Untersuchungen von Fitz [2001] in Kalifornien und von Klingner, Sähn [2006] (zitiert in BAST [2008]): In beiden Untersuchungen wurde kein Einfluss der Geschwindigkeit festgestellt.

Immissionsseitig wurde von Tullius [2002] im Rahmen des EU-Projekts HEAVEN eine Reduktion um 2 % festgestellt. Von Düring [2007] ausgewertete Immissionsmessungen zeigen für die Geschwindigkeitsreduzierung eine Senkung der verkehrsbedingten Partikelzusatzbelastung um 27 % oder um 2 bis 3 % der Gesamtbelastung.

Anhand der Darstellungen in den angegebenen Quellen ist eine eindeutige Abgrenzung zwischen Einflüssen der Fahrgeschwindigkeiten und der Qualität des Verkehrsablaufs jedoch nicht immer eindeutig möglich, die Bandbreite der dargestellten Untersuchungsergebnisse kann durchaus aus einer Vermischung dieser Einflussgrößen herrühren.

Kuwahara et al. [2001] haben den Einfluss der Geschwindigkeit auf die *NO_x-Emissionen* modelliert. zeigt die Ergebnisse eines für japanische Verhältnisse kalibrierten Modells in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke. Danach hat die Geschwindigkeit im innerstädtischen Bereich nur einen geringen Einfluss auf die *NO_x-Emissionen*.

Eine Geschwindigkeitsreduktion von 50 km/h auf 30 km/h zeigt nach Karajan [2007] auch für deutsche Verhältnisse für die *NO_x-Pkw-Emissionen* einen vernachlässigbaren Effekt. Für die *NO_x-Lkw-Emissionen* hingegen stellt Karajan [2007], der sich wie Rabl, Deimer [2001] auf Untersuchungen des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz bezieht, allerdings einen höheren Einfluss dar: Die Geschwindigkeitsreduktion von 50 km/h auf 30 km/h führt hier zu einer Minderung um 30 %. Immissionsmessungen von Tullius [2002] im Rahmen des EU-Projekts HEAVEN ergaben für den Gesamtverkehr im Untersuchungsgebiet eine Reduzierung der *NO_x-Konzentration* um 3 %.

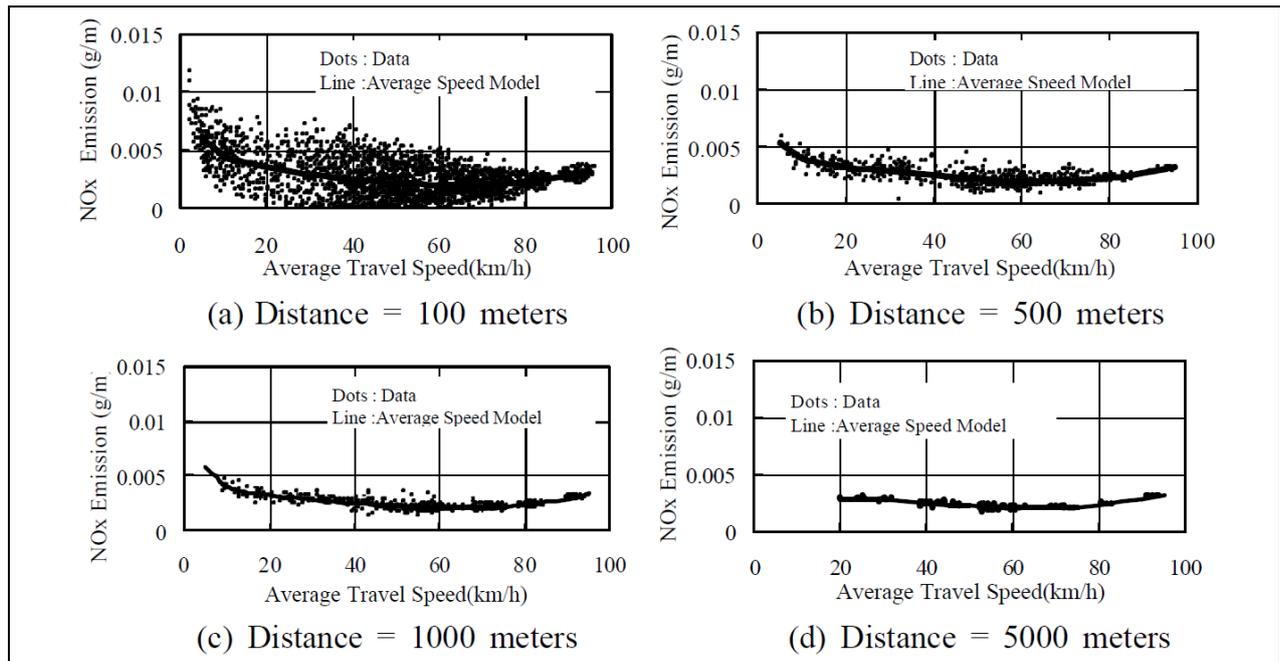


Abbildung 69: NO_x-Emissionen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für unterschiedliche Streckenlängen [Kuwahara et al. 2001].

Qualität des Verkehrsablaufs

Kenngrößen zur Qualität des Verkehrsablaufs sind nach HBS, FGSV [2005]

- Wartezeiten,
- Fahrzeuge im Stau (Rückstaulängen),
- Anzahl der Halte sowie
- Sättigungsgrad und Anteil übersättigter Umläufe.

Die Literaturrecherche ergab jedoch nur wenige Untersuchungen mit direktem Bezug zu diesen Kenngrößen:

- Boltze et al. [1987] haben bereits vor mehr als 20 Jahren die Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs von Wartezeiten und der Anzahl der Halte untersucht und hierfür optimale Umlaufzeiten ermittelt, eine direkte Übertragbarkeit auf die hier betrachteten Luftschadstoffe ist aber wegen teilweise unterschiedlicher Wirkungszusammenhänge nicht möglich.
- Galatioto, Zito [2007] haben den Einfluss der (makroskopischen) Kenngrößen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, Geschwindigkeit, Belegungsgrad, Rückstaulängen und Reisezeiten auf die Kohlenmonoxid- und Ammoniak-Immissionen untersucht. Die Rückstaulänge ergab hier die höchste Korrelation mit den gemessenen Immissionen.
- Cobian et al. [2009] haben NO_x-Emissionsmodellierungen für verschiedene Level-Of-Service (LOS) der Kenngröße ICE (Intersection Capacity Utilization) durchgeführt, die in etwa mit dem Sättigungsgrad nach HBS, FGSV [2005] verglichen werden kann. Hierbei wurden die größten Emissionsreduzierungen für stufenweise Verbesserungen von LOS F (ICU>1) nach C (0,7<ICU<0,8) festgestellt. Verbesserungen des Verkehrsablaufs über den LOS C hinaus zeigten nur eine geringe Reduktion.

Eine Reihe weiterer emissions- und immissionsbezogener Untersuchungen haben einen Einfluss des Verkehrsablaufs festgestellt, jedoch ohne dabei die gängigen Qualitätskenngrößen nach HBS, FGSV [2005] zu verwenden: Düring et al. [2004] haben die Abhängigkeit der *Partikelemissionen* vom Verkehrsablauf untersucht. Abbildung 70 stellt diesen Einfluss für das Bezugsjahr 2003 und einen Schwerververkehrsanteil von 10 % dar. Der Verkehrsflusszustand wird dabei nach HBEFA-Verkehrssituationen⁵ differenziert. Die vier rechten Säulen stellen innerörtliche Verkehrssituationen mit gutem (links) bis schlechtem (rechts) Verkehrsflusszustand dar.

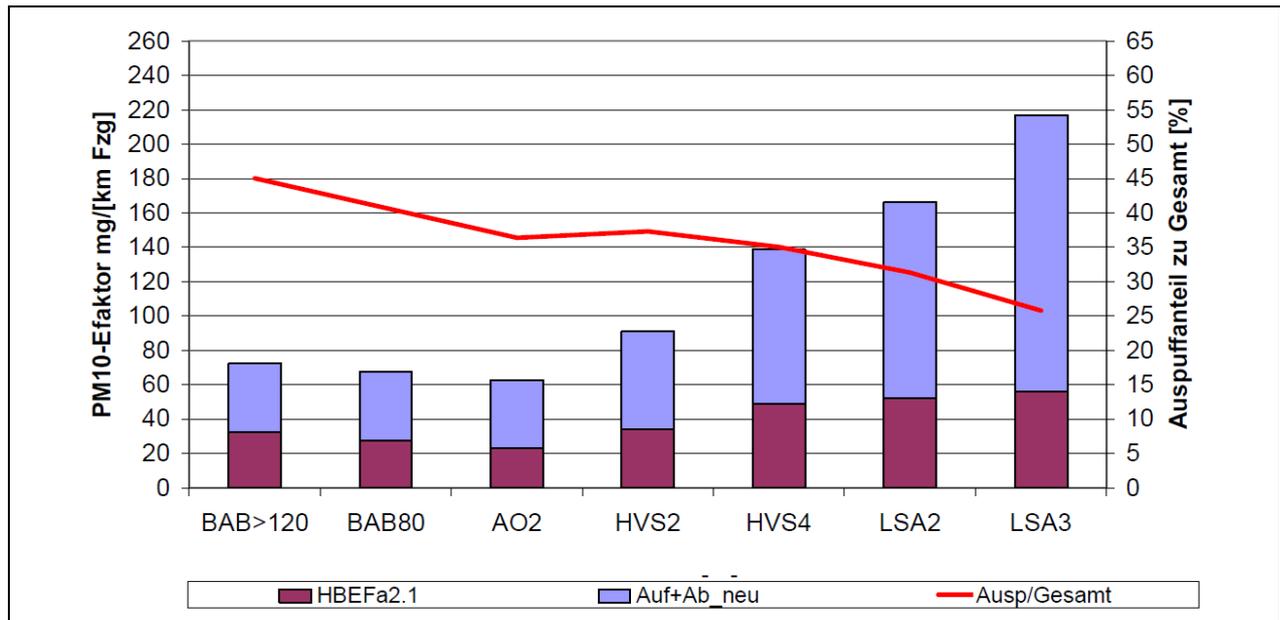


Abbildung 70: PM10-Emissionsfaktoren (Motor = rot; Aufwirbelung und Abrieb = blau) in Abhängigkeit von der Verkehrssituation im Bezugsjahr 2003 und 10% Lkw-Anteil [Düring et al. 2004].

In Graz wurden im Rahmen des Projekts Grazer Adaptive Verkehrssteuerung (GAVE) Floating Car Erhebungen durchgeführt, die anschließend auf dem Rollenprüfstand nachgestellt und zur Kalibrierung eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells verwendet wurden. Die Simulation ergab für die verbesserte Koordinierung eine Reduzierung von 11 % der NO_x -Emissionen und von 7 % der *motorbedingten PM-Emissionen* im Vergleich zur vorherigen Steuerung [Hirschmann, Fellendorf 2009].

Immissionsbezogene Untersuchungen durch Düring [2007] in Dresden haben für die verkehrliche PM_{10} -Zusatzbelastung ein Reduktionspotenzial von 27 % (dies entspricht in der durchgeführten Untersuchung $2 \mu g/m^3$) festgestellt. Für die NO_x -Zusatzbelastung wurden keine Reduktionen festgestellt. In Hamburg hat Koch [2006] im Rahmen der Einführung der adaptiven

⁵ Nach HBEFA, INFRAS [2010] ist eine Verkehrssituation durch den Gebietstyp (Land oder Agglomeration), den Straßentyp (z. B. Hauptverkehrsstraße oder Erschließungsstraße), das Tempolimit oder den Verkehrszustand (flüssig, dicht, gesättigt oder stop+go) definiert.

Netzsteuerung die Wirkungen auf städtische NO_x- und PM₁₀-Immissionen untersucht. Außer positiven Tendenzen konnten jedoch keine klaren Effekte beobachtet werden.

Windrichtung, Windgeschwindigkeit

Anhand der recherchierten Forschungsprojekte kann grundsätzlich auf einen starken Einfluss von Windrichtung und Windgeschwindigkeit auf die Partikel- und Stickoxidkonzentration geschlossen werden:

Eine anschauliche Erklärung zum *Einfluss der Windgeschwindigkeit* liefert Manier [2005]: Bei einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s wird in 1 s eine Luftschicht von 1 m Dicke an einer Schadgasquelle vorbeitransportiert. Bei einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s wird eine Luftschicht von 2 m Dicke an der Quelle vorbeitransportiert. Die Konzentration ist bei gleicher Emission folglich halb so groß. Allgemein formuliert bedeutet dies: Die Schadstoffkonzentration verhält sich antiproportional zur Windgeschwindigkeit.

In Untersuchungen von Baum [2008] (welche allerdings Außerorts an BAB durchgeführt wurden) wurde bis zu einer Windgeschwindigkeit von 2,5 m/s eine Erhöhung der PM₁₀-Konzentration festgestellt. Erst bei größeren Windgeschwindigkeiten nimmt die Schadstoffkonzentration etwa antiproportional zur Erhöhung der Windgeschwindigkeit ab. Eine mögliche Begründung für diesen Sachverhalt ist der höhere Abtrag von aufgewirbelten Partikeln bei Windgeschwindigkeiten zwischen 1 m/s und 2,5 m/s.

Untersuchungen von Spangl [2004] im Auftrag des Umweltbundesamtes von Österreich zeigen, dass sich der antiproportionale Zusammenhang auch auf NO₂-Konzentrationen übertragen lässt.

Grundsätzlich hat die Hauptwindrichtung einen wesentlichen Einfluss auf den Ferneintrag der Luftschadstoffe und damit auf die Hintergrundbelastung.

Lokal stellt sich der *Einfluss der Windrichtung* unter Berücksichtigung der Straßenlängsachse und der Position des Messgerätes nach Baum [2008] für PM₁₀ größenordnungsmäßig wie folgt dar:

- Parallel zur Straßenachse: Konzentrationsminderung um ca. 10 % im Vergleich zur Erfassung im Lee (dem Wind abgewandte Seite).
- PM₁₀ im Luv (dem Wind zugewandte Seite): Konzentrationsminderung um ca. 30 bis 45 % im Vergleich zur Erfassung im Lee (dem Wind abgewandte Seite).

Luftfeuchte und Niederschlag

Die Auswertungen von Schulze [2002] zum Einfluss der *Luftfeuchte* auf die PM₁₀- und NO_x-Belastung zeigen lediglich einen leichten Anstieg der PM₁₀-Belastung bei hoher Luftfeuchte. Kantamaneni et al. [1996] zeigen in ihren Untersuchungen eine entgegengesetzte Tendenz, allerdings nur für eine kleine Stichprobe.

Inwieweit hier reale Wirkungszusammenhänge nachgewiesen wurden oder Scheinkorrelationen bzw. messtechnisch bedingte Zusammenhänge, ist unklar. Sofern die Messtechnik das angesaugte Luftvolumen nicht auf eine einheitliche Luftfeuchte konditioniert, sind hier erhebliche Verfälschungen der Messwerte möglich.

Der Einfluss von *Niederschlagsereignissen* auf die PM_{10} - und NO_x -Belastung wurde ebenfalls von Schulze [2002] untersucht. Die Untersuchungen zeigen ab einer bestimmten Niederschlagsmenge (0,1mm) eine deutliche Reduktion (20%) der PM_{10} -Tagesmittelwerte. Auch für NO_x wurde eine Reduktion beobachtet, die jedoch nicht so deutlich auftrat wie für PM_{10} .

Klingner [2006] und Düring [2005] haben den Verlauf der PM_{10} -Belastung in Abhängigkeit der Zeit nach einem Niederschlagsereignis untersucht und sind zu dem Ergebnis gekommen, dass der Effekt eines Niederschlagsereignisses mehrere Tage anhält und die PM_{10} -Belastung erst nach 3 bis 5 Tagen keine erkennbare Wirkung mehr zeigt. Abbildung 71 zeigt die Ergebnisse von Düring [2005] differenziert nach Winter (links) und Sommer (rechts).

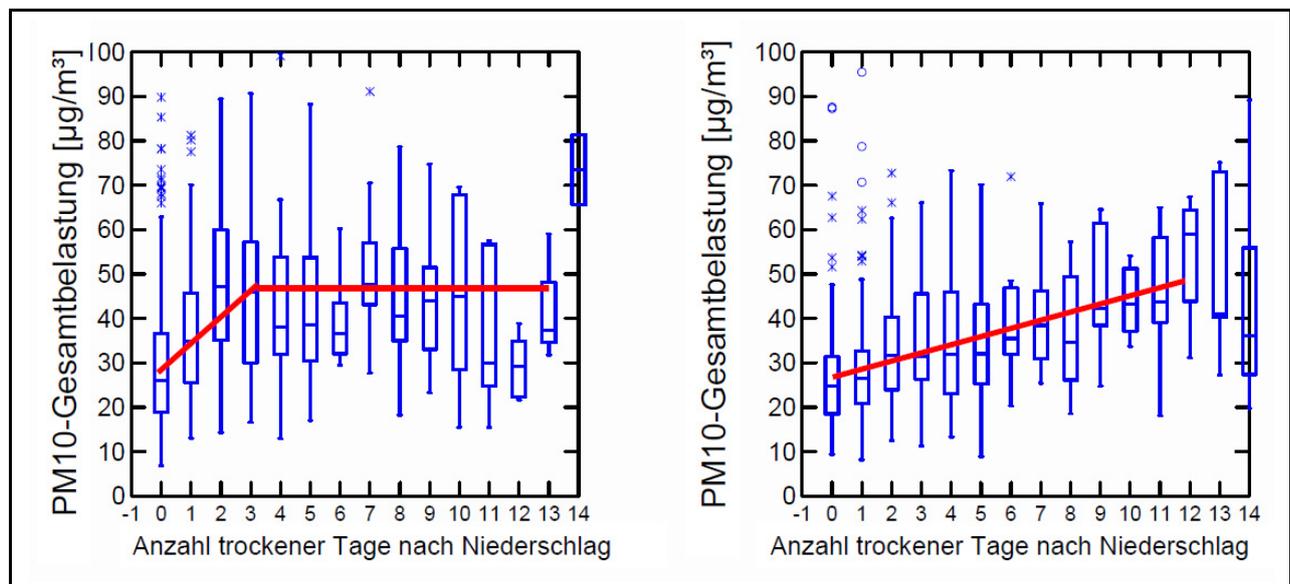


Abbildung 71: Verlauf der PM_{10} -Belastung nach einem Niederschlagsereignis im Winter (links) und im Sommer (rechts) [Düring 2005].

Temperatur

Eine Reihe von Untersuchungen zeigt für steigende Temperaturen ansteigende PM_{10} -Konzentrationen (u. a. [Baum et al. 2006], [Kaminski 2005]). Die dargestellten Zusammenhänge deuten auf lineare Zusammenhänge oder schwach exponentielle Zusammenhänge hin. Darstellungen in bast [2008] differenzieren hier zwischen Sommer- und Wintermonaten: Demnach sei im Sommer bei steigender Temperatur und im Winter bei sinkender Temperatur ein Anstieg der PM_{10} -Gesamtbelastung zu verzeichnen. Kumar [2005] hingegen hat für gemessene Temperaturen im Bereich zwischen ca. 20°C und 30°C (in Indien) keine Einflüsse auf die PM_{10} -Belastung feststellen können.

Mögliche Ursachen für die beschriebenen Wirkungen können sein:

- Zunahme nicht-motorbedingter Partikelemissionen im Winter aufgrund von Streugut und vermehrtem Schmutzeintrag.
- Zunahme sonstiger Partikelemissionen infolge ineffizienter und vermehrter Verbrennungsvorgänge (Heizung, längere Kaltstartphasen).
- Veränderung des Aggregatzustands von luftgetragenen Partikeln und Gasen in Abhängigkeit von der umgebenden Luft und der Temperatur (z. B. Verdampfen leichtflüchtiger Verbindungen).
- Beeinflussung von Luftaustauschbedingungen durch Einflüsse auf Luftfeuchte, Luftdruck, atmosphärische Schichtung und damit auch Windgeschwindigkeiten sowie auf photochemische Prozesse.

Festgehalten werden kann, dass die Temperatur in Europa einen erheblichen Einfluss auf die Partikel- und Stickoxidbelastung hat. Allerdings können weder die Richtung noch die Ausprägung des Einflusses klar zugeordnet werden, da sie zum einen von lokalen und saisonalen jahreszeitlichen Randbedingungen sowie von Wechselwirkungen mit anderen Einflüssen zusammenhängen.

Luftdruck und atmosphärische Schichtung

Der *Luftdruck* beeinflusst die Partikel- und Stickoxidbelastung eher indirekt über die atmosphärische Schichtung.

Die *atmosphärische Schichtung* gibt die Vertikalerstreckung an, in die am Boden emittierte Schadstoffe turbulent verteilt werden. Die atmosphärische Schichtung und damit die Verdünnung von Schadstoffen werden wesentlich durch den vertikalen Temperaturgradient bestimmt. Ein vertikaler Temperaturgradient über dem adiabatischen oder neutralen Gradienten führt zu einer labilen Schichtung, die vertikalen Austausch begünstigt. Ein vertikaler Temperaturgradient unterhalb des adiabatischen Gradienten führt zu einer stabilen Schichtung, die den vertikalen Austausch hemmt. Eine weitestgehend unveränderte Temperatur mit zunehmender Höhe wird als Isothermie und eine zunehmende Temperatur mit zunehmender Höhe wird als Inversion bezeichnet [Spangl et al. 2003]. Isothermie und Inversion stehen für stabile Schichtungen und haben nach Untersuchungen von Klingner et al. [2006] und Ludes et al. [2008] einen deutlichen Einfluss auf die PM₁₀- und NO_x-Konzentration.

Aufgrund der höheren mechanischen Turbulenz in Straßenschluchten und dem höheren verkehrlichen Verursacheranteil an der Immissionsbelastung ist der Effekt von Inversionswetterlagen an Verkehrs-HotSpots abgeschwächt. Die Ergebnisse von Klingner et al. [2006] zeigen dennoch einen erheblichen Einfluss dieser Kenngröße für den innerstädtischen Bereich.

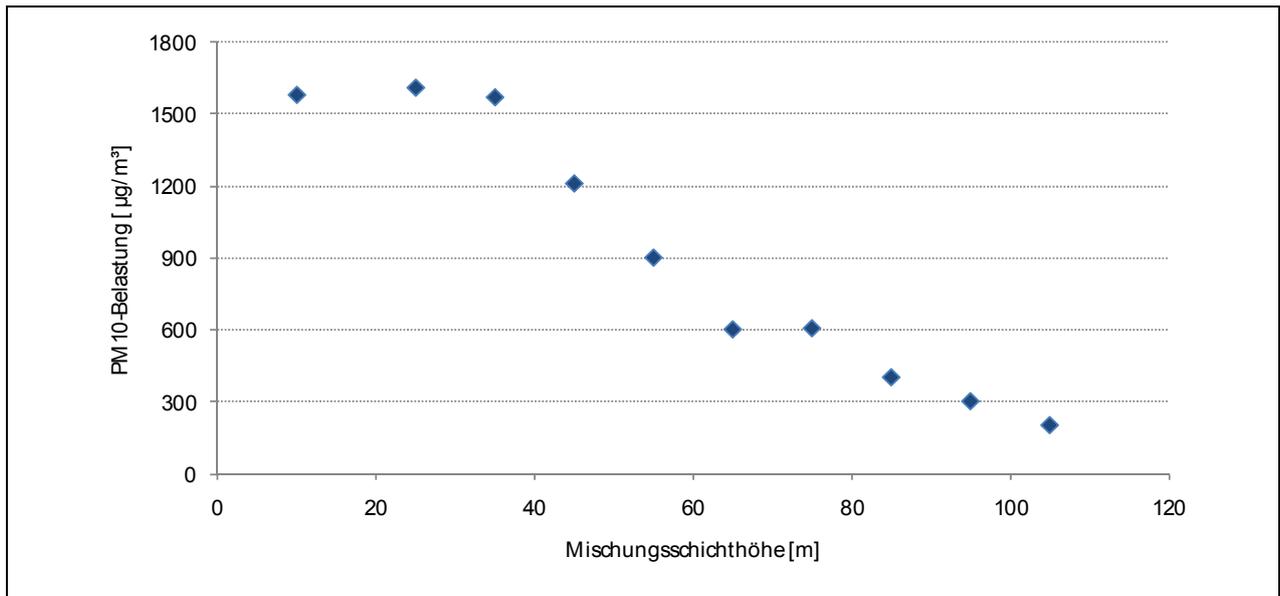


Abbildung 72: Einfluss der Mischungsschichthöhe auf die PM₁₀-Immissionskonzentration (dargestellt sind Tagesmittelwerte) an einer innerstädtischen Straßenschlucht (eigene Darstellung, Daten entnommen aus Klingner et al. [2006]).

Globalstrahlung und Ozon

Die NO₂-Konzentration an einem Verkehrs-HotSpot hängt maßgeblich von den vorhandenen Reaktionspartnern, dem primär emittierten Stickstoffmonoxid und dem photochemisch entstandenen Ozon ab. Einflüsse der Globalstrahlung auf die PM₁₀-Belastung, die über eine Erhöhung der Temperatur und die damit verbundenen Wirkungen hinausgehen, sind nicht bekannt.

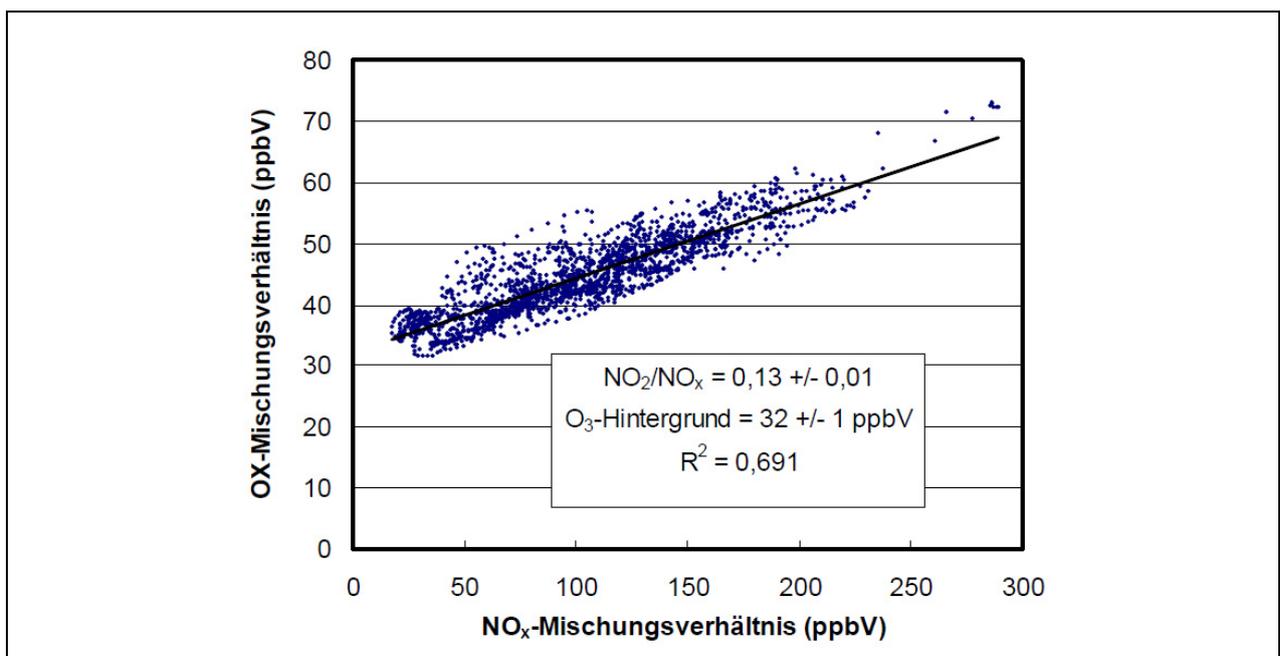


Abbildung 73: Gegenüberstellung von OX und NO_x-Mischungsverhältnis [Kurtenbach et al. 2008].

Ozon entsteht bei intensiver Sonneneinstrahlung durch photochemische Prozesse. Die maßgebende Reaktion in Straßennähe ist der anschließende Bildungsprozess von Stickstoffdioxid aus Stickstoffmonoxid und Ozon (Dünnebeil et al. [2007], Ludes et al. [2008]). Kurtenbach et al. [2008] haben diesen Zusammenhang mittels hochaufgelösten NO-, NO₂-, NO_x- und O₃-Messungen dargestellt. Hierbei wurde eine Hilfsgröße OX als Summe aus NO₂ und O₃ (Hintergrund) gebildet und diese dem NO_x-Mischungsverhältnis gegenübergestellt.

5.2.2 Verfahren zur Messung immissionsbezogener Kenngrößen

Übersicht über die Verfahren

Die Erfassung von Immissionskenngrößen ist für eine immissionsbezogene Wirkungsabschätzung von Minderungsmaßnahmen unerlässlich. Die Erfassung der Kenngrößen wird nach der direkten (Messung) und der indirekten (Modellierung) Erfassung gegliedert, da sich die methodischen und technischen Ansätze zur Erfassung der einzelnen Schadstoffe im Gegenzug zu den Ansätzen zur Erfassung verkehrlicher Kenngrößen nur geringfügig unterscheiden.

Verfahren zur direkten Erfassung von Immissionen, die zur Überwachung der Luftqualität geeignet sind, müssen gemäß 39. BImSchV mindestens den Anforderungen des Leitfadens „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ ENV 13005-1999, der Methodik nach ISO 5725:1994 und des CEN Berichts „Air Quality – Approach to Uncertainty Estimation for Ambient Air Reference Measurement Methods“ CR 14377:2002E genügen. Beurteilt werden nach Eickelpasch, Eickelpasch [2004] unter anderem Parameter wie der Messbereich, die Nachweisgrenze, die Reproduzierbarkeit, die Temperaturabhängigkeit. Die Gesamtmessunsicherheit muss dabei den Anforderungen an Datenqualität der EU-Tochtrichtlinien genügen.

Im Folgenden wird ein Überblick über gängige Immissionsmessverfahren zur Messung der Partikelmassen- und Partikelanzahlkonzentration sowie der Stickoxidmassenkonzentration sowie ihre Eignung für die hier durchgeführte Untersuchung gegeben. Die Eignung wird in diesem Zusammenhang lediglich anhand der zeitlichen Auflösung der Datenerfassung bewertet. Da ein Großteil der dargestellten Messverfahren eignungsgeprüft ist und eine Alternative zu Referenzmessverfahren darstellt, wird die Bewertung entsprechender Parameter zur Güte der Messung in diesem Kontext nicht als erforderlich angesehen.

In Bezug auf den Aufwand für die Messung immissionsbezogener Kenngrößen soll an dieser Stelle festgehalten werden, dass voraussichtlich ein deutlich höherer finanzieller und personeller Aufwand im Vergleich zur Messung der gängigen verkehrsbezogenen Kenngrößen anfällt. Die erforderlichen regelmäßigen Aufgaben für Wartung, Kalibrierung und weitere Maßnahmen zur Sicherstellung einer hohen Datenqualität sind hier in einem erheblich höheren Umfang als bei der gängigen Verkehrsdetektionstechnik durchzuführen.

Betastrahlenabsorption

Bei der Staubmessung mittels der Betastrahlenabsorption wird die Probeluft durch ein sich (schrittweise) fortbewegendes Filterband gesaugt. Die auf dem Filterband abgeschiedene Staubmenge wird über die Schwächung der Beta-Strahlung beim Durchtritt durch den bestaubten Filter gemessen. Das Verfahren ermöglicht eine Echtzeit-Messung der Staubkonzentration auf dem Filter und ist somit gut geeignet für zeitlich hochaufgelöste Untersuchungen [Eickelpasch, Eickelpasch 2004].

Messung der Schwingung eines staubbeladenen Filters (TEOM)

Hierbei wird die Probeluft durch einen Filter geleitet, der Element eines in Eigenresonanz schwingenden Systems ist. Durch den im Filter abgeschiedenen Staub vergrößert sich die schwingende Masse und führt zu einer Verringerung der Resonanzfrequenz. Die Schwebstaubkonzentration ergibt sich anhand der bei der Kalibrierung ermittelten Beziehung zwischen Frequenz und Staubbeladung unter Berücksichtigung des Probeluftvolumens [Eickelpasch, Eickelpasch 2004].

Gravimetrie

Die Gravimetrie ist nach 39. BImSchV das Referenzverfahren zur Messung der PM₁₀-Massenkonzentration sowie die vorläufige Referenzmethode für die PM_{2,5} Massenkonzentration. Bei der gravimetrischen Messung wird über 24 h ein definiertes Luftvolumen durch einen Filter gesogen. Die angesaugten Partikel werden anhand eines grössenselektiven Einlasses getrennt und die relevante Fraktion auf einem vorgewogenen und konditionierten Filter gesammelt. Die Bestimmung der gesammelten Partikelmasse erfolgt schließlich unter Laborbedingungen. Die Gravimetrie ist ein diskontinuierliches Messverfahren und ermöglicht daher keine zeitlich lückenlose Luftüberwachung. Eine kurzfristige Datenverfügbarkeit ist verfahrensbedingt nicht gegeben: Aus Kostengründen werden üblicherweise mehrere Filter in einem Gerät gesammelt und schließlich gebündelt gewechselt. Dadurch liegen zwischen Probenahme und Laborergebnis lange Zeiträume. Aufgrund der groben zeitlichen Auflösung von 24 h eignet sich das gravimetrische Verfahren primär zur Kontrolle der eingesetzten Messverfahren, nicht jedoch für eine tages- oder stundenaktuelle Information über die Luftqualität und Aussagen zu der hier untersuchten Fragestellung.

Partikelkondensationszählung (CPC)

Mit einem Kondensationspartikelzähler (CPC) kann die Anzahlkonzentration von Partikeln im Größenbereich weniger Nanometer bis ca. 30 Mikrometer gemessen werden. Dabei wird das angesaugte Aerosol in einen Sättiger geleitet und dort mit Dampf gesättigt (mit steigender Temperatur kann ein Gas mehr Flüssigkeit aufnehmen). Anschließend wird der gesättigte Luftstrom in einem Kondensator abgekühlt, wodurch die Menge der aufnehmbaren Flüssigkeit wieder sinkt und die Luft einen übersättigten Zustand erreicht. Die Flüssigkeit, die nun von der Luft nicht mehr aufgenommen werden kann, kondensiert auf der Oberfläche der Partikel und ermöglicht durch den nun größeren Durchmesser ihre optische Erfassung. Die anschließende Streulichtmessung (siehe auch „Partikelzählung nach dem Streulichtprinzip“) ermöglicht die

Bestimmung der Anzahlkonzentration. Nach Birmili [2006] erfassen CPC alle Partikel oberhalb ihrer unteren Nachweisschwelle (ca. 3 nm). Als Qualitätskenngröße für einen noch zu definierenden Standard sei eine Langzeitabweichung der Konzentration kleiner als +/- 10 % vorzusehen. CPC erfassen die für die Fragestellung relevanten Kenngrößen mit einer hohen Genauigkeit und einer unmittelbaren Verfügbarkeit.

CPC erfassen die für die Fragestellung relevanten Kenngrößen mit einer hohen Genauigkeit und einer unmittelbaren Verfügbarkeit und sind somit für verkehrsbezogene hochaufgelöste Untersuchungen gut geeignet.

Partikelzählung nach dem Streulichtprinzip

In optischen Partikelzählern werden die angesaugten Partikel mit dem Probenahmevolumenstrom durch ein beleuchtetes Messvolumen transportiert. Dort streuen die Partikel das Licht, das von einem Photodetektor in elektrische Signale umgewandelt wird. Eine nachgeschaltete Signalverarbeitung wertet die Signale meist anhand von definierten Schwellenwerten bezüglich Partikelgröße und Anzahl aus. Das Prinzip der Streulichtmessung wird auch als Nephelometrie bezeichnet [Eickelpasch, Eickelpasch 2004].

Die zeitliche Auflösung der Erfassung liegt bei wenigen Sekunden, so dass das Messverfahren für die untersuchte Fragestellung grundsätzlich gut geeignet ist. Als Schwachpunkt wird die untere Grenze des Erfassungsbereichs angesehen, da Partikel im unteren Nanometerbereich häufig nicht erfasst werden können.

Chemolumineszenz

Die Chemolumineszenzmessung ist gem. 39. BImSchV das Referenzverfahren zur Messung der Stickoxidkonzentration. Unter Chemolumineszenz versteht man eine charakteristische Strahlung bei chemischen Reaktionen von Gasen. Unter konstanten Reaktionsbedingungen ist die Intensität der Chemolumineszenz zur Konzentration der Probe proportional (sofern das zur Reaktion benötigte Hilfsgas im Überschuss vorhanden ist). Die Messung erfolgt in einer Reaktionskammer, die mit Luft durchströmt wird, welche zuvor über einen Ozonisator geleitet wurde. Der Reaktionskammer wird zusätzlich ein konstanter Probeluftstrom zugemischt. In der Reaktionskammer reagieren nun Stickstoffmonoxid und Ozon zu Stickstoffdioxid und Sauerstoff. Nach optischer Filterung kann die Chemolumineszenz gemessen werden.

Die Chemolumineszenz-Methode ist kontinuierliches Messverfahren, welches den Vorteil einer zeitlich lückenlosen Luftüberwachung hat und in Praxis fast ausschließlich eingesetzt wird. Die zeitliche Auflösung liegt bei wenigen Sekunden. Das Messverfahren erscheint somit gut geeignet für hochaufgelöste immissionsbezogene Untersuchungen der Wirkungen des Straßenverkehrs.

5.2.3 Verfahren zur Modellierung immissionsbezogener Kenngrößen

Verfahren zur Modellierung von Immissionen nutzen häufig (modellierte) Emissionen des Straßenverkehrs als Eingangsdaten. Daher werden im Folgenden auch die grundlegenden Aspekte der Emissionsmodellierung kurz dargestellt.

Modellierung von Emissionen

Modelle zur Abschätzung von Emissionen können in makroskopische und mikroskopische Modelle unterschieden werden.

Makroskopische Modelle schätzen die Emissionen für stark aggregierte Verkehrszustände ab, d. h. für definierte Kombinationen aus z. B. durchschnittlichen Geschwindigkeiten, durchschnittlichen Beschleunigungen und Straßenkategorien. Weiterhin werden meist Durchschnittswerte der Flottenzusammensetzung, des Kaltstartanteils und des Fahrzeugalters (zur Ermittlung der Wirksamkeit von Katalysatoren) berücksichtigt. Die Grundlage für die Emissionen der aggregierten Verkehrszustände sind Emissionsmessungen an repräsentativen Fahrzeugen für repräsentative Fahrzyklen. Nach HBEFA [INFRAS 2010] wird hierfür der Fahrzeugbestand in Fahrzeuggruppen („Schichten“) eingeteilt, die ein ähnliches Emissionsverhalten aufweisen. Die wesentlichen Einflussparameter für diese Cluster sind die Fahrzeugart, die Schadstoffklasse, das Kraftstoffkonzept, der Hubraum und die Gewichtsklasse. Für die unterschiedlichen Fahrzeuggruppen werden typische Fahrmuster definiert und diese anschließend auf speziellen Rollenprüfständen nachgebildet, wobei die Emissionen gemessen werden. Die Fahrmuster sollen dabei eine repräsentative Kombination (bzw. unterschiedliche Zeitanteile) von Beschleunigungen und Geschwindigkeiten für unterschiedliche Straßenkategorien und unterschiedliche Verkehrsflusszustände („Verkehrssituationen“) darstellen. Der in Deutschland, Österreich und der Schweiz am weitesten verbreitete Ansatz zur makroskopischen Emissionsabschätzung ist das Handbuch für Emissionsfaktoren HBEFA [INFRAS 2010]. In Europa werden darüber hinaus weitere Emissionsmodelle verwendet: COPERT (Einsatz unter anderem in Italien, Griechenland, Belgien; [Europäische Umweltagentur 2009]) nutzt beispielsweise durchschnittliche Geschwindigkeiten als maßgebende Eingangsgröße. Der Ansatz des TNO2001, der nach Smit [2006] vor allem in den Niederlanden Verwendung findet, basiert analog zum HBEFA auf definierten Verkehrssituationen. Verbreitet ist außerdem das frei verfügbare MOBILE6-Modell aus den Vereinigten Staaten [USEPA 2001].

Mikroskopische Modelle berücksichtigen das Fahrverhalten von Einzelfahrzeugen; es werden folglich für jedes Fahrzeug in vorgegebenen Zeitschritten die Emissionen in Abhängigkeit der aktuellen Geschwindigkeit, Beschleunigung, Fahrzeugmasse, Schadstoffklasse, Hubraum, Motortemperatur usw. ermittelt. Im Gegensatz zu den makroskopischen Modellen müssen die Emissionen hier nicht auf Grundlage aggregierter und abstrakter Kombinationen definierter Verkehrsmuster ermittelt werden, sondern können durch die Verknüpfung von Emissionskennfeldern mit den genannten statischen und dynamischen Größen ermittelt werden. Eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz eines mikroskopischen

Emissionsmodells ist die Verknüpfung zu einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell und je nach berücksichtigten Parametern auch die Verknüpfung mit einem Gangwahlmodell.

Im Rahmen einer produktbezogenen Recherche erscheint eine scharfe Trennung zwischen Verkehrsflussmodell und Emissionsmodell schwierig. Die verbreitete und im Projekt AMONES eingesetzte Simulationssoftware VISSIM der PTV AG ist für deutsche Verhältnisse mit einem Emissionskennfeld des Volkswagen-Konzerns verknüpft.

Modellierung von Immissionen

Lokale Immissionen können mittels *Ausbreitungsmodellen* oder mittels *empirisch-statistischen Modellen* abgeschätzt werden. Ausbreitungsmodelle versuchen, die räumliche und zeitliche Ausbreitung der Emissionen aus unterschiedlichen Quellen physikalisch korrekt (jedoch mit unterschiedlichem Komplexitätsgrad) abzubilden. Empirisch-statistische Modelle versuchen, lokal gültige Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Einflussgrößen und Immissionen zur Erklärung oder zur Prognose von Immissionen zu verwenden.

Ausbreitungsmodelle

Aufgrund der grundsätzlich gewährleisteten räumlichen Übertragbarkeit sind Ausbreitungsmodelle erheblich weiter verbreitet als empirisch-statistische Modelle. Ausbreitungsmodelle lassen sich in *Screening-Modelle* und in *mikroskalige Modelle* unterscheiden.

Screening-Modelle haben ihren Anwendungsbereich in ersten Grobabschätzungen mit niedrigem Genauigkeitsbedarf. Aggregierte Eingangsgrößen wie beispielsweise durchschnittliche Verkehrsstärken, Staulängen, die Bebauungsdichte und die Windgeschwindigkeit [HLUG 2009] werden verwendet, um überschlägig Jahresmittelwerte und 98-Perzentilwerte der Schadstoffbelastung in bestimmten Straßenzügen zu ermitteln. Grundlage für die Berechnung der Schadstoffbelastung ist eine Datenbank mit Ergebnissen aus mikroskaligen Modellen, die für typische Anwendungsfälle verallgemeinert wurden [van der Puetten 2006]. Nach 39. BImSchV wird für Screening-Modelle eine Genauigkeit von 75 % für NO₂ und NO_x sowie von 100 % für PM₁₀ gefordert.

Bei höherem Genauigkeitsbedarf sind *mikroskalige Modelle* für innerstädtische Bereiche und Straßenschluchten erforderlich. Diese können den Einfluss mehrerer Straßen auf einen Untersuchungspunkt, örtliche Windstatistiken, Inversionshäufigkeiten etc. berücksichtigen. Mikroskalige Modelle lassen sich grob nach dem verwendeten Ausbreitungsmodell gliedern. Aus diesem ergeben sich meist weitere Eigenschaften wie die benötigte Rechenzeit und die erforderliche bzw. mögliche Komplexität sowie zeitliche Auflösung.

Holmes, Morawska [2006] haben sich detailliert mit den am Markt verfügbaren Produkten zur mikroskaligen Immissionsmodellierung und ihren Eigenschaften befasst. Die den Produkten zugrunde liegenden Ausbreitungsmodelle sind demnach das Box-Modell, Ausbreitungsmodelle nach Euler Gauß und Lagrange sowie Modelle der numerischen Strömungsmechanik.

Das Box-Modell basiert auf dem Satz der Massenerhaltung nach Lomonossow-Lavoisier von 1789, der besagt, dass sich die Masse bei chemischen Reaktionen nicht spürbar ändert. Das Untersuchungsgebiet wird in Quader („box“) eingeteilt, deren Inhalt als durchmischt und homogen angenommen wird, die einen Zufluss und Abfluss von Schadstoffen erlauben sowie unter meteorologischen Einflüssen stehen. Innerhalb der Quader können detaillierte chemische Reaktionen berücksichtigt werden. Eine Abschätzung von Konzentration an unterschiedlichen Punkten innerhalb der Quader ist jedoch nicht möglich, was einen Einsatz für großräumige Bezugsebenen empfiehlt [Holmes, Morawska 2006].

Das Gauß-Modell geht von der Annahme aus, dass sich eine Abgasfahne senkrecht zur Windrichtung (horizontal und vertikal) nach einer Gauß-Verteilung ausbreitet. Bei der Anwendung der Advektions-Diffusions-Gleichung werden u. a. ein homogenes Windfeld, Stationarität und einheitliche Diffusionskonstanten angenommen. Diese stark vereinfachenden Annahmen werden durch verschiedene empirische Terme in der Gleichung wieder kompensiert [HLUG o.J.].

Lagrange-Modelle verwenden „Luftstöße“ („puffs“), um kurzzeitige Einflüsse (sowohl der Meteorologie als auch verschiedener Emittenten) zu berücksichtigen. Kontinuierliche Emissionen werden als Serie von Luftstößen abgebildet. Jeder Luftstoß mit seinen Eigenschaften (u. a. Geschwindigkeit, Richtung, Stabilität und Volumen) wird vom Modell individuell berücksichtigt. Durch eine Überlagerung dieser Luftstöße können Schadstoffkonzentrationen räumlich und zeitlich differenziert bestimmt werden [NWS 2009].

Modelle aus dem Bereich der numerischen Strömungsmechanik (CFD) simulieren das Strömungsverhalten der Luft(-schadstoffe) in Abhängigkeit von Gebäuden und Straßenschluchten. Die mathematische Grundlage sind die Navier-Stokes-Gleichungen nach Claude Louis Marie Henri Navier und George Gabriel Stokes, welche die Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen beschreiben. Die Navier-Stokes-Gleichungen sind nichtlineare partielle Differentialgleichungen 2. Ordnung, die Komponenten zur Berücksichtigung von Turbulenz und der hydrodynamischen Grenzschicht (Einfluss der Reibung) enthalten. Zur Lösung der Gleichungen werden meist numerische Verfahren eingesetzt.

Die Genauigkeit mikroskaliger Modelle soll nach 39. BImSchV je nach zeitlicher Auflösung 30 % bis 60 % betragen. Die erreichbare Datenqualität hängt neben dem verwendeten Modell stark von der Komplexität der Randbedingungen, von der Datenqualität der Eingangsgrößen und auch von subjektiven Komponenten ab. Bächlin et al. [2000] haben in einem Ringversuch verschiedene Modelle (insgesamt 14) verschiedener Institutionen auf Grundlage derselben Datenbasis, jedoch durch unterschiedliche Mitarbeiter der Institutionen, verglichen. Ein Ziel des Projekts war es, die Auswirkungen einer subjektiven Komponente bei der Durchführung von Immissionsprognosen, z. B. wenn die vorhandene Datenlage nicht exakt vom Modell geforderten Eingangsgrößen zugeordnet werden kann, zu bewerten. Ein weiteres Ziel war natürlich das Aufzeigen einer Bandbreite der Ergebnisse unterschiedlicher Modelle für denselben Testfall. Für NO_x -Jahresmittelwerte wurde eine Standardabweichung der Modellierungsergebnisse i. H. v. 17 % der mittleren modellierten Belastung festgestellt. PM_{10} -Werte wurden nicht betrachtet.

Tabelle 32 zeigt das Ergebnis einer Recherche zur erreichbaren Modellierungsgüte von im europäischen Markt verfügbaren Produkten mit mikroskaligen Modellen.

Quelle	Produkt	Ausbreitungsmodell	Modellgebiet	Modellierter Schadstoff	Prozentuale Abweichung oder Bestimmtheitsmaß
Röckle, Richter [1998]	ABC	Lagrange	Fiktives Testfeld (Windkanalmodell)	Gasförmiger Schadstoff-JM	R ² =0,69
	AIRPOL	Lagrange			R ² =0,67
	ASMUS	Lagrange			R ² =0,66
	DASIM	Lagrange			R ² =0,71
	IBS	Gauß			R ² =0,66
	LASAT	Lagrange			R ² =0,62
	MISKAM	CFD			R ² =0,62
	MUKLIMO				R ² =0,61
Bächlin et al. [2003]	MISKAM	CFD	Göttinger Str. Hannover	PM ₁₀ -MM	+8 % bis +35 %, +20 bis +45 %
				PM ₁₀ -8-MM	+20 % bis +45 %
				NO _x -MM	-30 % bis +10 %
				NO _x -8-MM	-31 % bis +10 %
Cyris et al. [2005]	IMMIS _{net}	Gauß	München	NO ₂ -JM	40 %
Düring [2007]	MISKAM	CFD	Berliner Str., Nauen	PM ₁₀ -JM	u. d. N.
				NO _x -JM	u. d. N. bis 14 %
			Lützener Str., Leipzig	PM ₁₀ -4MM	u. d. N.
				NO _x -4MM	5 %
Diegmann et al. [2009]	IMMIS _{MT}	Box	Leipziger Str., Berlin	NO _x -SM	R ² =0,56
				PM ₁₀ -SM	R ² =0,70
Diegmann et al. [2009b]	CPB	CPB	Frankfurter Allee, Berlin	NO _x -JM	-3 %
	LASAT	Lagrange			+7 %
	MISKAM	CFD			+8 %

Tabelle 32: Bewertende Analysen zu Ausbreitungsmodellen (CFD: Computational Fluid Dynamics; CPB: Canyon Plume Box Modell) mit Angaben u.a. zur zeitlichen Auflösung der Modelle (SM: Stundenmittelwert; MM: Monatsmittelwert; JM: Jahresmittelwert) und zur Modellgüte (u. d. N.: unterhalb der Nachweisgrenze).

Empirisch-Statistische Modelle

Als empirisch-statistische Modelle werden solche Modelle verstanden, die sich nicht a priori auf physikalisch korrekte Wirkungszusammenhänge stützen, sondern stattdessen versuchen, lokal gültige Wirkungszusammenhänge aus gemessenen Immissionen und gemessenen Einflüsse auf die Immissionen abzuleiten. Die Regressionsanalyse ist ein weit verbreiteter Ansatz zur quantitativen multivariaten Zusammenhanganalyse. Entsprechend können auch sämtliche für diese Arbeit recherchierten empirisch-statistischen Modelle der Regressionsanalyse zugeordnet werden. Die recherchierten Ansätze können aus Sicht des Verfassers nach folgenden Merkmalen klassifiziert werden:

- Lineare und nicht-lineare Regressionsanalyse,
- Parametrische und nicht-parametrische Regressionsanalyse,
- Regressionsanalyse mit und ohne autoregressive Komponente,
- Neuronale Netze als Sonderfall einer verallgemeinerten nicht-linearen Regressionsanalyse.

Tabelle 33 zeigt eine Übersicht der recherchierten Untersuchungen, die den empirisch-statistischen Modellen zugeordnet werden können.

Quelle	Mathematischer Ansatz	Modellgebiet	Modellierter Schadstoff	Bestimmtheitsmaß
Shi, Harrison [1997]	linear parametrisch	Sechs Messstellen in London (England)	NO ₂ -SM	R ² =0,67
	linear parametrisch mit autoregressiver Komponente		NO _x -SM	R ² =0,92
Kukkonen et al. [2003]	neuronales Netz	Zwei Messstellen in Helsinki (Finnland)	PM ₁₀ -SM	R ² = 0,42
			NO ₂ -SM	R ² = 0,70
Aldrin, Haff [2005]	nicht-linear nicht-parametrisch ohne autoregressive Komponente	Vier Städte in Norwegen	PM ₁₀ -SM	R ² = 0,48 bis 0,72
			PM _{2,5} -SM	R ² = 0,55 bis 0,65
			PM _{10-2,5} -SM	R ² = 0,61 bis 0,76
			NO ₂ -SM	R ² = 0,59 bis 0,77
Anke et al. [2004]	MPCA & linear parametrisch	Eine Messstelle an der BAB A5	NO _x -SM	R ² = 0,64 bis 0,80
			PM _{10-0,5} SM	„unbefriedigend“
Corani [2005]	neuronales Netz	Mailand (Italien)	NO ₂ -0,5SM	„unbefriedigend“
Corani [2005]	neuronales Netz	Mailand (Italien)	PM ₁₀ -TM	R ² = 0,81
Cyril et al. [2005]	linear parametrisch	40 Messstellen in München	PM _{10-0,5} SM	„unbefriedigend“
			NO ₂ -JM PM _{2,5} -JM	R ² =0,62 R ² =0,56
Grivas, Chaloulakou [2006]	neuronales Netz	Vier Messstellen in Athen (Griechenland)	PM ₁₀ -SM	R ² = 0,49 bis 0,67
Bertaccini et al. [2009]	nicht-linear nicht-parametrisch ohne autoregressive Komponente	Sieben Messstellen in Turin (Italien)	PM ₁₀ -SM	PM ₁₀ -Modell wurde anhand BIC bewertet
			NO ₂ -SM	„R ² > 0,80“
			NO _x -SM	„R ² > 0,80“
Hrust et al. [2009/11//]	neuronales Netz	Zagreb (Kroatien)	PM ₁₀ -SM	R ² = 0,72
			NO ₂ -SM	R ² = 0,87
Liu [2009]	MPCA & linear parametrisch mit autoregressiver Komponente	Ta-Liao (Taiwan)	PM ₁₀ -TM	R ² =0,88
			PM ₁₀ -SM	R ² =0,70

Tabelle 33: Recherchierte statistisch-empirische Modelle (MCPA: Multiple Principal Component Analysis) mit Angaben u.a. zur zeitlichen Auflösung der Modelle (SM: Stundenmittelwert; TM Tagesmittelwert) und zur erreichten Modellierungsgüte (BIC: Bayessches Informationskriterium).

5.2.4 Verfahren zur Beurteilung der Qualität

Neben der reinen Darstellung der Immissionsbelastung sollen nach 39. BImSchV ergänzende Informationen bereit gestellt werden, beispielsweise zur Flächenausdehnung der Messungen sowie zur Bevölkerung, die potenziell einer Konzentration oberhalb des Grenzwertes ausgesetzt ist.

Andere Einrichtungen gehen bei der Luftgütebeurteilung einen Schritt weiter und führen die Messdaten mit Daten zur Betroffenheit zu einem Luftqualitätsindex zusammen:

Beispielsweise hat Baumüller [1995] einen Luftbelastungsindex entwickelt, um einen schnellen und einfachen Überblick über die Luftqualitätssituation zu ermöglichen, ohne die genaue Grenzwertsituation kennen zu müssen. Der Index berücksichtigt die jeweils vier höchsten Schadstoffkonzentrationen der fünf Luftschadstoffe Ozon, Kohlenmonoxid, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid und Feinstaub. Für jeden der berücksichtigten Schadstoffe wird das Verhältnis zwischen gemessener Schadstoffkonzentration und dem Grenzwert des Schadstoffes gebildet. Die Summe der Quotienten bildet den entsprechenden Langzeit- oder Kurzzeitbelastungsindex (je nach angesetzten Werten). Mittels einer fünfstufigen Bewertungsskala kann die Gesamt-Luftbelastung schließlich bewertet werden.

Akkan et al. [2004] entwickelten für die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfUBW) einen Bewertungsindex für Langzeitwirkungen, der eine noch differenziertere Bewertung ermöglicht. Zum einen können Kombinationswirkungen mehrerer Luftschadstoffe über eine Gewichtung berücksichtigt werden, zum anderen können saisonal gravierende (kurzzeitige) Gesundheitsbelastungen berücksichtigt werden, sofern sie häufiger auftreten. Da die Bewertung der jeweiligen Immissionskonzentrationen nicht primär auf Grundlage der zugehörigen Grenzwerte erfolgt sondern auf Grundlage der Dosis-/ Wirkungsbeziehung nach Langzeitexposition, ist die Aussagekraft in Bezug auf gesundheitliche Wirkungen hoch.

Für den Einsatz in einer umweltadaptiven Verkehrssteuerung erscheint die Bildung von Indizes zur Luftqualität sinnvoll, insbesondere wenn dabei die zeitlich und räumlich variierende betroffene Bevölkerung in bestimmten Teilen des Verkehrsnetzes berücksichtigt wird. Für die reine Datenauswertung und die Erklärung von Zusammenhängen zwischen verkehrlichen Kenngrößen und den Immissionen erscheint es zweckmäßig, auf die tatsächlichen (aufbereiteten) Messwerte zurückzugreifen (vgl. 5.2.5).

5.2.5 Allgemeine Empfehlungen zur Erfassung von Umweltkenngößen

Die Erfassung von Umweltkenngößen dient im Allgemeinen zur vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Überwachung der aktuellen Luftqualität. Im hier betrachteten Kontext wird sie vor dem Hintergrund der Ermittlung der umweltbezogenen Wirkungen oder des Wirkungspotenzials verkehrlicher Maßnahmen beschrieben.

Für die Abschätzung der Wirkungen und des Wirkungspotenzials verkehrlicher Maßnahmen ist die Kenntnis quantifizierter Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen Einflussgrößen und Immissionen erforderlich. Die erforderliche Genauigkeit der Quantifizierung und der erforderliche Umfang der Erhebung hängen ebenso wie die zu erhebenden Kenngrößen selbst erheblich vom verfolgten Zielkonzept des Aufgabenträgers ab. Die folgenden Abschnitte ordnen die verschiedenen Anforderungen an die Erfassung und an die Komplexität der erforderlichen Modellierungswerkzeuge differenziert nach möglichen Zielkonzepten grob ein.

Zielkonzepte zur Minimierung der negativen umweltbezogenen Wirkungen des Straßenverkehrs

Das Monitoring der umweltbezogenen Wirkungen einer Verkehrssteuerung bzw. einer LSA-Steuerung hängt wesentlich vom Zielkonzept ab, das der Aufgabenträger in diesem Zusammenhang verfolgt. Drei wesentliche umweltbezogene Zielkonzepte sind denkbar:

Zielkonzept 1: (Pauschale) Minimierung verkehrsbedingter Emissionen entlang wichtiger Streckenzüge oder im gesamten Netz: Auch wenn in einem Ballungsraum kein unmittelbarer Handlungsbedarf hinsichtlich der Einhaltung der rechtlich vorgegebenen Immissionsgrenzwerte besteht, so kann dennoch davon ausgegangen werden, dass die Minimierung negativer Umweltwirkungen des Straßenverkehrs ein vom Aufgabenträger verfolgtes Oberziel darstellt.

Zielkonzept 2: Einhaltung der Immissionsgrenzwerte an definierten Umwelt-HotSpots: Sofern im Rahmen der vorgeschriebenen Überwachung der Luftqualität bestimmte Flächen oder Streckenabschnitte hinsichtlich ihrer Immissionsbelastungen als kritisch identifiziert werden, sind diese durch Messungen und/oder Modellrechnungen zu überwachen und Maßnahmen zur Einhaltung der Immissionsgrenzwerte an diesen HotSpots zu ergreifen (vgl. 0).

Zielkonzept 3: Differenzierte Minimierung der negativen gesundheitlichen Wirkungen des Straßenverkehrs im gesamten Netz: Eine umfassende umweltabhängige Verkehrssteuerung kann Immissionen an den Orten mit der höchsten Betroffenheit ⁶gezielt (räumlich und zeitlich differenziert) minimieren. Zum einen ist in diesem Zielkonzept eine immissionsbezogene und netzweite Wirkungsermittlung erforderlich, zum anderen ist eine Systematik zur differenzierten Priorisierung der betroffenen Streckenabschnitte zu entwickeln.

Zu berücksichtigen ist, dass der Beitrag einzelner Maßnahmenbereiche zur Zielerreichung je nach Zielkonzept unterschiedlich sein kann: Während einzelne Maßnahmenbereiche, z. B. Weiterentwicklungen im Bereich Fahrzeugtechnik, grundsätzlich für alle Zielkonzepte förderlich sind, können Maßnahmen der Verkehrssteuerung, z. B. eine verbesserte Koordinierung am Umwelt-HotSpot im Rahmen des Zielkonzepts 2, zu erhöhten Immissionen in anderen Netzbereichen und damit zu einer niedrigen Zielerreichung in den Zielkonzepten 1 und 3 führen.

⁶ Unter Betroffenheit wird eine Kenngröße verstanden, die sich aus der Verschneidung der Immissionsbelastung einer Fläche oder in einem Streckenzug und der Anzahl der Personen in diesem Bereich ergibt.

In ein umfassendes Zielkonzept sind grundsätzlich auch Ziele des *Lärmschutzes* und *Klimaschutzes*, aber auch Ziele in Bezug auf die *Erreichbarkeit*, die *Verkehrsqualität im Netz* und die *Wirtschaftlichkeit* oder *Angemessenheit* zu integrieren. Im Rahmen einer differenzierten Betrachtung wie im Zielkonzept 3 ist eine übergeordnete Zielfunktion zu entwickeln, deren Zielgrößen situationsabhängig und räumlich-zeitlich differenziert gewichtet werden. So ist beispielsweise bei Wetterlagen mit hohem Überschreitungsrisiko der Luftqualitätsgrenzwerte eine höhere Gewichtung der Verkehrsqualität an den Umwelt-HotSpots im Netz sinnvoll. Für die Maßnahmenebene der Verkehrssteuerung bedeutet dies, dass die Gewichte der Optimierungsparameter in der Zielfunktion einer (zukünftigen) modellbasierten LSA-Steuerung in Abhängigkeit der übergeordneten Zielfunktion angepasst werden.

Ein Anforderungsniveau für die Zielerreichung kann zum Einen den rechtlichen Vorgaben konkrete Angaben in Form von Grenz- und Zielwerten entnommen werden. Zum anderen können aber auch in diesen Grenz- und Zielwerten bislang nicht berücksichtigte Aspekte zur Definition von Anforderungsniveaus der Zielerreichung herangezogen werden: Zur Minimierung schädlicher gesundheitlicher Wirkungen des Straßenverkehrs sind aber durchaus darüber hinaus gehende Anforderungsniveaus sinnvoll, mit denen beispielsweise der lineare Dosis-Wirkungszusammenhang zwischen der Partikelbelastung und ihren schädigenden Wirkungen berücksichtigt wird. Diese erweiterten Anforderungsniveaus können aber an dieser Stelle nicht pauschal festgelegt werden, sondern sind in den jeweiligen Untersuchungsräumen unter Berücksichtigung der vorhandenen politischen Zielsetzung und Handlungsspielräume zu definieren.

Erfassung von Kenngrößen unter Berücksichtigung des umweltbezogenen Zielkonzepts des Aufgabenträgers

Je nachdem, welches der genannten Zielkonzepte im Kontext der Minimierung der Umweltwirkungen des Straßenverkehrs verfolgt wird, ergeben sich Unterschiede für die Erfassung verkehrlicher und umfeldbezogener Kenngrößen (vgl. Tabelle 34).

Die wesentlichen verkehrlichen Einflussgrößen auf Emissionen und Immissionen sollten in jedem Fall möglichst umfassend erhoben werden. Neben der Verkehrsstärke sollten auch und vor allem die Verkehrszusammensetzung und nach Möglichkeit auch die Kenngrößen zur Qualität des Verkehrsablaufs erhoben werden. Hinweise zur Detektion dieser Kenngrößen können Kapitel 5.1 entnommen werden. Bzgl. der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Erfassung bestehen keine über die Anforderungen einer modellbasierten Steuerung an die Detektion von Verkehrskenngrößen hinausgehenden Anforderungen.

Die Unterschiede zwischen den Zielkonzepten in Bezug auf die Kenngrößenerfassung ergeben sich primär für die weiteren Kenngrößengruppen: So sind für eine Wirkungsermittlung im Rahmen der Zielkonzepte 2 und 3 zusätzlich immissionsbezogene und meteorologische Kenngrößen zu erheben. Für das Zielkonzept 3 sind ferner Daten zur aktuellen Nutzung des Umfelds und zur Anzahl und Verteilung betroffener Personen zu erheben.

Sofern in einem Ballungsraum kritische Orte mit erhöhtem Grenzwertüberschreitungsrisiko identifiziert wurden, sind diese nach 39. BImSchV kontinuierlich messtechnisch zu überwachen. Wenn die Anzahl der kritischen Orte oder HotSpots in einem Untersuchungsraum die nach 39. BImSchV geforderte Anzahl an Immissionsmessstellen überschreitet, ist die Überwachung der weiteren HotSpots auch mittels Immissionsmodellen möglich. Dabei ist ein möglichst präziser Modellansatz zu wählen. Die in Abschnitt 5.2.3 dargestellten mikroskaligen Immissionsmodelle mit physikalischem Ausbreitungsmodell oder ein statistisch-empirischer Ansatz erscheinen hierfür geeignet. Für eine rein lokale Modellierung hat ein statistisch-empirischer Ansatz den Vorteil, dass der Aufwand für die Modellierung der vorhandenen Bebauung entfällt. Neben der Messung oder präzisen Modellierung der Immissionen am Umwelt-HotSpot, ist zumindest für das Zielkonzept 3 eine netzbezogene Erfassung von Immissionskenngroßen erforderlich. Diese Erfassung sollte aus Aufwandsgründen weitestgehend modellbasiert durchgeführt werden. Die messtechnisch erfassten bzw. mikroskalig modellierten Immissionen an den HotSpots können als Stützpunkte für die Abschätzung der Immissionen im weiteren Netz dienen. Zur Berücksichtigung der Wirkungen kurzzeitiger zufälliger oder nicht zufälliger Schwankungen verkehrlicher Kenngroßen auf die Immissionen wird zu einer Erfassung der Immissionskenngroßen mit einer Auflösung höher als 1 Stunde geraten. Die Gegenüberstellung zu den rechtlich vorgeschriebenen Grenzwerten kann und sollte in Form entsprechend aggregierter Werte erfolgen.

Zielkonzept Kenngroßengruppe	1. Pauschale Minimierung der verkehrlichen Emissionen	2. Einhaltung der Immissionsgrenzwerte an definierten Umwelt- HotSpots	3. Differenzierte Minimierung negativer gesundheitlicher Wirkungen im gesamten Netz
Verkehr Verkehrsstärke SV-Anteil Qualität des Verkehrsablaufs	Messung Messung Messung oder Modellierung	Messung Messung Messung oder Modellierung	Messung Messung Messung oder Modellierung
Meteorologische Kenngroßen Regional Lokal	- -	Messung Messung	Messung Messung
Immissionen Regional HotSpot Netz	- - -	Messung Messung	Messung Messung Modellierung ⁷
Sonstige Nutzung des Umfelds Anzahl und Verteilung betroffener Personen	- -	- -	Modellierung Modellierung

Tabelle 34: Zu erfassende Kenngroßen in Abhängigkeit vom verfolgten Zielkonzept.

⁷ Ggf. auch Messung an wichtigen Stützstellen, sofern sich im Untersuchungsraum keine Messstelle des Landesmessnetzes befindet.

Meteorologische (und hierbei insbesondere windbezogene) Kenngrößen sollten unabhängig der Verwendung von Immissionsmesstechnik oder eines Immissionsmodells an den HotSpots in jedem Fall gemessen werden. Zur Berücksichtigung der aktuellen Betroffenheit im Untersuchungsgebiet sind Kenntnisse über die Umfeldnutzung und die betroffenen Personen sowie über die räumliche und zeitliche Varianz dieser Kenngrößen erforderlich. Zur Ermittlung und Modellierung dieser Kenngrößen besteht grundsätzlich Forschungsbedarf.

Weitere Anforderungen an die Erfassung

Im Rahmen einer umweltabhängigen Verkehrssteuerung ist eine kontinuierliche Erfassung der Kenngrößen erforderlich. Für eine turnusmäßige Wirkungsermittlung im Rahmen eines Qualitätsmanagements sind auch nur stichprobenartige Erhebungen der immissionsbezogenen und meteorologischen Kenngrößen möglich. Eine Bestimmung der Stichprobengröße anhand rein statistischer Gesichtspunkte wie sie in 5.1.11 für die verkehrlichen Kenngrößen empfohlen wird, ist im Falle der immissionsbezogenen Kenngrößen nicht immer zweckmäßig: Aufgrund der starken saisonalen Abhängigkeiten der Einflussgrößen wird grundsätzlich zu einer Erfassung im Sommer- *und* Winterhalbjahr geraten. Die Messzeiträume und die darauf basierenden Modellannahmen sollten nach Möglichkeit die volle Bandbreite der Einflussgrößen berücksichtigen (Niederschlag/kein Niederschlag; hohe Windgeschwindigkeiten/Windstille etc.). Erst im zweiten Schritt sollte die Stichprobengröße statistisch abgesichert werden. Hinweise zur erforderlichen Stichprobengröße für multiple regressionsanalytische Ansätze, zu denen die statistisch-empirischen Ansätze gezählt werden können, geben Schubö, Haagen, Oberhofer [1983].

Für die turnusmäßige Erhebung von umweltbezogenen Kenngrößen im Rahmen eines Qualitätsmanagements sollten die Anforderungen aus den RiLSA [FGSV 2010] beachtet werden. Diese sehen für die Überprüfung der Qualität des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten einen Turnus von ein- bis zwei Jahren bzw. teils auch größere zeitliche Abstände vor. Zur regelmäßigen Überprüfung der umweltbezogenen Wirkungen wird ein zweijähriger Turnus als sinnvoll erachtet.

Unabhängig von der Entscheidung, ob die Kenngrößenerfassung kontinuierlich im Rahmen einer umweltabhängigen Verkehrssteuerung oder ob sie im Turnus im Rahmen eines Qualitätsmanagements stattfindet, sollten bei der Implementierung folgende Hinweise berücksichtigt werden (vgl. BMVBS [2006]):

- Es ist zu klären, welche Kenngrößen bereits in welcher Qualität erhoben werden. Neben den für die Erfassung verkehrlicher Kenngrößen einzubindenden Einrichtungen wie dem Betreiber der LSA, die Straßenverkehrsbehörde sollten in diesem Zusammenhang die Landesumweltämter als Betreiber der Immissionsmessnetze und die städtischen Umweltämter eingebunden werden.
- Die zu verwendenden Datenformate für den Datenaustausch und die Art der Datenübertragung, die nach Möglichkeit in Echtzeit stattfinden sollte, sind abzustimmen.

- Regelungen zur Datenüberlassung, d. h. zur erforderlichen Datenaufbereitung, zu Art und Umfang der Daten, zur weiteren Verwendung der Daten sowie zur Kostenzuordnung, sind zu treffen.
- Sofern zusätzlich zu den von den Landesämtern betriebenen Immissionsmessstellen weitere Messstellen eingerichtet werden, sind die erforderlichen Qualitätsstandards hinsichtlich Genauigkeit, Reproduzierbarkeit, Vollständigkeit und Aktualität festzulegen. Hinweise zur erforderlichen Qualität und zu den Referenzmessverfahren können der 39. BImSchV entnommen werden. Inwieweit für zusätzliche Messstellen, die primär für die Verkehrssteuerung oder für stichprobenartige Wirkungsuntersuchungen vorgesehen sind, die gleichen Qualitätsstandards anzusetzen sind wie bei den Landesmessstellen, oder ob aus Aufwandsgründen auch niedrigere Qualitätsstandards denkbar sind, kann an dieser Stelle nicht abschließend beurteilt werden.

5.2.6 Methodische Vorgehensweise bei der Analyse der umweltbezogenen Kenngrößen in den AMONES-Testfeldern Bremerhaven und Hamburg

5.2.6.1 Grundlegender Methodischer Ansatz

Forschungsfragen

Mit den Messungen und Modellierungen sollen im Wesentlichen die folgenden Forschungsfragen beantwortet werden:

- Können in einer kleinräumigen Betrachtung Zusammenhänge zwischen gemessenen Verkehrs- und Luftschadstoffkenngrößen nachgewiesen werden?
- Was sind die wesentlichen Einflussgrößen auf die Luftschadstoffkenngrößen?
- Welches Reduktionspotenzial besitzt eine Verkehrssteuerung am kritischen Ort bzw. am Messquerschnitt im Hinblick auf die Immissionskonzentration?
- Welches Reduktionspotenzial besitzt eine LSA- bzw. adaptive Netzsteuerung am kritischen Ort bzw. am Messquerschnitt (mit / ohne Umweltoptimierung) im Hinblick auf die Immissionskonzentration?
- Welches Reduktionspotenzial besitzt eine adaptive Netzsteuerung bezogen auf das gesamte Netz (mit / ohne Umweltoptimierung) im Hinblick auf den Ausstoß von Emissionen⁸?

Vorgehensweise

In AMONES werden zwei Ansätze verfolgt, um die umweltbezogenen Wirkungen der LSA Steuerung zu ermitteln (siehe auch Abbildung 74):

⁸ Im Rahmen von AMONES ist es nicht vorgesehen, eine flächendeckende Immissionsmodellierung anzuwenden oder zu entwickeln. Darüber hinaus steht seitens der Städte als Betreiber/Besitzer einer Netzsteuerung üblicherweise die punktuelle Minimierung der Immissionsbelastung an den kritischen Orten im Vordergrund. Die netzweiten umweltbezogenen Wirkungen werden in AMONES daher auf Grundlage von Emissionen beurteilt.

1. Ermittlung der *immissionsbezogenen Wirkungen an einem Umwelt-HotSpot*: Hierzu werden straßenseitige Immissionen, ebenso wie meteorologische und verkehrliche Kenngrößen zeitlich hoch aufgelöst (Messintervalle < 1 Minute) erfasst, um auch die Wirkungen kurzzeitiger Störungen im Verkehrsfluss bewerten zu können. Die maßgebenden Einflussgrößen auf die lokale Immissionsbelastung werden identifiziert und quantifiziert. Sofern der Einfluss einer erfassten Verkehrsflusskenngröße (z. B. Anfahrvorgänge) in den gemessenen Immissionen erkennbar ist, werden immissionsbezogene Wirkungspotenziale der verbesserten Koordinierung durch die modellbasierte Steuerung abgeleitet.
2. Ermittlung der *emissionsbezogenen Wirkungen im gesamten Netz*: Hierzu werden die mit Emissionskennfeldern gekoppelten mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen hinsichtlich der motorbedingten Emissionen ausgewertet.

Die lokalen Immissionen am HotSpot werden differenziert nach folgenden Wirkungszusammenhängen untersucht:

- Wirkungszusammenhänge, die sich *aus Änderungen im Tagesgang einzelner Verkehrskenngrößen ergeben*. Hier werden vor allem tageszeit- und wochentagbedingte Schwankungen der Verkehrsnachfrage und der Qualität des Verkehrsablaufs untersucht. Dabei muss aber einschränkend festgehalten werden, dass mit nur 10 Messtagen je Testfeld kein allgemein gültiges Modell für den Tagesgang der Immissionsbelastung entwickelt werden kann.
- Wirkungszusammenhänge, die *kurzzeitige Schwankungen von Verkehrskenngrößen im einzelnen Umlauf* (unabhängig vom Tagesgang) betreffen. Der praktische Nutzen der Kenntnis solcher kurzzeitiger oder hochfrequenter Wirkungszusammenhänge kann in Maßnahmen wie beispielsweise einer gezielten Grünzeitverlängerung für Fahrzeugpuls zur Vermeidung von einzelnen Immissionsspitzenbelastungen resultieren. Zur Untersuchung der kurzfristig erkennbaren Wirkungen werden die gemessenen Zeitreihen um den Tagestrend bereinigt und mit einer zeitlichen Auflösung von 5 bis 10 Minuten (je nach Umlaufzeit der LSA) untersucht.

Im Folgenden werden die Wirkungszusammenhänge, die sich auf die Änderungen im Tagesgang einzelner Verkehrskenngrößen beziehen, als *niederfrequenter Ansatz* bezeichnet.

Wirkungszusammenhänge die sich auf die kurzzeitigen Schwankungen von Verkehrskenngrößen beziehen, werden als *hochfrequenter Ansatz* bezeichnet.

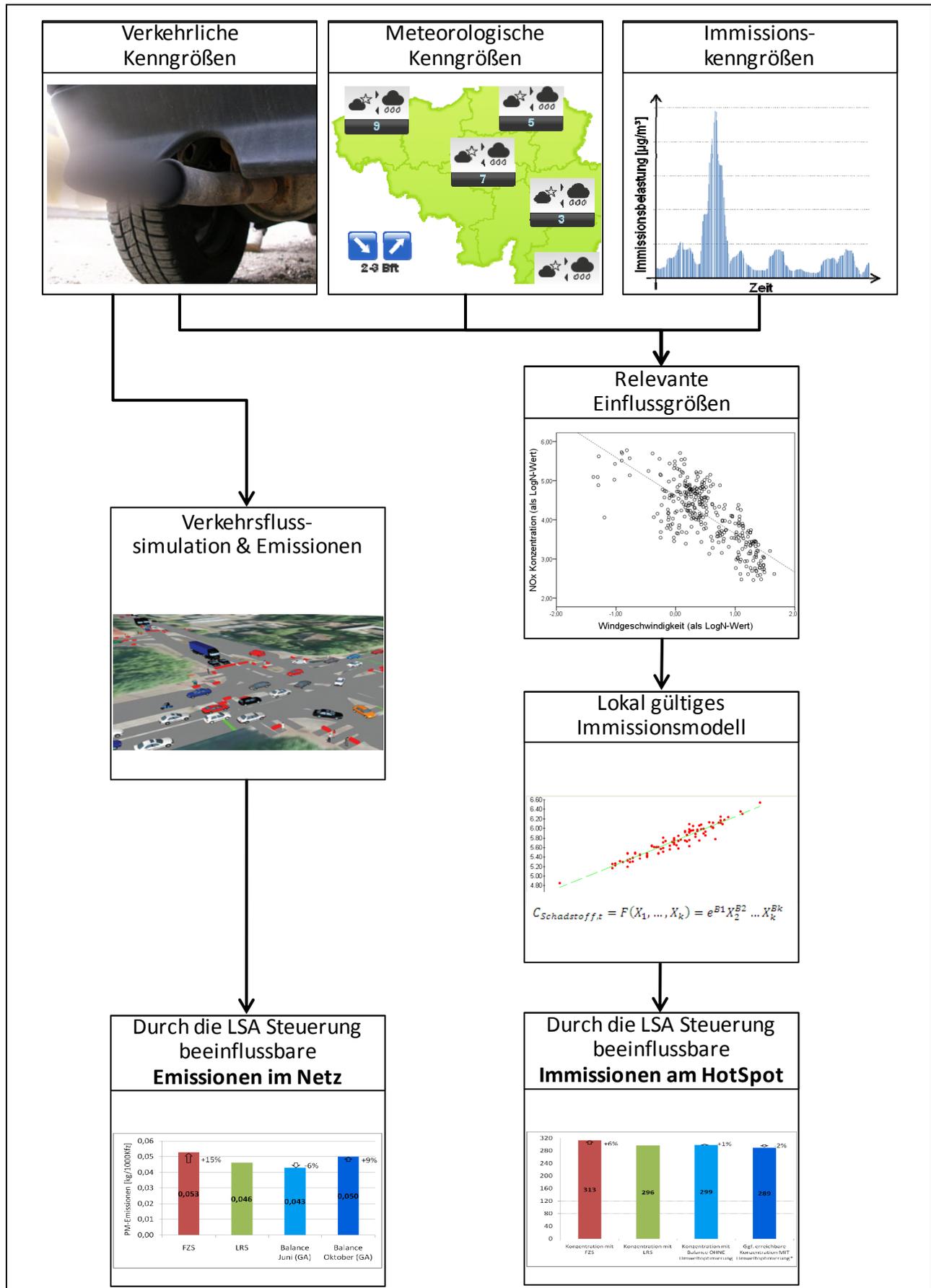


Abbildung 74: Workflow für die Verarbeitung der Umweltkenngrößen.

5.2.6.2 Datenerhebung und Datenaufbereitung

Voruntersuchung für die Datenerhebung

Neben der Identifikation geeigneter Knotenpunkte, Knotenpunktzufahrten und Aufstellbereiche für die Messtechnik, wird in einer Voruntersuchung der „Einflussbereich“ einzelner Verkehrsvorgänge ermittelt. Als Einflussbereich wird dabei der Fahrbahnabschnitt verstanden, in dem kurzfristig messbare Einflüsse einzelner Verkehrsvorgänge auf die Immissionsmesswerte am Messquerschnitt zu erwarten sind. An den Grenzen des Einflussbereiches wird demnach zwischen Anfahrvorgängen und Durchfahrvorgängen unterschieden (Abbildung 75).

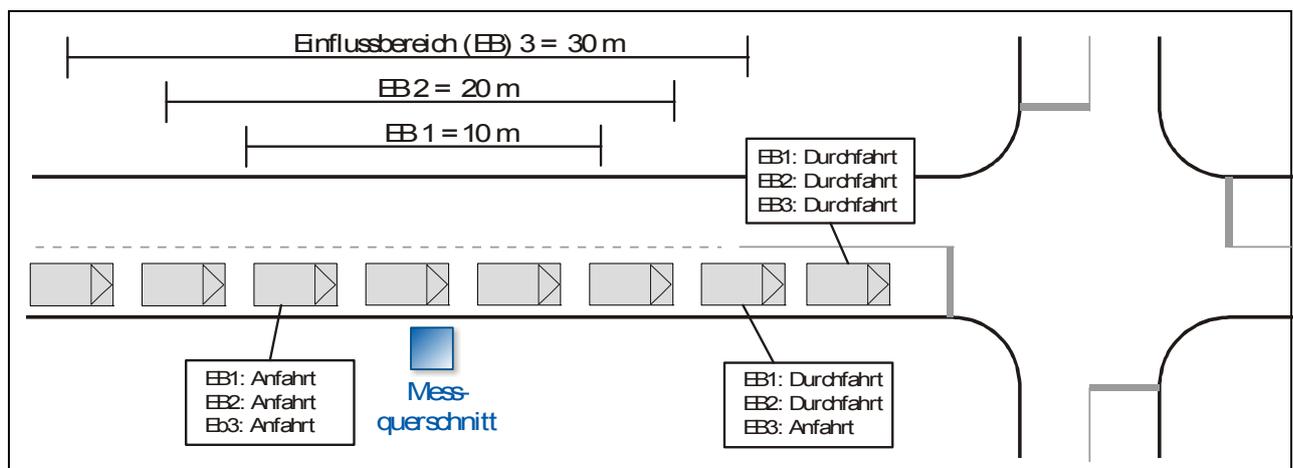


Abbildung 75: Differenzierung zwischen Anfahrvorgängen und Durchfahrvorgängen in Abhängigkeit festgelegter Einflussbereiche.

Die Länge des Einflussbereichs wurde im Rahmen einer Voruntersuchung wie folgt ermittelt:

1. Messung der NO_x -Konzentration in der Knotenpunktzufahrt Bleichstraße Ecke Steubenplatz (Darmstadt) in einem Abstand von 40 m von der Haltlinie. Parallel wurde der Verkehrsablauf im Zufahrtsbereich auf Video aufgezeichnet. Die Messung dauerte etwa 1,5 Stunden.
2. Erhebung der Anfahrvorgänge für unterschiedliche Einflussbereiche von 20 m, 30 m und 40 m Länge anhand der Videoaufzeichnung.
3. Aggregation der erhobenen Daten zu 90 s Mittelwerten – dies entspricht der Dauer der Umlaufzeit am Knotenpunkt.
4. Ermittlung des Korrelationskoeffizienten zwischen der NO_x -Konzentration und den erhobenen Anfahrvorgängen als Kenngröße für den Zusammenhang zwischen Qualität des Verkehrsablaufs und verkehrlichen Emissionen.
5. Auswahl des Einflussbereichs mit der höchsten Korrelation zwischen NO_x -Konzentration und der Anzahl der Anfahrvorgänge als Vorgabe für die weiteren Feldmessungen.

Die Ergebnisse der Voruntersuchung sind in Tabelle 35 dargestellt.

Immissions- kenngöße	Korrelationskoeffizient R und Irrtumswahrscheinlichkeit p für Einflussbereiche (EB)		
	Anfahrvorgänge im EB = 20 m	Anfahrvorgänge im EB = 30 m	Anfahrvorgänge im EB = 40 m
NO _x - Konzentration	R=-0,04 p=0,86	R=0,36 p=0,08	R=-0,07 p=0,74

Tabelle 35: Bestimmung der Länge des Einflussbereichs anhand der Korrelation zwischen gemessenen Immissionen und Anfahrvorgängen.

Der Einflussbereich mit einer Länge von 30 m zeigt als einziger Einflussbereich eine signifikant⁹ positive Korrelation mit den erfassten Anfahrvorgängen an und wird für die weiteren Messungen ausgewählt.

Erhobene Kenngößen

Tabelle 36 zeigt die erhobenen Kenngößen, die eingesetzten Messverfahren, die zugehörigen Messgrößen sowie die zeitliche Auflösung der Erfassung. Sofern in den Testfeldern weitere Kenngößen, zum Beispiel aus lokalen Detektoren und Messstationen, für die Auswertungen eingesetzt werden, sind diese in den entsprechenden testfeldbezogenen aufgeführt.

Ein Großteil der erfassten Kenngößen lässt sich direkt den Einflussgrößen zuordnen, die im Unterkapitel 5.2.1.4 beschreiben wurden. Einzelne Einflussgrößen wurden allerdings aus technischen oder aus Aufwandsgründen nicht oder nicht umfänglich erfasst werden:

- Die Einflussgrößen Kraftstoffart und Schadstoffklasse konnten aufgrund fehlender automatisierter Erfassungstechnologie nicht erfasst werden.
- Die Rückstaulänge im Messbereich wurde nicht gesondert erfasst, da sie von der erfassten Anzahl der Halte abgeleitet werden kann.
- Die manuelle Erfassung der Wartezeiten der Einzelfahrzeuge wurde als nicht praktikabel angesehen.
- Lokale Geschwindigkeiten von Einzelfahrzeugen wurden auf Grund ihrer nur eingeschränkten Relevanz in Bezug auf die untersuchte Fragestellung nicht erhoben (vgl. 5.2.1.4).

Ferner konnte die Partikelkonzentration aus technischen Gründen nur als Anzahlkonzentration *oder* als Massenkonzentration erfasst werden. Da im Projekt AMONES Aussagen in Bezug auf die gesetzlichen Grenzwerte getroffen werden sollen, wurde die Massenkonzentration von PM₁₀ und PM_{2,5} als Untersuchungsgröße ausgewählt.

⁹ Aufgrund der kleinen Stichprobe wird ein Signifikanzniveau von 0,9 bzw. eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1 als ausreichend angesehen.

Erfasste Kenngröße	Messverfahren	Einheit	Zeitliche Auflösung
NO _x / NO / NO ₂ (lokal)	Chemolumineszenz	[ppm]	5 s
NO _x / NO / NO ₂ (regional)	variiert	[µg/m ³]	variiert
PM ₁₀ / PM _{2,5} (lokal)	Streulichtprinzip	[µg/m ³]	6 s
PM ₁₀ / PM _{2,5} (regional)	variiert	[µg/m ³]	variiert
Windrichtung (lokal)	Lokale Wettersensoren	[°]	6 s
Windgeschwindigkeit		[m/s]	6 s
Temperatur		[°C]	6 s
Relative Luftfeuchte		[%]	6 s
Luftdruck		[hPa]	6 s
Niederschlag		[Niederschlag / kein Niederschlag]	variiert
Mischungsschichthöhe		Regionale Wettersensoren	[m]
Verkehrsstärke	Beobachtung	[Fz/Zeit]	5 s
Anzahl der Anfahrvorgänge bzw. Halte im Umweltmessbereich		[Anfahrvorgang; Durchfahrvorgang]	5 s
Fahrzeugart		[Motorrad (Mot); Pkw; Leichtes Nutzfahrzeug (LNF); Schweres Nutzfahrzeug 2 Achsen (SNF2); Schweres Nutzfahrzeug mit 3 oder mehr Achsen (SNF3); Bus]	5 s
Fahrstreifen (der erfassten Fahrsituation)		[naher FS, entfernter FS]	5 s
Sonstige		Schriftlicher Vermerk mit Zeitstempel	5 s

Tabelle 36: Gemessene Kenngrößen im Rahmen der umweltbezogenen Untersuchung im Forschungsprojekt AMONES.

Datenfusion

Die Zeitreihen aus den verschiedenen Quellen (NO_x-Messung, PM_x-Messung, Messung meteorologischer sowie verkehrlicher Kenngrößen) werden per Excel-Makro in eine Datentabelle zusammengeführt. Der zeitliche Abstand zweier Datenpunkte in der zusammengeführten Datentabelle beträgt 5 Sekunden, was der zeitlichen Auflösung der Stickoxid-Messtechnik entspricht. Für die Zeitreihen der Partikelkonzentration und die Zeitreihen der meteorologischen Kenngrößen, die mit einer zeitlichen Auflösung von sechs Sekunden erfasst werden, führt dies zu einem Synchronisierungsfehler bis maximal drei Sekunden in Abhängigkeit des Messzeitpunkts. Da auch die Zeitreihen der Stickoxidkonzentration den meteorologischen Zeitreihen gegenüber gestellt werden sollen, ist diese Ungenauigkeit nicht vermeidbar. Die Auflösung von fünf Sekunden wird der sechs-Sekunden-Auflösung vorgezogen, da sämtliche Umlaufzeiten im Untersuchungsgebiet durch fünf teilbar sind. Die bei der Synchronisierung entstehende Lücke in den Zeitreihen der Partikelkonzentration, die bei jedem sechsten Wert auftritt, wird durch lineare Interpolation zwischen den benachbarten Messwerten geschlossen.

Der zusammengeführten Datentabelle werden weitere Felder wie die jeweils geschaltete Umlaufzeit und das aktivierte Steuerungsverfahren hinzugefügt, um die spätere Auswertung und Gruppierung der Daten nach verschiedenen Kriterien zu erleichtern.

Qualitätssicherung

Jede erhobene Zeitreihe wird zunächst auf *Lücken* geprüft. Lücken in den Daten treten durch Fehler in der Erfassungssoftware der einzelnen Kenngößen, durch witterungsbedingten Abbruch der Messungen, durch Bedienfehler des Personals und durch geplante Unterbrechungen zur Datensicherung auf. Die Lücken in den Immissionszeitreihen und in den meteorologischen Zeitreihen werden mittels linearer Interpolation geschlossen, sofern sie nicht länger als eine Minute sind. Größere Lücken in den Zeitreihen werden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Lücken in den Zeitreihen der verkehrlichen Kenngößen werden mittels Interpolation geschlossen, sofern sie nicht länger als drei Umläufe andauern. Größere Lücken werden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Die erhobenen Daten werden auf *systematische Fehler* geprüft. Stellenweise werden aus der Horiba-Stickoxiderfassungssoftware Messwerte exportiert, die um den Faktor 1.000 zu groß sind. Diese Messwerte werden identifiziert und korrigiert. Bei Ein- und Ausschaltung der Lufttrocknung in den Partikelmessgeräten treten Sprünge in den Messwerten um bis zu 30% der gemessenen Werte auf. Die Korrektur wird über einen Vergleich von Subintervallmittelwerten und zur Ermittlung und Anwendung von Korrekturfaktoren durchgeführt.

Weiterhin werden *Plausibilitätsprüfungen* durch einen Vergleich mit parallel erfassenden Messgeräten (sofern möglich) und mit stationären Messgeräten und Detektoren (sofern vorhanden) durchgeführt. Die Mittelwerte der stationären Immissionsmessungen werden den Mittelwerten der lokalen Immissionsmessungen gegenübergestellt und zur Bildung von übergreifenden Korrekturfaktoren für jeden Messzeitraum verwendet.

Für die Immissionszeitreihen wird eine *Ausreißeridentifikation* nach dem 4-Sigma-Kriterium durchgeführt. Der 4-Sigma Bereich umfasst bei symmetrischen eingipfligen Verteilungen 97 % und bei beliebigen Verteilungen 94 % der Daten [SACHS 2002]. Die identifizierten Ausreißer in den Messwerten werden im Einzelfall betrachtet. Eine Anpassung durch lineare Interpolation zwischen den benachbarten Werten wird nur in Ausnahmefällen vorgenommen, beispielsweise wenn das parallel erfassende Messgerät plausible Messwerte liefert.

Ableiten weiterer Kenngößen aus den erhobenen Kenngößen

Aus den erhobenen Kenngößen müssen teilweise weitere Kenngößen abgeleitet werden,

- um in der weiteren Datenanalyse besser interpretierbare Kenngößen zu verwenden, beispielsweise die Massenkonzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) anstelle der relativen Konzentrationsangabe parts per billion (ppb),
- um Datenreihen zu sinnfälligen Gruppen zu aggregieren, beispielsweise in die Gruppen Schwerverkehr und sonstiger Verkehr,

- um weitere, für die Bearbeitung der Aufgabenstellung erforderliche Datenreihen zu bilden, beispielsweise die Fraktion der groben Partikel $PM_{10-2,5}$,
- um Datenreihen an die Anforderungen des eingesetzten lokalen Immissionsmodells anzupassen, beispielsweise durch Log-Transformation sämtlicher Prädiktorvariablen und
- um Datenreihen an die statistischen Anforderungen eingesetzter mathematischer Verfahren anzupassen, beispielsweise durch Log-Transformation der Immissionskenngrößen zur Vermeidung von Heteroskedastizität.

Zeitliche Aggregation der Kenngrößen

Die hohe zeitliche Auflösung der Messtechnik ermöglicht Untersuchungen zu den Einflüssen von Einzelfahrzeugen oder von Fahrzeugpulks auf straßenseitige Immissionen. Für die praktische Auswertung ergeben sich jedoch einige Nachteile: Neben einer großen Datenmenge und langen Rechenzeiten weisen die Daten einen hohen Rauschanteil und eine hohe Autokorrelation auf. Auf die 5-sekündlich aufgelösten Datenreihen werden folglich nur ausgewählte Verfahren der Zeitreihenanalyse angewendet. Die weiteren Untersuchungen werden mit zeitlich aggregierten Datenreihen durchgeführt.

Für die Untersuchung der niederfrequenten Immissionen erscheint eine Aggregation auf Stundenmittelwerte zweckmäßig. Hiermit wird eine Vergleichsbasis zu den in Unterkapitel 5.2.3 recherchierten Ansätzen geschaffen. Aufgrund der organisatorischen Vorgaben in Bezug auf die Dauer und den Zeitraum der Feldmessungen im Projekt AMONES (je Testfeld 10 Werktage à 12 Messstunden) ergibt sich allerdings ein wesentlicher Nachteil für die Untersuchung der niederfrequenten Immissionskomponente mittels Stundenmittelwerten: Der entwickelte Modellansatz wird nur für die erfassten Zeiträume, das heißt für die werktägliche Tageszeit zur jeweiligen Jahreszeit, gültig sein.

Für die Untersuchung der hochfrequenten Immissionskomponente erscheint die Wahl einer „pauschalen“ Aggregationsebene von 5 oder 10 Minuten nicht sinnvoll, da die aggregierten Datensätze dann unterschiedliche Anteile der Signalprogrammelemente enthalten. Stattdessen sollte auf die jeweils geschaltete Umlaufzeit der LSA oder auf das kleinste gemeinsame Vielfache (KGV) der geschalteten Umlaufzeiten aggregiert werden. Aufgrund der unterschiedlich langen Umlaufzeiten verletzt die erstgenannte Aggregation jedoch eine wesentliche Anforderung an Zeitreihenanalysen, nämlich die Untersuchung von Datensätzen mit äquidistanten Zeitabständen.

Die Analyse der hochfrequenten Immissionskomponente wird daher auf Grundlage der zweiten Aggregationsebene, dem KGV der geschalteten Umlaufzeiten, durchgeführt. Die Stabilität der Ergebnisse wird in weiteren exemplarischen Untersuchungen für die Aggregation auf die jeweils geschalteten Umlaufzeiten geprüft.

Sämtliche Datenreihen mit metrischer Skalierung werden unter Verwendung des arithmetischen Mittels zu den genannten Intervallen aggregiert.

Isolation der hochfrequenten Komponente der Zeitreihen (Trendbereinigung)

Die frequenzdifferenzierte Untersuchung der zeitlichen Variationen in den erhobenen Zeitreihen erfordert eine Zeitreihen-Filterung. Nach Schönwiese [1983b] lassen sich drei Möglichkeiten der Zeitreihen-Filterung unterscheiden:

- Tiefpassfilterung in Form der Unterdrückung hoher Frequenzen, um niedrigere Frequenzen in Form langfristiger Trends hervorzuheben,
- Hochpassfilterung in Form der Unterdrückung niedrigerer Frequenzen, um kurzfristige Schwankungen hervorzuheben und
- Bandpassfilterung in Form der Hervorhebung eines beidseitig begrenzten Frequenzintervalls.

Zur Extraktion der hochfrequenten Zeitreihenkomponente kommt die Hochpassfilterung zur Anwendung. Hierfür ist eine Tiefpassfilterfunktion $R(f)_{TP}$ zu definieren und die damit errechneten Filterwerte $a_j(TP)$ von den Messwerten a_i zu subtrahieren. Die Hochpassfilterfunktion $R(f)_{HP}$ ist damit das Gegenstück zur entsprechenden Tiefpassfilterung.

$$a_i(HP) = a_i - a_j(TP)$$

$$R(f)_{HP} = 1 - R(f)_{TP}$$

Die Tiefpassfilterwerte ermitteln sich nach

$$\bar{a}_j = \sum_{k=-m}^{+m} w_k \cdot a_{i+k} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, n \\ \text{mit } k = -m, -m+1, \dots, 0, 1, \dots, m \\ j = 1, 2, \dots, n-2m \end{array}$$

Der Index k formuliert ein Zentralgewicht, um Phasenverschiebungen zu vermeiden.

Die Auswahl der Filtertechnik und vor allem der Filterfrequenz, aus denen schließlich die zu untersuchende hochfrequente Zeitreihe hervorgeht, spielen eine wichtige Rolle: Während mit der Wahl einer zu hohen Filterfrequenz die Höhe der kurzfristig erkennbaren Zusammenhänge zwischen Verkehrskenngrößen und Immissionskenngrößen nach oben limitiert wird, vergrößert eine zu niedrige Filterfrequenz tendenziell die enthaltenen Störgrößen in der Abschätzung. Abbildung 76 veranschaulicht diesen Zusammenhang beispielhaft an der bereits bekannten PM_{10} -Tagesganglinie, in der hochpassgefilterte gleitende 1-Stunden-Mittelwerte einer Zeitreihe aus hochpassgefilterten gleitenden 3-Stunden-Mittelwerten gegenübergestellt werden.

Während die gleitende 1-Stunden-Mittelung die Spitzen und Senken der Tagesganglinie annähernd nachvollzieht und zu einer hochpassgefilterten Zeitreihe mit einer kleinen Spannweite führt, zeigt die gleitende 3-Stunden-Mittelung eine niedrigere Volatilität und als Ergebnis eine hochpassgefilterte Zeitreihe mit größerer Spannweite. Es wird deutlich, dass die Ergebnisse der Analyse der hochfrequenten Komponente hinsichtlich ihrer Stabilität bei der Anwendung unterschiedlicher Filterfrequenzen geprüft werden müssen.

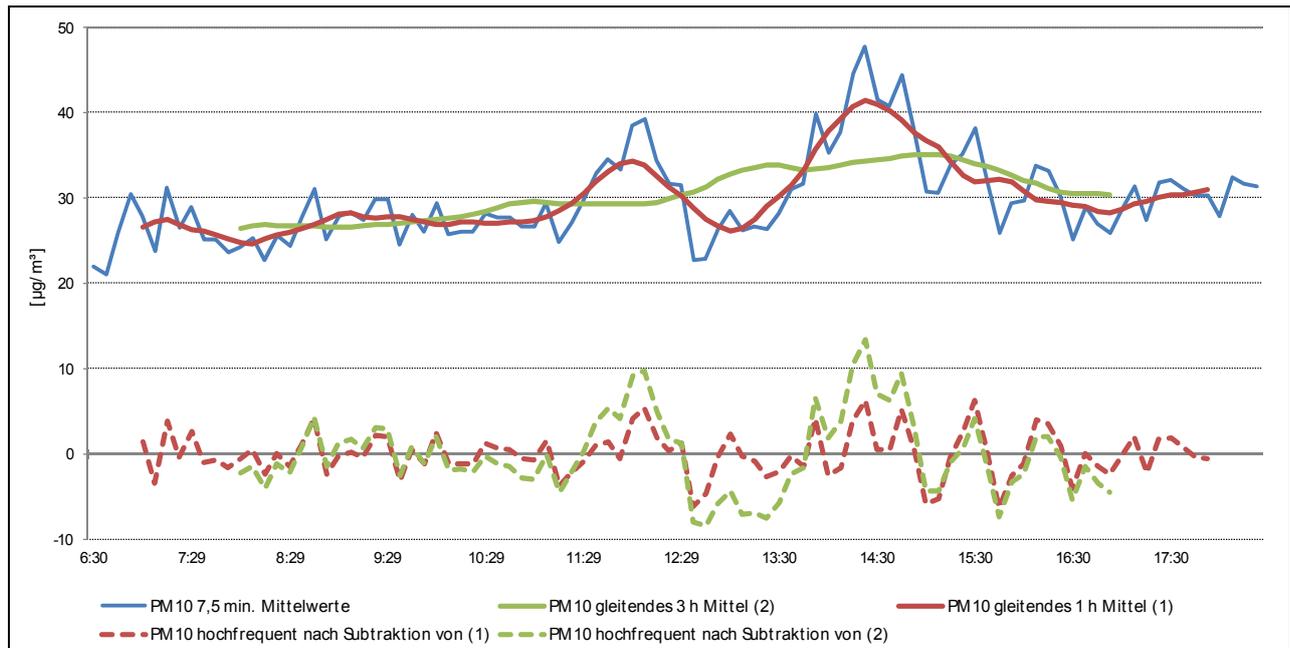


Abbildung 76: Auswirkungen einer geänderten Filterfrequenz auf die hochfrequente (hochpassgefilterte) Komponente der PM₁₀-Immissionskonzentration.

Schönwiese [1983b] nennt als gängige Tiefpassfilter die *gleitende Mittelung* und die *Gaußsche Tiefpassfilterung*. Die gleitende Mittelung lässt sich für beliebige Intervalle L formulieren und weist identische Gewichte w_k auf. Die Gewichte berechnen sich nach

$$w_k(GM) = \frac{1}{L}$$

Die Gaußsche Tiefpassfilterung hingegen verwendet einen frequenzabhängigen Algorithmus zur Ermittlung der Filtergewichte. Die Funktion zur Berechnung der Filtergewichte lautet

$$R(f)_G = \exp\left(-\frac{1}{3}\pi^2 f^2\right)$$

mit f als relativer Frequenz.

Darüber hinaus sind Verfahren der *exponentiellen Glättung* verbreitet [Voß, Buttler 2004], die auch zur Prognose einer Zeitreihe eingesetzt werden können. Für einen einfachen Fall, wenn weder eine Trend- noch eine Saisonkomponente berücksichtigt werden müssen, können die Filterwerte nach

$$\bar{a}_j = \alpha \cdot a_j + (1 - \alpha) \cdot \bar{a}_{j-1}$$

ermittelt werden, wobei α als Glättungsparameter bezeichnet wird. Die exponentielle Glättung entspricht damit einer gewichteten gleitenden Mittelung, wobei die Gewichte exponentiell abnehmen.

Für die in dieser Untersuchung vorliegenden Daten weisen alle aufgeführten Glättungsverfahren jedoch einen Nachteil auf, der bereits Abbildung 76 erkennbar ist:

Vorhandene Lücken in den Zeitreihen führen zu noch größeren Lücken in der tiefpassgefilterten Zeitreihe. Jede Lücke wird um die entsprechende Periode als Kehrwert der gewählten Filterfrequenz vergrößert. Neben den täglichen Lücken vor 6:30 Uhr und nach 18:30 Uhr sind weitere Lücken durch die o. g. Ereignisse vorhanden. Für die vorliegenden Zeitreihen führen die genannten Verfahren in Abhängigkeit der gewählten Filterfrequenz zu einer erheblichen Reduzierung der Stichprobengröße. Durch die Anwendung lückenschließender Verfahren kann dieser Nachteil zwar ansatzweise beseitigt werden; eine einfachere Alternative besteht allerdings in der Ermittlung einer Regression (der Zeit) für jede Kenngröße an jedem Messtag.

Nach Schönwiese [2010] ist im gegebenen Kontext den einfachen Verfahren der Vorzug zu geben, es sei denn, die genannten effizienten Verfahren wie beispielsweise nach GAUß oder weisen deutliche Vorteile auf. Die mit den genannten Filterverfahren und der alternativen zeitabhängigen Regression extrahierten hochfrequenten Zeitreihen werden einander exemplarisch für einen Messtag vergleichend gegenübergestellt (Abbildung 77).

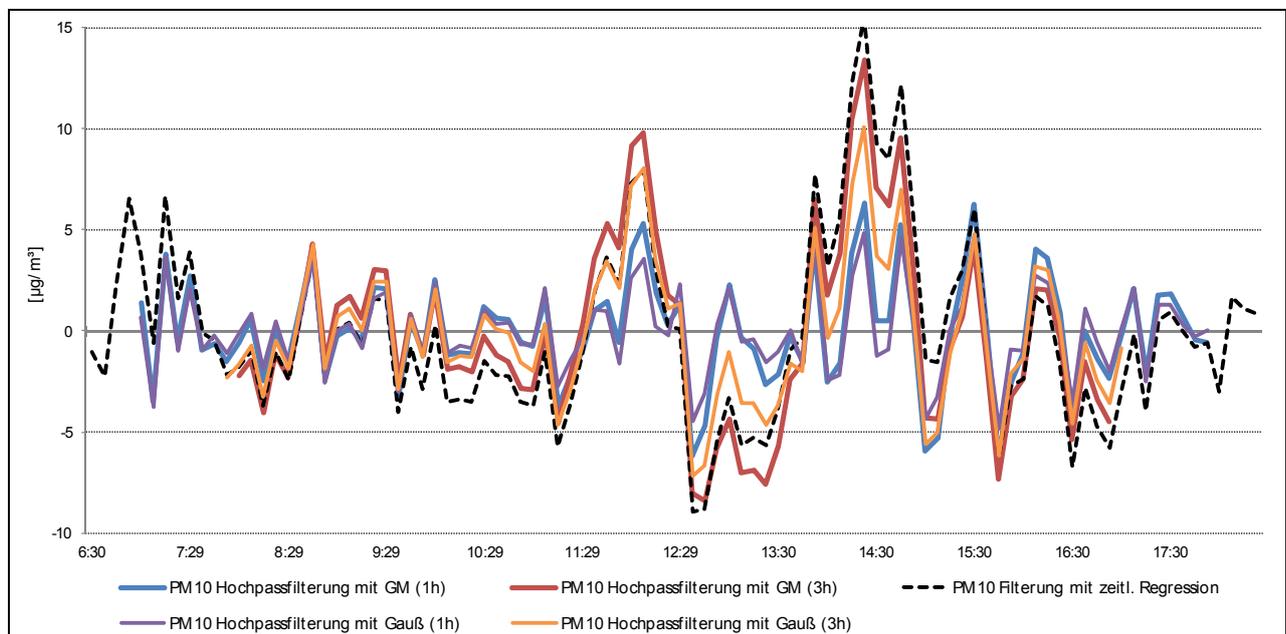


Abbildung 77: Gegenüberstellung der gefilterten hochfrequenten Zeitreihe mittels gleitender Mittelung (GM) für eine und drei Stunden, mittels Gaußscher Tiefpassfilterung für eine und drei Stunden sowie für die alternative zeitabhängige Regression.

Für die zeitabhängige (kubische) Regression ist tendenziell eine etwas größere Spannweite der hochfrequenten Zeitreihe im Vergleich zu den anderen Filtertechniken erkennbar, stellenweise liegt die extrahierte Zeitreihe aber auch zwischen den Ergebnissen der anderen Ansätze. Der relative Verlauf aller extrahierten Zeitreihen ist nahezu identisch. Es wird folglich davon ausgegangen, dass der aufwandsminimierte Ansatz keine Nachteile hinsichtlich der Qualität der trendbereinigten Zeitreihen mit sich bringt. Dennoch sollten die damit ermittelten Ergebnisse nach Anwendung alternativer Filtertechniken auf Stabilität geprüft werden.

Ein gängiges Verfahren zur Ermittlung der verkehrlichen Zusatzbelastung stellt die Differenzbildung zwischen den erhobenen Messwerten am HotSpot und den Messwerten einer

städtischen Hintergrundstation dar. Auch hier wird sicherlich ein Teil der niederfrequenten Komponente eliminiert. Im hier betrachteten Kontext wird das Verfahren allerdings nicht als sinnvoll erachtet: Der Tagesgang der Verkehrsnachfrage an einem (Verkehrs- bzw. Umwelt-) HotSpot kann vom Tagesgang der Verkehrsnachfrage an einem Knotenpunkt im städtischen Hintergrund deutlich abweichen. Folglich wird auch der Tagesgang der verkehrlichen Immissions-Zusatzbelastung am HotSpot vom städtischen Hintergrund deutlich abweichen. Eine saubere Isolation der hochfrequenten Komponenten der verschiedenen Zeitreihen ist auf diese Weise nicht möglich.

5.2.6.3 Datenanalyse

Qualitative Interpretation der erhobenen Tagesganglinien

Vor der eigentlichen Zusammenhangsanalyse wird eine erste qualitative Interpretation der erhobenen Kenngrößen anhand der graphischen Darstellung ihres Tagesgangs und einiger statistischer Kenngrößen durchgeführt. Dieser Untersuchungsschritt soll dazu beitragen, die später in der Zusammenhangsanalyse entwickelten mathematischen Zusammenhänge auf Plausibilität zu prüfen. Darüber hinaus wird entschieden, ob die erhobene Stichprobe als homogene Grundgesamtheit betrachtet werden kann oder ob bestimmte Messzeiträume gesondert betrachtet werden müssen.

Die graphische Analyse wird auf Grundlage der niederfrequenten Tagesganglinien der Kenngrößen

- NO_x und NO_2 ,
- PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ und $\text{PM}_{10-2,5}$,
- Windgeschwindigkeit,
- Temperatur,
- Luftfeuchte,
- Luftdruck sowie
- Verkehrsstärke und Anzahl der Anfahrvorgänge durchgeführt.

Die statistische Analyse umfasst die folgenden Untersuchungen, die für die oben genannten Kenngrößen, differenziert nach Testfeld und Messwochen, durchgeführt werden:

- Interpretation des arithmetischen Mittels,
- Interpretation der Varianz,
- Interpretation des 5. sowie 95. Perzentils,
- Interpretation der Änderungsrate,
- Untersuchung der statistischen Verteilung und
- Prüfung auf Autokorrelation.

Feststellen von Zusammenhängen zwischen Verkehrskenngrößen und Immissionskenngrößen

Die in Unterkapitel 5.2.6.1 formulierte Hypothese, dass die hochfrequente Komponente der Immissionskonzentration maßgeblich von den Einflussgrößen mit hoher Änderungsrate bestimmt wird, soll mit einem frequenzanalytischen Ansatz überprüft werden. Die Frequenzanalyse ermöglicht eine nach Frequenzen differenzierte Untersuchung der erhobenen Daten. In diesem Fall sollen die isolierten hochfrequenten Komponenten der Immissions- und der Verkehrskenngrößen auf Zusammenhänge überprüft werden. Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Frequenzanalyse ist die Möglichkeit, die extrahierten Datenreihen weitestgehend im „Rohzustand“ zu untersuchen, ohne sie aufgrund statistischer Anforderungen weiter abstrahieren zu müssen (beispielsweise durch Logarithmierung).

Der fachliche Hintergrund für die Hypothesenprüfung lässt wie folgt beschreiben: Der innerstädtische Verkehr an LSA-gesteuerten Knotenpunkten unterliegt einer strengen Periode in Form der geschalteten Umlaufzeit. Bei einer entsprechenden Verkehrsnachfrage treten Anfahrvorgänge regelmäßig und gebündelt mit der Periode der Umlaufzeit auf. Bei Gültigkeit der formulierten Hypothese sollte die höhere Emissionsrate der Anfahrvorgänge periodisch in der hochfrequenten Immissionskomponente erkennbar sein. Sofern diese Periodizität, zumindest bei einer hohen Auslastung und einer regelmäßig auftretenden Ballung von Anfahrvorgängen, nachweisbar ist, können die formulierte Hypothese und damit auch der Untersuchungsansatz für die hochfrequenten Zeitreihenkomponenten weiter aufrecht erhalten werden.

Der mathematische Ansatz der Hypothesenprüfung stellt sich folgendermaßen dar: Zeitreihen bestehen häufig aus periodischen und zufälligen Komponenten die sich gegenseitig überlagern. Mit Hilfe der Frequenzanalyse können periodische Veränderungen in den Zeitreihen identifiziert und analysiert werden. Das Grundmodell für die Frequenzanalyse sind überlagerte Sinus- und Cosinus-Funktionen, die jeweils mit den Parametern Amplitude, Periodendauer und Phasenverschiebung beschrieben werden und auf diese Weise die Zeitreihe exakt oder näherungsweise abbilden können. Die Bestimmung der Sinus- und Cosinus-Funktionen erfolgt mittels der Fourier-Transformation. Die graphische Darstellung des beschriebenen Zusammenhangs wird als Periodogramm bezeichnet. Ein hoher Wert im Periodogramm für eine bestimmte Frequenz bedeutet, dass die zugehörige Teilschwingung einen hohen Anteil der Varianz der Zeitreihe erklärt.

Eine bivariate Untersuchung zweier verschiedener Zeitreihen im Frequenzbereich ist mit Hilfe der Kreuzspektrumsanalyse möglich. Nach Fleer [1983] wird der Frequenzbereich ermittelt, in dem die Kopplung der zeitlichen Fluktuation der Zeitreihen am ausgeprägtesten ist. Die Kreuzspektrumsfunktion $P_{xy}(h)$ zweier Zeitreihen entspricht der Fouriertransformation der Kreuzkovarianzfunktionen $R_{xy}(\rho)$ und $R_{yx}(\rho)$. Eine Verknüpfung beider Kovarianzen durch Addition führt zum geraden Teil der Kreuzkovarianzfunktion, eine Verknüpfung durch Subtraktion führt zum ungeraden Teil der Kreuzkovarianzfunktion.

Analog zum univariaten Fall der Fouriertransformation, wird der gerade Teil mit der Kosinus-Funktion transformiert und liefert (für eine endliche und diskrete Reihe) den reellen Teil des Kreuzspektrums, das Kospektrum $C_{xy}(h)$.

$$C_{xy}(h) = \frac{\Delta t}{\pi} \sum_{p=0}^m \varepsilon_p (R_{xy}(p) + R_{yx}(p)) \cos \frac{hp\pi}{m} \quad \begin{matrix} h = 0, 1, \dots, m \\ \varepsilon_p = \begin{cases} 0,5 & \text{für } p = 0, m \\ 1 & \text{für } 0 < p < m \end{cases} \end{matrix}$$

h = Harmonische (ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz)

Δt = konstanter zeitlicher Abstand der Messwerte,

p = zeitliche Verschiebung,

m = maximale zeitliche Verschiebung.

Die Fouriertransformation des ungeraden Teils mit der Sinus-Funktion liefert den imaginären Teil des Kreuzspektrums, das Quadraturspektrum $Q_{xy}(h)$.

$$Q_{xy}(h) = \frac{\Delta t}{\pi} \sum_{p=0}^m \varepsilon_p (R_{xy}(p) - R_{yx}(p)) \sin \frac{hp\pi}{m} \quad \begin{matrix} h = 0, 1, \dots, m \\ \varepsilon_p = \begin{cases} 0,5 & \text{für } p = 0, m \\ 1 & \text{für } 0 < p < m \end{cases} \end{matrix}$$

Das Ergebnis des Kreuzspektrums sind spektrale Dichten der Einheit $\frac{x(t) \cdot y(t)}{\frac{1}{2m\Delta t}}$.

Sowohl das Kospektrum als auch das Quadraturspektrum werden üblicherweise mit gewichteten Filtern geglättet, um eine Interpretation zu vereinfachen. Sofern die Länge des zu interpretierenden Signals nicht ein ganzzahliges Vielfaches der Signalperiode ist, können die Randbereiche des Signals die auftretenden Frequenzkomponenten beeinflussen. Anhand von Filterfunktionen, mit denen die Randbereiche weniger stark gewichtet werden, kann dieser Effekt reduziert oder ganz vermieden werden. Für diese Auswertung wird der Hamming-Filter mit $w(k)$ als Gewicht des aktuellen Signalwertes k und p als halbe Fensterbreite (betrachteter Ausschnitt des Signals)

$$w(k) = 0,54D_p(2\pi f_k) + 0,23D_p(2\pi f_k + \frac{\pi}{p}) + 0,23D_p(2\pi f_k - \frac{\pi}{p})$$

verwendet [SPSS 2009].

Sofern die untersuchten Zeitreihen in einem bestimmten Frequenzbereich gleich- oder phasenverschobene Schwankungen aufweisen, so zeigt sich im Kreuzspektrum ein signifikant von Null verschiedener Kovarianzbeitrag.

Aus den Vorzeichen der Ko- und Quadraturspektrumwerte können Informationen über die Richtung der Phasenverschiebung zwischen Basiszeitreihe und Sekundärzeitreihe sowie über die Art der Schwankung abgeleitet werden: Positive Quadraturspektrumwerte bedeuten ein Vorseilen der Sekundärreihe y gegenüber der Basisreihe x und umgekehrt. Positive Kospektrumwerte liegen bei gleichphasigen Schwingungen, negative bei gegenphasig verlaufenden Schwingungen vor.

Die hier erforderliche Hypothesenprüfung lässt sich jedoch auch verkürzt über die quadratische Kohärenz $CH(h)$ darstellen, die als spektrales Bestimmtheitsmaß verstanden werden kann. Die quadratische Kohärenz ergibt sich nach Schönwiese [2006] aus

$$CH(h) = \frac{C_{xy}^2(h) + Q_{xy}^2(h)}{SP_x(h)SP_y(h)} \quad \text{für } h = 1, 2, \dots, M$$

Dabei sind SP_x und SP_y die Varianzspektren der beiden Zeitreihen mit

$$SP(h) = \frac{1}{M} \left[s_A^2(0) + \sum_{k=1}^{M-1} D(k) s_A^2(k) \cos \frac{\eta h k}{M} \right] \quad \text{für } 0 < h < M$$

wobei s_A die Autokovarianzfunktion und $D(k)$ eine Filterfunktion (siehe oben) darstellen.

Die Autokovarianz ergibt sich aus folgender Gleichung mit τ als zeitliche Verschiebung a' als Abweichung vom Mittelwert.

$$s_A(\tau) = \frac{1}{n-1-\tau} \sum a_i'(t_i) \cdot a_i'(t_{i+\tau})$$

Die Vertrauensgrenze β für die Kohärenz ergibt sich aus

$$\beta = \sqrt{1 - \alpha^{(1/(\phi-1))}}$$

mit α als Irrtumswahrscheinlichkeit und ϕ als Zahl der Freiheitsgrade, wobei die Zahl der Freiheitsgrade aufgrund von Autokorrelation gemäß Schönwiese [2006] (vgl. folgenden Abschnitt) korrigiert werden sollte.

Identifikation der wesentlichen Einflussgrößen auf die Immissionskenngößen

Sofern die in vorangehenden Unterabschnitt durchgeführte Prüfung ein Aufrechterhalten der formulierten Hypothese für die hochfrequenten Zeitreihenkomponenten erlaubt, sollen in diesem Arbeitsschritt die wesentlichen Einflussfaktoren auf die gemessenen hoch- und niederfrequenten Immissionskonzentrationen identifiziert werden. Hierzu werden Verfahren der Korrelationsanalyse angewendet. Der Korrelationskoeffizient ist ein Maß für die Stärke eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei Datenreihen.

In einem ersten Schritt wird mittels Kreuzkorrelation untersucht, ob eine Phasenverschiebung τ zwischen den Schwankungen der Verkehrskenngrößen und der Immissionskenngrößen vorliegt. Sofern eine Phasenverschiebung erkennbar ist, werden die entsprechenden Zeitreihen der Verkehrskenngrößen in der Datentabelle um τ verschoben. Der Kreuzkorrelationskoeffizient errechnet sich für die Datenreihen a und b und ein beliebiges τ nach:

$$r_k = \frac{\sum a_i'(t_i + \tau) \cdot b_i'}{(n-1-\tau) \cdot s_a \cdot s_b} \quad \begin{array}{l} \tau = k \cdot \Delta t, k = 0, 1, \dots, M \\ \text{mit } n = \text{Zahl der Wertpaare} \\ s_{a/b} = \text{Standardabweichung} \end{array}$$

Anschließend wird die Korrelation zwischen Immissionskenngößen und meteorologischen Kenngößen sowie zwischen Immissionskenngößen und gegebenenfalls phasenverschobenen Verkehrskenngrößen untersucht. Dazu wird die partielle Korrelationsanalyse verwendet, um die Aufnahme von Variablen in das Modell aufgrund von Scheinkorrelationen zu vermeiden. Die partielle Korrelationsanalyse vergleicht die Korrelation zwischen mehreren Variablen unter Berücksichtigung der Einflüsse weiterer Variablen. So können die meteorologischen Einflüsse für konstante Verkehrsverhältnisse und die verkehrlichen Einflüsse für konstante meteorologische Zustände untersucht werden. Der partielle Korrelationskoeffizient $r(part)_{ab-c}$ errechnet sich für den dreidimensionalen Fall der Untersuchung der Datenreihen a und b unter Ausschaltung von c , wobei r der zweidimensionale lineare Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient nach Pearson ist.

$$r(part)_{ab-c} = \frac{r_{ab} - r_{ac} \cdot r_{bc}}{\sqrt{(1 - r_{ac}^2) \cdot (1 - r_{bc}^2)}} \quad \text{mit } r_{ab} = \frac{\sum a_i' \cdot b_i'}{\sqrt{\sum a_i'^2 \cdot b_i'^2}}$$

Beide Untersuchungsschritte werden getrennt für die niederfrequenten und hochfrequenten Zeitreihen sowie getrennt nach Testfeld und nach Messwoche im Testfeld durchgeführt.

Die als signifikant identifizierten Korrelationen, die vorzugsweise in beiden Messwochen jedes Testfeldes das gleiche Vorzeichen aufweisen, stellen potenzielle Eingangsgrößen für das Erklärungsmodell dar. Die errechneten Korrelationskoeffizienten und die zugehörigen Signifikanzwerte haben nur dann eine hohe Aussagekraft, wenn die Datenreihen bestimmte statistische Voraussetzungen erfüllen. Die statistischen Voraussetzungen für die Anwendung der Korrelationsanalyse lauten wie folgt:

1. Vorliegen zweier Stichproben mit gleichem Stichprobenumfang n (möglichst mit $n > 30$) und gleichem Bezug der Datenpaare.

Die erste Voraussetzung wird von den erhobenen Zeitreihen erfüllt.

2. Unabhängigkeit der Daten innerhalb der Stichprobe

Die zweite Voraussetzung ist für einen Großteil der Zeitreihen aufgrund von Autokorrelation nicht erfüllt. In diesem Fall ist zur Vermeidung der Überschätzung der Signifikanz eine Korrektur der Freiheitsgrade ϕ der Zeitreihen in Abhängigkeit der Autokorrelationskoeffizienten r_{A1} und r_{A2} der beiden Zeitreihen erforderlich [Schönwiese 2006].

$$\phi_r = \phi \frac{1 - r_{A1} r_{A2}}{1 + r_{A1} r_{A2}}$$

3. Normalverteilung der Stichproben

Die dritte Voraussetzung wird nur von einem Teil der Zeitreihen erfüllt. Einige der nicht-normalverteilten Stichproben werden durch Logarithmierung an die Normalverteilung angenähert, sofern dies nicht der Fall ist, sind verteilungsfreie Verfahren zur Ermittlung der Korrelation anzuwenden. Ein gängiges Verfahren die Rangkorrelationsrechnung nach Spearman:

$$r_R = 1 - \frac{6 \sum D_i^2}{n^3 - n}$$

Dabei sind D_i die Rangplatzdifferenzen einer numerisch aufsteigenden Rangfolge der Stichprobenwerte im Vergleich zur ursprünglichen (zeitlichen) Rangordnung.

4. Linearer Zusammenhang zwischen den untersuchten Stichproben
Die vierte Voraussetzung ist nur in Ausnahmefällen gegeben. Auch hier führt die Logarithmierung bei einigen Zeitreihen zur Linearisierung der Zusammenhänge. Grundsätzlich wird bei nichtlinearen Zusammenhängen die Korrelation unterschätzt, so dass die hier durchgeführte Abschätzung auf der sicheren Seite liegt.
5. Unabhängigkeit gegenüber anderen Vorgängen bzw. Datenreihen.
Die fünfte Voraussetzung wird ebenfalls nur in Ausnahmefällen von den erhobenen Zeitreihen erfüllt. Soweit möglich (d. h. sofern die beeinflussenden dritten, vierten usw. Größen überhaupt erhoben wurden), wird dies durch die partielle Korrelationsanalyse berücksichtigt.

Quantifizieren der Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und den Immissionskenngrößen (Modellentwicklung)

Gewählter regressionsanalytischer Ansatz

Die gängigen Methoden zur Quantifizierung der Zusammenhänge zwischen Kenngrößen (im Bereich der Luftreinhaltung) sind im Unterkapitel 5.2.3 beschrieben. Zum Einsatz kommt dabei die Regressionsanalyse als parametrische und nicht-parametrische, als lineare und nicht-lineare Regression, als Regression mit und ohne autoregressive Komponente sowie neuronale Netze. Aufgrund ihrer hohen Transparenz und ihrer guten Handhabbarkeit wird hier die parametrische lineare Regressionsanalyse zur Quantifizierung angewendet.

Das von Shi, Harrison [1997] verwendete parametrische, quasi-lineare Regressionsmodell mit autoregressiver Komponente weist eine hohe Modellierungsgüte auf und wird auf die identifizierten Einflussfaktoren angewendet. Im Modellansatz ergibt sich die Schadstoffkonzentration $C_{\text{Schadstoff},t}$ aus der multiplikativen Überlagerung der festgestellten Einflussfaktoren X_k mit den zugehörigen als Exponenten eingehenden Koeffizienten B_k .

$$C_{\text{Schadstoff},t} = F(X_1, \dots, X_k) = e^{B_1} X_2^{B_2} \dots X_k^{B_k}$$

Durch Logarithmierung lässt sich der gesamte Term linearisieren.

$$\ln(C_{\text{Schadstoff},t}) = B_1 + B_2 \ln(X_2) + \dots + B_k \ln(X_k)$$

Im endgültigen Modell wird von einer autoregressiven Komponente erster Ordnung (AR1-Prozess) ausgegangen. Diese wird durch eine Lag-Variable $Lag1_t$ berücksichtigt und führt bei Anwendung des OLS-Schätzers zu angepassten Regressionskoeffizienten β_k , wobei $e_{j,t}$ das Residuum zum Zeitpunkt t darstellt.

$$\ln(C_t) = \beta_1 + \beta_2 \ln(X_{2,t}) + \dots + \beta_k \ln(X_{k,t}) + \beta_{k+1} Lag1_t + e_t$$

Die Lag-Variable ergibt sich durch Umformung des obigen Terms und entspricht den Residuen zu den Zeitpunkten t-1.

$$\text{Lag1}_t = \ln(C_{t-1}) - B_1 - \sum_{i=2}^k B_i \ln(X_{i,t-1})$$

Auswahl der Prädiktoren für das Erklärungsmodell (Merkmalsselektion)

Es ist davon auszugehen, dass die Korrelationsanalyse eine Reihe signifikanter Korrelationen zwischen Einflussfaktoren und Immissionskenngrößen aufzeigt. In das Erklärungsmodell sollen nur die wirklich notwendigen Prädiktoren eingebunden werden, die fachlich interpretierbar und klar voneinander abgrenzbar sind. Nach Rudolf, Müller [2004] lassen sich drei gebräuchliche Verfahren unterscheiden:

- Das *Vorwärts-Verfahren* nimmt schrittweise die Kenngrößen mit dem jeweils höchsten Korrelationskoeffizienten in das Modell auf. Wenn die Aufnahme einer Variablen mit einer signifikanten Zunahme des Bestimmtheitsmaßes verbunden ist, wird die Kenngröße im Modell belassen und die nächste potenzielle Prädiktorkenngröße aufgenommen. Das Verfahren bricht ab, wenn die Zunahme einer Kenngröße nicht mehr zu einer signifikanten Zunahme des Bestimmtheitsmaßes führt.
- Das *Rückwärts-Verfahren* nimmt zunächst alle potentiellen Prädiktorkenngrößen in das Erklärungsmodell auf. Es werden sukzessive die Kenngrößen aus dem Modell entfernt, die zum geringsten Rückgang des Bestimmtheitsmaßes führen. Sofern sich das Bestimmtheitsmaß durch die Wegnahme einer Kenngröße nicht signifikant verringert, wird die Kenngröße aus dem Modell ausgeschlossen. Erst bei einer signifikanten Verkleinerung des Bestimmtheitsmaßes wird das Verfahren abgebrochen.
- Das *schrittweise Verfahren* kombiniert das Vorwärts- und das Rückwärts-Verfahren. Hier wird vor der Aufnahme einer neuen Kenngröße überprüft, ob sich durch die Entfernung einer bereits aufgenommenen Prädiktorkenngröße das Bestimmtheitsmaß signifikant verkleinert.

Alle drei Verfahren beurteilen die Signifikanz der Veränderung des Bestimmtheitsmaßes mittels eines F-Tests (vgl. Bortz, Weber [2005]). Aufgrund von Kollinearitäts- und Suppressionseffekten besteht die Möglichkeit, dass die Verfahren zu unterschiedlichen Prädiktormengen führen können. Daher wird ein Vergleich der Ergebnisse der drei Verfahren durchgeführt.

Konkret werden für jede zu untersuchende Immissionskenngröße diejenigen Kenngrößen als potenzielle Prädiktorkenngrößen markiert, für die eine signifikante Korrelation festgestellt wurde. Auch wenn die Messungen in einem Testfeld nach der Interpretation der statistischen Kenngrößen als unterschiedliche Grundgesamtheiten angesehen werden, so wird im Sinne eines möglichst repräsentativen Modells die Auswahl der Kenngrößen auf diejenigen beschränkt die in *allen* untersuchten Zeiträumen eines Testfelds keine entgegengesetzte signifikante Korrelation aufweisen. Für die markierten potenziellen Prädiktorkenngrößen werden die drei beschriebenen Merkmalsselektionsverfahren auf lineare Regressionen angewendet. Bei unterschiedlichen Ergebnissen der Verfahren werden die Prädiktormengen mit enthaltenen Merkmalen des Verkehrsablaufs sowie die mit fachlich am besten voneinander abgrenzbaren

Merkmale präferiert. Sofern die Kenngrößen in der ausgewählten Prädiktormenge sich immer noch inhaltlich überschneiden, werden einzelne Kenngrößen trotz einer signifikanten Reduktion des Bestimmtheitsmaßes manuell entfernt.

Anforderungen an das Erklärungsmodell

Gemäß des formulierten Ansatzes wird ein Regressionsmodell zur Erklärung der NO_x -, PM_{10} -, $\text{PM}_{2,5}$ - und $\text{PM}_{10-2,5}$ -Zeitreihen entwickelt, jeweils differenziert nach hochfrequenter und niederfrequenter Komponente, nach den beiden Testfeldern und nach homogenen Messzeiträumen¹⁰. Daraus ergibt sich die Anzahl der zu entwickelnden und zu interpretierenden Modelle zu einem Vielfachen von

$$16 = 4 \text{ Schadstoffe} * 2 \text{ Ansätze (hoch-/niederfrequent)} * 2 \text{ Testfelder} * n \text{ Messzeiträume.}$$

Im Sinne einer möglichst repräsentativen Modellierung, aber auch aus Gründen der Übersichtlichkeit und des Aufwands, sollte die Anzahl der getrennt betrachteten Messzeiträume niedrig (nach Möglichkeit kleiner gleich zwei) sein.

Es werden folgende inhaltliche Anforderungen an die Modelle gestellt:

- Die Modelle sollen eine möglichst kleine Anzahl an Prädiktoren mit einem möglichst hohen Anteil an erklärter Varianz enthalten.
- Die Vorzeichen der Regressionskoeffizienten der Prädiktoren sollen fachlich interpretierbar sein.
- Sofern für mehrere Messzeiträume eigene Modelle entwickelt werden, sollen für jedes Testfeld möglichst dieselben Prädiktoren in das Modell eingebunden werden.
- Die Prädiktoren sollen inhaltlich klar voneinander abgrenzbar sein.

Zur Sicherstellung einer hohen statistischen Aussagekraft werden die folgenden Prüfungen durchgeführt:

- Prüfung der Autokorrelation der Residuen: Eine Autokorrelation führt zu einem zwar weiterhin erwartungstreuen, jedoch ineffizienten OLS-Schätzer und somit zu einer Überschätzung der Signifikanz und einer Unterschätzung des Standardfehlers [Meißner 2004]. Die Prüfung wird anhand des Durbin-Watson-Tests durchgeführt.
- Prüfung der Residuen auf Heteroskedastizität (Varianzheterogenität): Eine inhomogene Varianz der Residuen führt analog zur Autokorrelation zu ineffizienten Schätzungen. Die Prüfung dieser Bedingung erfolgt graphisch anhand eines Streudiagramms in dem eine Achse die Residuen und die andere Achse die modellierten Werte darstellt [Voß, Buttler 2004].
- Prüfung auf Normalverteilung der Residuen: Eine Abweichung von der Normalverteilung kann zu einer reduzierten Aussagekraft des T-Tests führen, mit dem die Signifikanz der

¹⁰ Darunter werden diejenigen Messzeiträume verstanden, die in Bezug auf die wesentlichen meteorologischen Einflussgrößen als einer Grundgesamtheit zugehörig angesehen werden können.

Regressionskoeffizienten überprüft wird. Für Stichprobengrößen $n > 100$ ist dies jedoch meist unkritisch [Schönwiese 2006].

- Prüfung auf Kollinearität und Suppression: Wechselwirkungen zwischen Einflussgrößen können dazu führen, dass Kausalbeziehungen zwischen Einflussgröße und Zielgröße vom Modell nicht korrekt bzw. nicht in korrektem Ausmaß abgebildet werden. Die Kollinearität kann anhand der Korrelationsmatrix der Eingangsgrößen überprüft werden. Bei einer Vielzahl von Eingangsgrößen kann auch die Toleranz einer Eingangsgröße herangezogen werden [Rudolf, Müller 2004]. Nach Baltés-Götz [2008] sind Toleranzwerte kleiner als 0,1 als kritisch anzusehen. Damit die Einflüsse der Prädiktoren im Erklärungsmodell klar voneinander abgrenzbar sind, werden Einflussfaktoren nur dann in das Modell aufgenommen, wenn ihre Toleranz größer als 0,4 ist.
- Signifikanzprüfung einzelner Prädiktoren mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 5 %.

Interpretation und Bewertung des Erklärungsmodells

Die inhaltliche Interpretation erfolgt anhand der in das Modell aufgenommenen Prädiktoren, der Vorzeichen ihrer Koeffizienten sowie ihres Gewichts im Modell unter Berücksichtigung der recherchierten Zusammenhänge. Für Bewertung des Gewichts einzelner Prädiktoren werden die Beta-Werte als standardisierte Koeffizienten herangezogen. Die fachliche Plausibilität der Prädiktoren ist eine Voraussetzung für die weitere Bewertung der Güte des Erklärungsmodells.

Die Bewertung des Erklärungsmodells wird teilformalisiert verbal-argumentativ anhand des Bestimmtheitsmaßes, des relativen Standardfehlers und einer visuellen Prüfung der Ähnlichkeit zwischen gemessener und modellierter Zeitreihe vorgenommen.

Das *Bestimmtheitsmaß* beschreibt den Anteil der erklärten Varianz der Immissionskenngößen. Die Bewertung des hier entwickelten Erklärungsmodells orientiert sich an der im Abschnitt 5.2.3 dargestellten Güte gängiger Modellansätze. Beim niederfrequenten Erklärungsmodell wird eine Varianzaufklärung von mehr als 80 % als „gut“, eine Varianzaufklärung von 60 bis 80 % als „befriedigend“ und eine Varianzaufklärung unter 60 % als „nicht ausreichend“ eingestuft. Für das hochfrequente Erklärungsmodell sind dem Verfasser keine vergleichbaren Ansätze bekannt. Auf eine Bewertung anhand der Skala für das niederfrequente Modell wird daher verzichtet.

Weiter wird der *relative Standardfehler* rSE des Modells als wichtige Bewertungsgröße angesehen. Für das niederfrequente Modell wird der Standardfehler relativ zur mittleren gemessenen Immissionskonzentration ermittelt.

$$rSE_{nf} = \frac{SE_{nf}}{\ln(\bar{C})} \cdot 100$$

mit

SE_{nf} = absoluter Standardfehler des niederfrequenten Modells

\bar{C} = Mittlere gemessene Immissionskonzentration

Für das hochfrequente Modell ergibt sich der relative Standardfehler aus dem Verhältnis des Standardfehlers zur doppelten Standardabweichung der hochfrequenten Immissionskomponente.

$$rSE_{hf} = \frac{SE_{hf}}{2 \cdot s_{hf}} \cdot 100 \text{ mit}$$

mit

SE_{hf} absoluter Standardfehler im hochfrequenten Modell

s_{hf} Standardabweichung der hochfrequenten Immissionskomponente

Wie bereits dargestellt, werden die Anforderungen der 39. BImSchV an die Unsicherheit von Modellrechnungen als zu niedrig angesehen. Der relative Standardfehler der niederfrequenten Erklärungsmodelle wird daher nach einer eigenen „strengeren“ dreistufigen Skala bewertet. Danach wird ein relativer Standardfehler bis 25 % als „gut“, ein relativer Standardfehler von 26 % bis 35 % als befriedigend und von mehr als 35 % als „nicht ausreichend“ eingestuft. Für das hochfrequente Erklärungsmodell wird auch hier aufgrund fehlender vergleichbarer (Bewertungs-) Ansätze auf die Bewertung anhand der gewählten Skala verzichtet. Vielmehr wird der relative Standardfehler als Indikator für etwaige erforderliche Weiterentwicklungen der hochfrequenten Modelle herangezogen, um die Amplitude der gemessenen Zeitreihen besser abzuschätzen.

Als wichtig wird die *visuelle Prüfung* der Ähnlichkeit zwischen der gemessenen und der modellierten Zeitreihe angesehen. Hierbei werden die Ähnlichkeit in Bezug auf den stark geglätteten Tagesgang (nur niederfrequentes Erklärungsmodell) und die Ähnlichkeit in Bezug auf die Abbildung einzelner Maxima und Minima (nieder- und hochfrequentes Erklärungsmodell) qualitativ bewertet. Bei einer hohen Ähnlichkeit an mindestens 70 % der Messtage, wird die Ähnlichkeit mit „gut“ bewertet. Eine hohe Ähnlichkeit an 50 bis 70 % der Messtage wird „befriedigend“ und eine hohe Ähnlichkeit an weniger als 50 % der Messtage wird „nicht ausreichend“ bewertet. Im Rahmen der visuellen Prüfung der Güte wird die modellierte Zeitreihe *ohne* die autoregressive Komponente dargestellt. Die Lag-Variable stellt im Modell eine Größe dar, die sich prinzipiell aus den Einflüssen der Prädiktoren zum Zeitpunkt t-1 ergeben kann und damit durchaus im Modell verwendet werden sollte, die allerdings auch Einflüsse aus nicht erhobenen oder nicht erkannten Einflussgrößen enthalten kann. Relevante Einflüsse aus vergangenen Zeitpunkten t-x hätten im Zuge der Kreuzkorrelationsanalyse erkannt werden müssen, so dass die Lag-Variable in diesem Fall als reine Fehlerkenngöße zu verstehen ist.

5.2.6.4 Quantifizieren von Wirkungspotenzialen der LSA-Steuerung

Auf Grundlage des Erklärungsmodells können die Wirkungen variierender meteorologischer und insbesondere verkehrlicher Einflussfaktoren auf die Immissionskonzentration untersucht werden. Zunächst wird das maximale verkehrliche Reduktionspotenzial bestimmt, das als eine

erhebliche Reduzierung des Zuflusses für den motorisierten Straßenverkehr¹¹ und/oder als eine Koordinierung des Verkehrs mit minimalem Anteil an Halten verstanden werden kann.

Das maximale Reduktionspotenzial \bar{C}_{maxPot} wird abgeschätzt, indem für einzelne verkehrsbezogene Prädiktoren im Modell das gemessene fünfte Perzentil ($X_{k,5\%}^{Bk}$) eingesetzt wird¹², während für die weiteren Prädiktoren im Modell (\bar{X}_i^{B1}) mittlere gemessene Werte eingesetzt werden.

$$\bar{C}_{maxPot, X_k} = e^{B1 \bar{X}_2^{B2} \bar{X}_3^{B3} \dots X_{k,5\%}^{Bk}}$$

Für die niederfrequenten Erklärungsmodelle entspricht die Differenz zur mittleren gemessenen Immissionskonzentration im Messzeitraum dem maximalen Reduktionspotenzial einer Kenngröße. Sofern mehrere verkehrliche Prädiktoren in das Modell aufgenommen wurden, werden ihre Reduktionspotenziale zu einem gesamten verkehrlichen Reduktionspotenzial addiert – nach der Merkmalsselektion für die Erklärungsmodelle kann davon ausgegangen werden, dass sich die Prädiktoren in ihrer Aussage nicht signifikant überschneiden.

Die maximalen Reduktionspotenziale in den hochfrequenten Erklärungsmodellen werden analog ermittelt: Die trendbereinigten Zeitreihen streuen um die Nulllinie – das Einsetzen des fünften Perzentils einer trendbereinigten Verkehrskenngröße in ein hochfrequentes Modell ergibt folglich eine negative Abweichung von der Nulllinie, die den maximalen Erklärungsanteil der Verkehrskenngröße im Sinne einer Minimierung der Kenngröße beschreibt. Die Rücktransformation ergibt den Erklärungsanteil oder das maximale kurzfristige Immissionsreduktionspotential der Verkehrskenngröße in der Originalskala der Kenngröße.

Die niederfrequenten Zeitreihen enthalten sämtliche Informationen der hochfrequenten Komponenten in stark aggregierter oder geglätteter Form. Folglich sind die Reduktionspotenziale der hochfrequenten Erklärungsmodelle als Bestandteil der Reduktionspotenziale der niederfrequenten Erklärungsmodelle zu verstehen. Fachlich lassen sich die hochfrequenten Reduktionspotenziale als Maßnahmen innerhalb eines Umlaufs, wie beispielsweise einer Grünzeitverlängerung für einzelne Fahrzeugpuls, veranschaulichen. Die niederfrequenten Reduktionspotenziale entsprechen dann einer verkehrstechnischen Maßnahme auf einer zeitlich eher makroskopischen Ebene. Zur Quantifizierung konkreter Zusammenhänge zu LSA-Steuerungsparametern sind detaillierte Ursache-Wirkungsanalysen zwischen den einzelnen veränderbaren Elementen der Signalprogramme und den identifizierten umweltrelevanten verkehrlichen Kenngrößen durchzuführen, die jedoch nicht Bestandteil dieser Untersuchung sind.

Anschließend wird der Anteil der Varianz der verkehrlichen Einflussfaktoren ermittelt, der auf die LSA-Steuerung zurückgeführt werden kann. Hierfür sind die Wirkungen der LSA-Steuerung,

¹¹ Bzw. der kleinsten gemessenen Ausprägung der Verkehrskenngrößen im Erklärungsmodell, da beispielsweise im Testfeld Hamburg in keinem der betrachteten Zeitintervalle eine Verkehrsstärke von $q=0$ Fz/h erfasst wurde und das Erklärungsmodell diesen Zustand folglich nicht berücksichtigen kann.

¹² Das fünfte Perzentil wurde gewählt um keine Ausreißer als Grundlage für die Potenzialabschätzung zu verwenden.

bezogen auf die im Erklärungsmodell enthaltenen Verkehrskenngrößen, zu quantifizieren. Eine Verknüpfung dieser in der Praxis erreichbaren Wirkungen mit dem Erklärungsmodell ermöglicht schließlich die *Abschätzung der tatsächlich realisierten immissionsbezogenen Wirkungen der einzelnen LSA-Steuerungsverfahren*. Die Wirkungen einer verbesserten Koordinierung 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. Dafür wird zunächst eine Clusterung der Verkehrsnachfrage am Messquerschnitt vorgenommen. Abweichend zur Clusterung in den verkehrsbezogenen Untersuchungen erfolgt die Clusterung differenziert nach Pkw-Verkehrsstärke und Schwerverkehrsstärke, da von einer dominanten Rolle des Schwerverkehrs für die gemessenen Immissionen bestätigt.

Die so ermittelten Verkehrsstärke- und Schwerverkehrsstärke-Cluster werden hinsichtlich Kenngröße Anfahrvorgänge ausgewertet. Mittels Verknüpfung des NO_x-Immissions-Erklärungsmodells mit den festgestellten Wirkungen in Bezug auf die Anfahrvorgänge kann die Immissionsreduktion der einzelnen Steuerungsverfahren abgeschätzt werden.

Für die netzbezogenen Wirkungen werden Ergebnisse der Simulation, in Form von Wirkungspotenzialen der adaptiven Netzsteuerung für die identifizierten relevanten *Verkehrsflusskenngrößen* (z. B. Anfahrvorgänge im Einflussbereich), als Eingangsgrößen für das Regressionsmodell verwendet, um das Wirkungspotenzial für die Immissionen am Messquerschnitt (bzw. HotSpot) zu bestimmen.

6 Typisierung von Anwendungsfeldern

Die Eignung der unterschiedlichen Steuerungsverfahren für den Einsatz in einem bestimmten Steuerungsgebiet hängt seinerseits von den im jeweiligen Gebiet vorhandenen Randbedingungen sowie andererseits von den mit der LSA-Steuerung verfolgten Zielsetzungen ab (vgl. Abbildung 78).

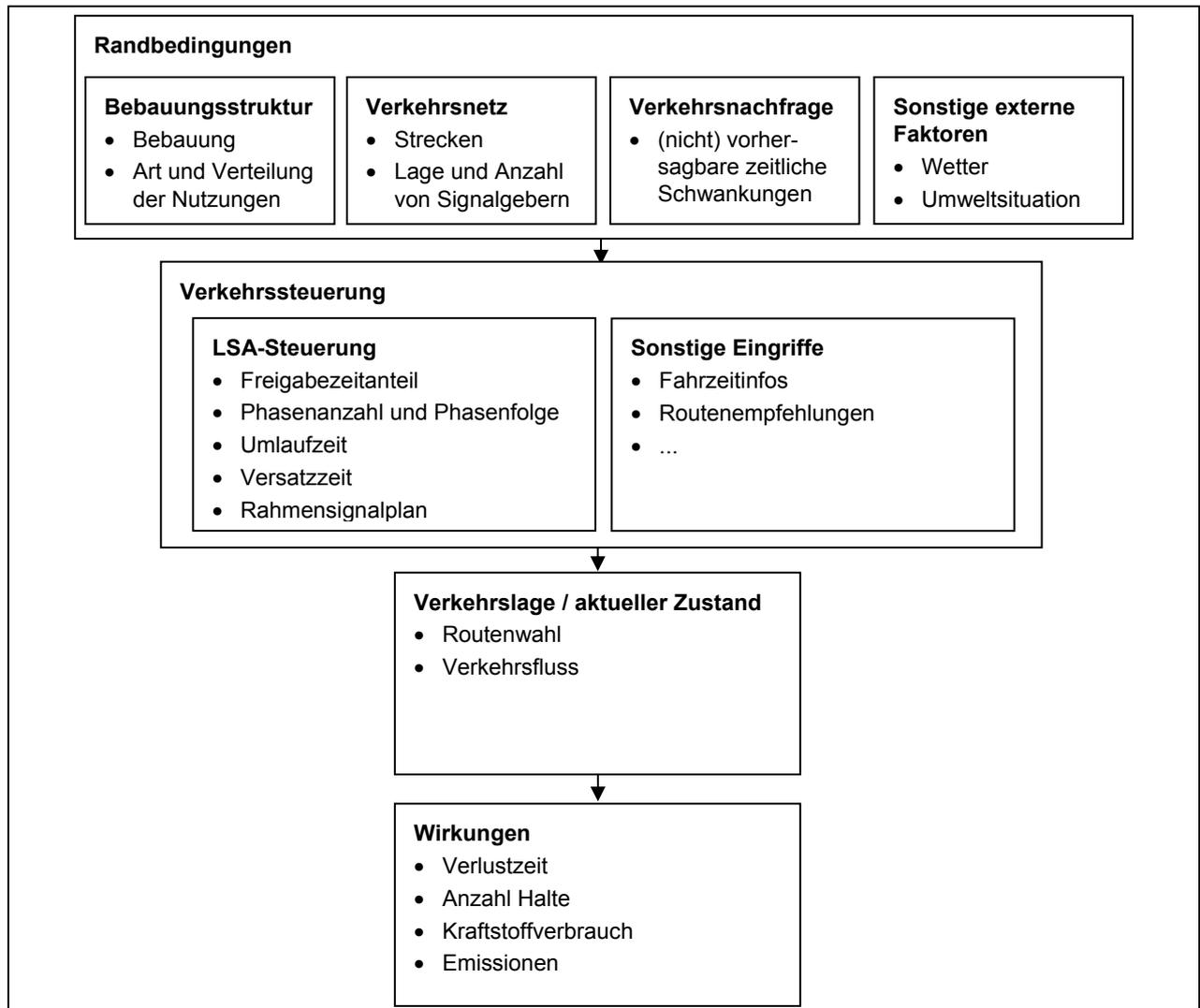


Abbildung 78: Wirkungszusammenhänge für die Typisierung von Anwendungsfeldern.

Um die geeigneten Einsatzbereiche der verschiedenen Steuerungsverfahren voneinander abgrenzen zu können, wird nachfolgend eine mögliche Typisierung von Steuerungsgebieten nach Randbedingungen (Bebauungsstruktur, Verkehrsnetz, Verkehrsnachfrage, sonstige externe Faktoren) und erwünschten Wirkungen (auf verkehrliche und umweltrelevante Kenngrößen) aufgezeigt.

6.1 Randbedingungen

Die Randbedingungen umfassen alle externen Eingangsgrößen, die durch die LSA-Steuerung nicht beeinflusst werden können, bei der Verkehrssteuerung aber berücksichtigt werden müssen:

- **Bebauungsstruktur:**

Die Bebauung kann Auswirkungen auf die Ausbreitung von Luftschadstoffen haben. So kann eine dichte Bebauung z. B. dazu führen, dass ein verminderter Luftaustausch höhere Schadstoffkonzentrationen bewirkt. Ziel einer Steuerung könnte es dann sein, in derartigen Bereichen Rückstausituationen und damit verbundene erhöhte Emissionen möglichst zu vermeiden.

- **Verkehrsnetz:**

Die Struktur des Verkehrsnetzes beeinflusst die Anzahl potenzieller Routen und damit die Aufteilung der Verkehrsnachfrage auf die verschiedenen Knotenpunkte bzw. Knotenströme. Die Lage und die Anzahl der signalisierten Knotenpunkte beeinflusst den Verkehrsfluss, z. B. über eine mehr oder weniger starke Pulkbildung. Zudem steigt mit der Größe und der Komplexität der Struktur des Verkehrsnetzes aufgrund der steigenden Anzahl an Variablen auch die Anzahl der Freiheitsgrade für die Schaltung der Lichtsignalanlagen. Dadurch wird es schwieriger, eine optimale Lösung zu finden. In der Regel treten in Deutschland hauptsächlich Steuerungsgebiete in Form von Linienzügen bzw. sich kreuzenden Linienzügen auf. Vermaschte Netze mit der Möglichkeit mehrerer Alternativrouten treten dagegen bisher selten für ein einzelnes Steuerungsgebiet auf.

- **Verkehrsnachfrage:**

Die Verkehrsnachfrage in einem Steuerungsgebiet und damit die auf den einzelnen Netzelementen zu bewältigende Verkehrsstärke unterliegt mehr oder weniger stark ausgeprägten räumlichen und zeitlichen Schwankungen. Typischerweise differenziert man in eine Schwachverkehrszeit (geringe Auslastung, meist sonn- und feiertags, nachts), eine Nebenverkehrszeit (mittlere bis hohe Belastung, samstags bzw. mittags/früher Nachmittag) und in Hauptverkehrszeiten (hohe Belastung bis zur Überlastung, Morgen- und Abendspitze). Oft wird auch Veranstaltungsverkehr, als Sonderform der Verkehrsnachfrage differenziert. Von besonderer Bedeutung für die Auswahl eines geeigneten LSA-Steuerungsverfahrens ist, ob bzw. wie gut die Schwankungen in der Verkehrsnachfrage in ihrem zeitlichen Eintreffen und in ihrer Stärke vorhersagbar sind.

- **Sonstige externe Faktoren:**

Das Wetter hat direkten Einfluss auf die umweltbezogenen Kenngrößen. Ggf. ist es daher aufgrund der Wetterlage notwendig, zur Optimierung umweltbezogener Kenngrößen auf Wetteränderungen zu reagieren. Der Anteil der Hintergrundbelastung an der Gesamtbelastung beeinflusst die Entscheidung, ob lokal oder flächig wirksame Maßnahmen zu ergreifen sind.

6.2 Verkehrssteuerung

Die Verkehrssteuerung fasst die bestehenden Eingriffsmöglichkeiten in den Verkehrsablauf zusammen. Hier wird unterschieden zwischen der LSA-Steuerung und den sonstigen Eingriffsmöglichkeiten. In der Praxis erscheint es sinnvoll, diese Bereiche miteinander zu kombinieren (z. B. Routenführung und modellbasierte Netzsteuerung). Die dadurch resultierenden Zusammenhänge sollen hier allerdings nicht untersucht werden.

LSA-Steuerungen im Allgemeinen verfügen über die folgenden (indirekten) Stellgrößen:

- **Freigabezeitanteil:**

Der Freigabezeitanteil hat Einfluss auf die Verlustzeiten. Festzeitsteuerungen können diese nur im Rahmen einer tageszeitabhängigen Signalprogrammauswahl verändern. Verkehrsabhängige Steuerungen können die Freigabezeit dynamisch anpassen.

- **Phasenanzahl und Phasenfolge:**

Eine Änderung der Phasenanzahl und Phasenfolge wird in der Regel nur von einer lokalen verkehrsabhängigen Steuerung vorgenommen. In vielen Fällen wird die Beschleunigung des ÖPNV über eine Änderung der Phasenfolge bzw. das Einschleichen einer Bedarfphase bewerkstelligt. Rahmenvorgaben aus einer Netzsteuerung können indirekt auch die lokale Steuerung und somit die Phasenanzahl und Phasenfolge beeinflussen.

- **Umlaufzeit:**

In der Regel wird in einem Steuerungsgebiet die Umlaufzeit über eine tageszeitabhängige Signalprogrammauswahl gesteuert. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass die Umlaufzeit verkehrsabhängig über eine Netzsteuerung geändert wird. Da die Änderung der Umlaufzeit oft einen großen Eingriff in die Steuerung bedeutet und zu Problemen im Verkehrsablauf führen kann, wird die Umlaufzeit bei den meisten Netzsteuerungen nicht mit optimiert und weiterhin tageszeitabhängig gesteuert.

- **Versatzzeit:**

Richtig gewählte Versatzzeiten ermöglichen eine so genannte „Grüne Welle“. Diese ist mit allen Steuerungsverfahren realisierbar, wobei modellbasierte Steuerungsverfahren bei der Versatzzeitoptimierung auf Veränderungen in der Verkehrsnachfrage reagieren und z. B. nachfrageabhängig Hauptrichtungen festlegen können.

Bei Netzsteuerungsverfahren legen üblicherweise Rahmensignalpläne die Wertebereiche für die oben genannten Stellgrößen für einen gewissen Zeitraum fest bzw. ermöglichen die Definition von Bedarfsphasen.

6.3 Verkehrslage

Die Verkehrslage beschreibt die aktuelle Situation, die das Resultat der Randbedingungen und der Verkehrssteuerung ist.

- **Routenwahl:**

Die Routenwahl in einem Verkehrsnetz wird durch eine LSA-Steuerung eher langfristig als Bestandteil eines Lernprozesses beeinflusst werden. Dieser Lernprozess kann durch die LSA-Steuerung über die Vorgabe von Hauptrouten, die regelmäßig bevorzugt geschaltet werden, beeinflusst werden. Grundsätzlich denkbar ist auch eine kurzfristige Beeinflussung der Routenwahl, wenn ein Verkehrsteilnehmer aufgrund des stromabwärts beobachteten Verkehrszustandes (Rückstaulänge, LSA Signalbild) Rückschlüsse auf die Fahrzeit einer Teilroute zieht. Ob und in welchem Umfang derartige spontane Entscheidungen stattfinden, ist nicht bekannt. Für die Bewertung einer LSA-Steuerung kann dieses Phänomen vermutlich vernachlässigt werden.

- **Verkehrsfluss:**

Der Verkehrsfluss wiederum ist direkt von einer LSA-Steuerung abhängig. Die Kenngrößen des Verkehrsflusses (Dichte, Geschwindigkeit, Rückstaulänge) sind Kenngrößen, die direkt oder indirekt gemessen werden können. Sie sind Grundlage für die Beschreibung der Wirkungen.

6.4 Wirkungen

Die Wirkungen umfassen alle Kenngrößen zur Beurteilung der Verkehrslage. Sie beschreiben die Leistungsfähigkeit (Performance) einer LSA-Steuerung:

- **Verlustzeit:**

Die Verlustzeit wird hauptsächlich durch die Grünzeitanteile und die Umlaufzeit beeinflusst, wobei sich kreuzende Fahrtbeziehungen in Konkurrenz zueinander stehen. Von Bedeutung ist die Anzahl betroffener Verkehrsteilnehmer.

- **Anzahl Halte:**

Die Anzahl Halte entlang eines Streckenabschnitts oder innerhalb eines Netzes werden maßgeblich durch die Versatzzeiten und die Umlaufzeit bestimmt. Darüber hinaus besteht eine Korrelation zwischen der Anzahl Halte, dem Kraftstoffverbrauch und den Emissionen.

- **Kraftstoffverbrauch:**

Siehe Anzahl Halte.

- **Emissionen:**

Netzweit besteht ein Zusammenhang zur Anzahl der Halte. Lokal können Emissionen auch durch andere Grünzeitanteile innerhalb des Netzes verlagert werden. Auch wenn es in den bekannten modellbasierten Steuerungsverfahren noch nicht gemacht wird, könnten Emissionen in die Bewertungsfunktion einer modellbasierten Netzsteuerung als zusätzlicher Bestandteil einbezogen werden.

6.5 Ansatz zur Typisierung von Anwendungsfeldern für den Einsatz unterschiedlicher Steuerungsverfahren

Unter Berücksichtigung der oben dargestellten Wirkungszusammenhänge wird nachfolgend eine mögliche Systematik zur Typisierung von Anwendungsfeldern für die verschiedenen Steuerungsverfahren aufgezeigt. Der AK 334 „Netzsteuerung“ der FGSV beschäftigt sich ebenfalls mit möglichen Anwendungsfällen für LSA-Netzsteuerungen. Eine dort entwickelte Systematik enthält in ihrer aktuellen Entwurfsfassung ähnliche Ansätze wie die hier vorgestellte Typisierung. Zwischen den Mitgliedern des Arbeitskreises und den Bearbeitern des Projektes besteht ein diesbezüglicher Austausch.

6.5.1 Typisierung der Steuerungsverfahren

Tabelle 13 zeigt die Typisierung der gängigen Verfahren zur Lichtsignalsteuerung gemäß aktueller RiLSA (FGSV [2010]). Alle dort aufgeführten Varianten können prinzipiell sowohl regelbasiert als auch modellbasiert umgesetzt werden. Aufbauend darauf wurde in AMONES zunächst die in Tabelle 37 dargestellte Systematik für LSA-Steuerungsverfahren entwickelt.

		Lokal (L)	Netzweit (N)
Signalprogrammauswahl (SA)	zeitabhängig	ZLSA	ZNSA
	verkehrsabhängig	RLSA	RNSA
	verkehrsabhängig	MLSA	MNSA
Signalprogrammbildung bzw. -anpassung (SB)	verkehrsabhängig	RLSB	RNSB
	verkehrsabhängig	MLSB	MNSB
R = regelbasiert, M = modellbasiert			

Tabelle 37: Systematik der LSA-Steuerungsverfahren in AMONES.

Diese wurde anschließend nochmals verdichtet, so dass in der Typisierung letztlich folgende sechs Steuerungsverfahren unterschieden werden:

- Die *Festzeitsteuerung (FZS)* stellt eine zeitabhängige Signalprogrammauswahl für die einzelnen Knoten (ZLSA in Tabelle 37) dar.
- Unter einer *lokalen Steuerung (regelbasiert LRS bzw. modellbasiert LMS)* wird hier eine verkehrsabhängige lokale Signalprogrammanpassung (RLSB bzw. MLSB) verstanden.
- Bei der *netzweiten regelbasierten Steuerung (NRS)* kann es sich entweder um eine verkehrsabhängige Signalprogrammauswahl (RNSA) oder eine Signalprogrammbildung bzw. -anpassung (RNSB) handeln.
- Bei den modellbasierten Netzsteuerungen wird nochmals explizit unterschieden in die *netzweite modellbasierte Signalprogrammauswahl (NMSA)* (MNSA in Tabelle 37) und die *netzweite modellbasierte Steuerung (NMS)*, welche die Verfahren zur netzweiten verkehrsabhängigen Signalprogrammbildung bzw. -anpassung (MNSB in Tabelle 37)

umfasst und in AMONES insbesondere durch die untersuchten Verfahren MOTION und BALANCE repräsentiert wird.

6.5.2 Typisierung der Anwendungsfelder

Aus der Kombination der in Abbildung 78 aufgezeigten Randbedingungen mit den beabsichtigten Wirkungen lassen sich die nachfolgend dargestellten Anwendungsfelder ableiten, für die im weiteren Projektverlauf jeweils Aussagen über die Eignung der oben aufgeführten sechs Alternativen zur LSA-Steuerung getroffen werden sollen:

Steuerungsverfahren	FZS	LRS	LMS	NRS	NMSA	NMS
Nachfragestruktur						
• Tageszeitabhängige Variabilität						
• Räumliche Variabilität						
• Situationsabhängige Variabilität (z. B. bei Veranstaltungen)						
• Regelmäßige Überstauung mehrerer Zufahrten eines Knotenpunktes						
Netzstruktur						
• Keine Alternativrouten (geringe Vermaschung)						
• Vorhandene Alternativrouten (hohe Vermaschung)						
• Vorhandene Rückstauräume mit unterschiedlicher Betroffenheit (in Bezug auf die Umweltbelastung) oder unterschiedlichem Grenzwertüberschreitungsrisiko						
Ziele der Steuerung						
• Umweltkriterien sollen berücksichtigt werden						
• Situationsabhängige Optimierung spezifischer Kenngrößen (Anzahl Halte, Wartezeit, ÖV-Wartezeit)						
Gewünschte Funktionalitäten						
• Anpassung der LSA-Steuerung an übergeordnete Strategien einer Verkehrsleitzentrale (z. B. Schaltung strategiekonformer Haupttrouten)						
• Situationsabhängige Zuflussdosierung durch Pfortneranlagen (z. B. bei bestimmten umweltbezogenen Randbedingungen)						
• Situationsabhängige ÖV-Priorisierung						

Tabelle 38: Typisierung der Anwendungsfelder.

6.5.3 Einsatzbereiche modellbasierter Netzsteuerungen

Aufbauend auf den identifizierten Anwendungsfeldern werden nachfolgend einige Thesen zur Eignung der unterschiedlichen Steuerungsverfahren formuliert, welche im weiteren Projektverlauf anhand der Ergebnisse aus den Messungen und den Simulationen überprüft und bewertet werden. Die wesentlichen Ergebnisse sind in Kapitel 11 dargestellt.

Aufgrund der Eigenschaften modellbasierter Steuerungsverfahren können lokale und netzweite modellbasierte Steuerungsverfahren vermutlich dann sinnvoll sein, wenn eine oder mehrere der folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:

- Die Nachfragestruktur weist deutliche zeitliche und räumliche Schwankungen auf. Die Abbiegeanteile an den Knotenströmen verändern sich dadurch deutlich.
- Das Netz ist vermascht und bietet Ausweichrouten.
- Das Netz verfügt über umweltbezogene Ausweichmöglichkeiten, z. B. Streckenabschnitte ohne Bebauung und mit starkem Wind.
- Die zu optimierenden Systemkenngößen (verkehrliche und umweltbezogene Kenngößen) sind komplex und können nur modellbasiert bestimmt werden.
- Mehrere Knotenpunkte im betrachteten Netz weisen regelmäßig in ein oder mehreren Zufahrten Überlastungen auf. Die Überlastungen führen zu unterschiedlich langen Rückstauungen, die von der regelbasierten Steuerung nicht mehr erkannt werden können. Hier führt eine modellbasierte Netzsteuerung zwar wahrscheinlich nicht zu einer höheren Kapazität, sie kann aber Kapazitäten ggfs. gerechter verteilen.
- Störungen die als Folge einer ÖV-Priorisierung entstehen. Lokal regelbasierte Steuerungen können zwar eine ÖV-Priorisierung umsetzen, deren Folgen auf den Verkehrsablauf werden jedoch in der Regel nicht erfasst. Durch Modelle, wie eine Rückstauschätzung, ist dies möglich.

Aus diesen Vermutungen lassen sich folgende Thesen ableiten:

- Eine regelbasierte oder modellbasierte Netzsteuerung (NRS, NMSA oder NMS) ist sinnvoll, wenn sich die Nachfragestruktur räumlich und zeitlich häufig ändert.
- Eine modellbasierte Netzsteuerung (NMS) ist sinnvoll, wenn sich die Routenwahl häufig ändert oder wenn komplexe Wirkungszusammenhänge berücksichtigt werden sollen (verkehrliche und umweltbezogene Kenngößen).

Eine lokale regelbasierte oder modellbasierte Steuerung (LRS oder LMS) ist sinnvoll, wenn im Netz nur wenige kritische Knoten existieren.

7 Festlegung der Testfelder

7.1 Einleitung

Ziel des ersten Meilensteins ist die Festlegung der Testfelder für das Projekt AMONES. Folgende sieben Städte hatten ihre Bereitschaft erklärt, das Forschungsvorhaben durch die Bereitstellung der Testfelder zu unterstützen:

- Bremen (MOTION)
- Bremerhaven (MOTION)
- Braunschweig (MOTION)
- München (BALANCE)
- Reutlingen (BALANCE, MOTION oder UTOPIA)
- Ingolstadt (BALANCE)
- Hamburg (BALANCE)

7.2 Auswahlverfahren

Die Auswahl der Testfelder erfolgt nach den vier folgenden Kriterien:

- Verfügbarkeit einer modellbasierten Netzsteuerung im Jahr 2008,
- Verfügbarkeit von Dauermessstellen für Umweltmessungen und von lokalen Detektoren für die kontinuierliche Erfassung von Verkehrsmengen,
- Netzform des gesteuerten Straßennetzes,
- Auswahl von je einem Testfeld mit MOTION und mit BALANCE.

Um die Situation in den sieben Testfeldern bewerten zu können, wurde ein Fragebogen entwickelt und den Städten im Oktober 2007 zugesandt. Ergänzend fanden telefonische oder persönliche Abstimmungsgespräche statt. Tabelle 39 fasst die entscheidungsrelevanten Antworten der angeschriebenen Städte zusammen.

Kriterium Verfügbarkeit Netzsteuerung

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass eine modellbasierte Verkehrssteuerung nur in den Städten Braunschweig, Bremerhaven, Hamburg und Ingolstadt bereits implementiert ist. Die anderen Städte können keine oder nur bedingt verbindliche Terminzusagen machen, so dass das Auswahlkriterium Verfügbarkeit nicht erfüllt ist.

Kriterium Verfügbarkeit Messstellen Umwelt

- In Braunschweig sind derzeit im Umfeld des Testfelds keine Messstellen verfügbar.

- In Bremerhaven ist derzeit im Umfeld des Testfelds eine Sondermessstelle verfügbar, die aber nur bis Frühjahr 2008 betrieben werden soll. Die Stadt prüft derzeit, ob diese Messstelle bis September weiterbetrieben werden kann.
- In Hamburg existiert im Umfeld des Testfelds eine Messstelle (Habichtstraße).
- In Ingolstadt sind derzeit im Umfeld des Testfelds keine Messstellen verfügbar.

Kriterium Verfügbarkeit Messstellen Verkehr

- In Braunschweig sind Daten inkl. Signalbilder vom Messwert-Archiv abgreifbar. Messwerte (Geschwindigkeit, Verkehrsstärke, Belegung, Fz-Arten) werden mit Über-Kopf-Sensoren erfasst.
- In Bremerhaven liegen die Werte der Induktionsschleifen für die Schleifenzählwerte für Anforderung und Bemessung der LSA vor. Die real geschalteten Signalisierungszustände können für die Dauer der Messungen im Gerätespeicher mitgeschrieben und für die Analysen ausgelesen werden.
- In Hamburg können Verkehrsdaten aus dem FAS System der Firma GEVAS ermittelt werden.
- In Ingolstadt stehen die Werte der LSA Induktionsschleifen zur Verfügung.

Kriterium Netzform

In den beiden BALANCE Testfeldern in Hamburg und Ingolstadt wird die LSA-Steuerung in einem größeren Netz betrieben. In den beiden MOTION Testfeldern wird derzeit nur ein erweiterter Streckenzug gesteuert.

Auswahl Testfelder

Auf der Basis der oben genannten Kriterien und aufgrund kurzfristiger Informationen über eine eingeschränkte Verfügbarkeit des Testfelds Braunschweig haben sich die AMONES Projektpartner für die Städte Bremerhaven und Hamburg als Testfelder entschieden.

Stadt	Netzsteuerungs- verfahren	Verfügbarkeit	Anzahl Knoten- punkte	Aktuelle Steuerung	Netzsteuerung Abschaltbar	Vorhandene Messwerte	VISSIM-Netz	Umweltmess- stationen
Braunschweig	MOTION	läuft, in 2008 nur eingeschränkt verfügbar	6	PDM-TL	Ja	Daten aus Messwert-Archiv	ja	eventuell 2 ab 02/2008
Bremen	MOTION	ab 9/2008	3	k. A.	Ja	Schleifenwerte	wird erstellt	eventuell 1 mobile Station
Bremerhaven	MOTION	ab 3/2008	9	PDM-TL	Ja	Schleifenwerte	nein	eventuell 1 Station bis 09/08
Hamburg	BALANCE	läuft	41	Trends-Trelan	Ja	Daten aus FAS- Archiv	nein	1
Ingolstadt	BALANCE	läuft	46	Trends-Trelan	Ja	Schleifenwerte	nein	0
München	BALANCE	geplant für 2008	29	Trends-Trelan	Ja	Schleifenwerte	teilweise	0
Reutlingen	Noch offen	geplant für 2008	k. A.	Verkehrs- abhängige Steuerung	Ja	Schleifenwerte	nein	k. A.

Tabelle 39: Übersicht über die Rückmeldungen der Städte.



Abbildung 79: Netzplan Hamburg.



Abbildung 80: Netzplan Bremerhaven.

8 Testfeld Bremerhaven

8.1 Verkehrsangebot

8.1.1 Merkmale des Verkehrsnetzes

Das Testfeld Bremerhaven besteht aus zwei Straßenzügen (Columbusstraße, Lloydstraße), die etwa in der Mitte des Testfeldes an einem T-Knoten aufeinander treffen. (siehe Abbildung 80). Es befinden sich insgesamt 9 Lichtsignalanlagen in dem Testfeld, die seit Anfang 2008 mit dem verkehrsadaptiven Netzsteuerungsverfahren MOTION gesteuert werden.

Beim Testfeld Bremerhaven handelt es sich um einen Linienzug. Durch die geknickte Form und die sich außerhalb des Testfeldes befindlichen Alternativroute, sowie den Zielen innerhalb des Testfeldes, in Form der Fußgängerzone mit 3 großen Parkhäusern und der Abfahrt zum Containerhafen wird dieser Linienzug allerdings selten komplett durchfahren. Die Columbusstraße aus Süden kommend ist bis zu den Parkhäusern 3-streifig ausgebaut. Es treten hier keine Behinderungen durch längsparkende Fahrzeuge auf, zudem gibt es auch keine Störungen durch bedingtverträgliche Fußgängerströme. Die Lloydstraße ist durchgehend 2-streifig. Für Rechtsabbieger gibt es in der Regel keinen eigenen Fahrstreifen, sodass es zu Störungen beim bedingt verträglichen rechtsabbiegen kommen kann. Die Störungen durch Längsparker sind gering.

8.1.2 Verkehrssteuerung

In Bremerhaven wird das adaptive modellbasierte Netzsteuerungsverfahren MOTION verwendet. Das Netz in dem dieses Verfahren zum Einsatz kommt umfasst neun Lichtsignalanlagen entlang des Straßenzuges der Lloydstraße und der Columbusstraße. Die Steuerung erlaubt es dabei verschiedene Verfahren und Abstufungen, wie zum Beispiel eine Festzeitsteuerung, eine lokale regelbasierte Steuerung oder eine Netzsteuerung (MOTION) zu schalten. Die LSA-Schaltungen werden vom Verkehrsrechner mitgeschrieben und können ausgelesen werden.

Im Netz befinden sich an allen Lichtsignalanlagen Induktionsschleifen, die auf 90-Sekunden-Intervalle aggregierte Verkehrsstärken, Belegungswerte und Geschwindigkeiten aufzeichnen. Die Messdaten der Detektoren werden einer Plausibilitätsprüfung unterzogen.

8.2 Verkehrsnachfrage

8.2.1 Merkmale der Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage in Bremerhaven unterliegt während der beiden untersuchten Wochen im Februar 2009 keinen auffälligen zeitlichen oder räumlichen Schwankungen. Folgende Merkmale

sind zu beobachten (Struktur und Variabilität der Verkehrsnachfrage werden außerdem im Rahmen der Clusterung in Kapitel 8.5.2.2 beschrieben):

1. Tageszeitabhängige Variabilität

Die Nachfrage im gesamten Netz ist nachts sehr niedrig und steigt von ca. 5:00 Uhr bis 8:00 Uhr. Im weiteren Verlauf des Tages ist ein leichter Anstieg der Nachfrage bis 17:00 Uhr zu beobachten - es gibt keine typische Abnahme der Nachfrage zur Mittagszeit. Ab ca. 17:00 Uhr nimmt die Nachfrage kontinuierlich ab, um ab 0:00 Uhr den nächtlichen Tiefpunkt zu erreichen.

Dieser Verlauf ist im gesamten Netz ähnlich zu beobachten - lediglich auf der Grimsbystraße ist stadteinwärts eine schwach ausgeprägte Morgenspitze (und stadtauswärts eine Nachmittagsspitze) zu verzeichnen. Dieser Knotenpunkt ist auch der Einzige an dem sich beobachten lässt, dass sich das feierabendliche Verkehrsgeschehen an den beiden Freitagen etwas früher abspielt.

Eine tageszeitabhängige Variabilität der Nachfrage ist während der beiden untersuchten Februarwochen in Bremerhaven kaum zu beobachten. Wobei sich dies in den Sommermonaten aufgrund der tourismusbedingten Zunahme der Verkehrsnachfrage anders verhalten könnte.

2. Räumliche Variabilität:

Während des Untersuchungszeitraums ist, von leichten Ausnahmen im Feierabendverkehr (wobei die Verkehrsteilnehmer im Allgemeinen nach einem Umlauf abfließen konnten) abgesehen, kein Knotenpunkt überstaut.

Eine räumliche Variabilität ist, ähnlich wie eine tageszeitabhängige Variabilität, kaum vorhanden.

8.3 Umweltsituation

8.3.1 Umweltrelevante Merkmale

In der entwickelten Typisierung wurden für eine mögliche Optimierung der Netzsteuerung nach Umweltkriterien die folgenden Randbedingungen bzw. Faktoren als relevant identifiziert:

- Bebauungsstruktur
 - Bebauung
 - Art und Verteilung der Nutzungen
- Externe Faktoren
 - Meteorologie
 - Umweltsituation

Die allgemeine Umweltsituation im Testfeld wird als wichtigste Randbedingung eingestuft: Falls grundsätzlich kein Grenzwertüberschreitungsrisiko für die betrachteten Schadstoffe besteht wird kein Handlungsbedarf im Sinne einer Optimierung nach Umweltkriterien gesehen. Sofern ein

Grenzwertüberschreitungsrisiko vorliegt, der Verursacheranteil des Verkehrs jedoch sehr niedrig ist, ergibt sich folglich kein Optimierungspotenzial.

Für das Testfeld Bremerhaven ist Ersteres der Fall. Die im Jahr 2006 durchgeführte Untersuchung „Messprogramm Verkehr Stresemannstraße in Bremerhaven“ weist für die untersuchten Schadstoffe keinen Handlungsbedarf aus.

Die durchgeführten Untersuchungen im Rahmen von AMONES haben für Bremerhaven folglich primär dem Erkenntnisgewinn in Bezug auf die Zusammenhänge zwischen Verkehrs- und Umweltkenngößen und die Optimierungspotenziale einer Verkehrssteuerung.

8.3.2 Umweltmesstechnik

In der Stadt Bremerhaven sind derzeit zwei Umweltmessstationen in Betrieb, können für die Feldmessungen aber nur mit Einschränkungen eingesetzt werden:

Die Umweltmessstation Cherbourgerstraße liegt in einer Entfernung von ca. 5 km vom Testfeld und ist somit zu weit entfernt, um auf Grundlage der dortigen Messdaten Aussagen zu den Wirkungen der Netzsteuerung treffen zu können.

Eine weitere Luftmessstation wird in der HansasträÙe betrieben und ist somit näher (1,5 km) am Testgebiet, jedoch immer noch zu weit entfernt, um aus den Daten projektrelevante Aussagen zu treffen. Zusätzlich könnten die Messdaten in der HansasträÙe durch die Emissionen des Schiffsverkehrs verfälschte Ergebnisse aufweisen.

8.4 Messszenarien

Im Rahmen des Projekts AMONES war es möglich in jedem Testfeld Erhebungen an zehn Tagen durchzuführen. Um Erkenntnisse für den stufenweisen Aufbau von modellbasierten Steuerungsverfahren zu gewinnen, wurden die folgenden drei, in der Komplexität aufsteigenden Steuerungsverfahren untersucht (in Klammern die Abkürzung, die in nachfolgenden Abbildungen verwendet wird):

- Festzeitsteuerung (FZS)
- Lokal regelbasierte Steuerung mit Priorisierung des öffentlichen Verkehrs (LRS)
- MOTION mit lokaler regelbasierter Steuerung und Priorisierung des öffentlichen Verkehrs (MOTION)

Um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Steuerungsverfahren auf die verschiedenen Wochentage und den zu erwartenden Verkehrsstärken zu erreichen, wurden die Messszenarien entsprechend Tabelle 40 verteilt. Die Erhebungen wurden an jedem Tag von 6:30-18:30 Uhr durchgeführt (siehe auch Kapitel 5.1.12).

Datum	Wochentag	Steuerungsverfahren
16.2.2009	Montag	Festzeitsteuerung
17.2.2009	Dienstag	MOTION
18.2.2009	Mittwoch	Lokal regelbasierte Steuerung
19.2.2009	Donnerstag	MOTION
20.2.2009	Freitag	Festzeitsteuerung
23.2.2009 ¹	Montag	MOTION
24.2.2009	Dienstag	Lokal regelbasierte Steuerung
25.2.2009	Mittwoch	Festzeitsteuerung
26.2.2009	Donnerstag	Lokal regelbasierte Steuerung
27.2.2009	Freitag	MOTION
<p>1 Die Umstellung von Festzeit auf MOTION erfolgte am 23.2.2009 um 8:07 Uhr. Dies hat zur Folge, dass für diesen Tag im Zeitraum 6:30-7:30 Uhr eine Stunde FZS zur Bewertung vorliegt. Die unterbrochene Stunde 7:30-8:30 Uhr wird von der Bewertung ausgenommen und alle nachfolgenden Stunden werden dem Verfahren MOTION zugeordnet.</p>		

Tabelle 40: Erhebungstage und Steuerungsverfahren im Testfeld Bremerhaven.

8.5 Ergebnisse

8.5.1 Bereits durchgeführte Untersuchungen Dritter

8.5.1.1 Untersuchungen zur Verkehrssteuerung

Im Testfeld Bremerhaven wurden bisher keine Untersuchungen durchgeführt, die als Vergleichsbasis oder zur zusätzlichen Auswertung geeignet wären.

8.5.1.2 Untersuchungen zu Umweltaspekten

Im Testfeld Bremerhaven wurden bisher keine Untersuchungen durchgeführt, die als Vergleichsbasis oder zur zusätzlichen Auswertung geeignet wären. Allerdings wurde eine Reihe von Untersuchungen zur Bewertung der Luftqualität und zu möglichen Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität durchgeführt. Nachstehend sind die Bezeichnungen der Untersuchungen aufgeführt, eine kurze Zusammenfassung der Untersuchungen kann dem Anhang entnommen werden.

- Messprogramm Verkehrsimmissionen 1999
- Messprogramm Verkehrsimmissionen 2000
- PM₁₀ Messprogramm Bremerhaven 2003
- Messprogramm Verkehrstation Stresemannstraße in Bremerhaven 2005/2006
- Luftreinhalte- und Aktionsplan Bremen

8.5.2 Auswertung verkehrlicher Kenngrößen

Die Auswertung der verkehrlichen Kenngrößen erfolgt analog zur im Kapitel 5.1.12 beschriebenen methodischen Vorgehensweise. In den folgenden Unterkapiteln werden die testfeldspezifischen Besonderheiten und die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Die eingesetzten Verfahren werden detailliert in Kapitel 5.1.12 beschrieben. Eine vollständige Auflistung aller erhobenen Daten findet sich im Anhang.

8.5.2.1 Messstandorte und GPS-Routen

Die Standorte der ANPR-Systeme (rote Symbole), der Knotenpunkte/LSAs (grüne Sterne) und das Untersuchungsgebiet (schwarz umrandeter Bereich) sind Abbildung 81 entnehmen.

An allen drei Standorten wurde der Verkehr in beide Richtungen mit je einem ANPR-System erfasst, so dass die in Tabelle 41 aufgelisteten Relationen beobachtet werden konnten. Die dort enthaltenen Bezeichner und Symboliken werden im Folgenden in den Abbildungen verwendet. Die Längen der Routen entsprechen den mittleren gemessenen Längen der GPS-Fahrten. Die Routen folgen dabei den gelben Hauptstraßen (Columbusstraße und Lloydstraße / Grimsbystraße).

An der Messstelle eins hat der beobachtete Querschnitt drei Fahrstreifen je Richtung und an den Messstellen zwei und drei einen Fahrstreifen je Richtung. Wobei sich die Fahrstreifenanzahl stadtauswärts (Richtung Nordosten) an der Messstelle drei von eins auf zwei erhöht, die Fahrzeuge aber noch keine Gelegenheit haben sich zu überholen und damit zu verdecken.

Auf zwei (1-3 und 3-1) der potentiell beobachtbaren sechs Relationen ist es aufgrund des geringen Durchgangsverkehrs nicht möglich eine verwertbare Fahrzeit zu erfassen beziehungsweise zu berechnen. Der geringe Durchgangsverkehr resultiert dabei daraus, dass Verkehrsteilnehmer die Quellen und Ziele haben, die sie an diesen Messstationen vorbeiführen würden, das Messgebiet gleich komplett umfahren (nordöstlich von Messstelle drei befindet sich zunächst kein bebautes Gebiet). Diese beiden Relationen sind deshalb im Folgenden von der Bewertung ausgenommen. Aufgrund der eher geringen Anzahl von sechs Relationen ist es jedoch möglich alle Relationen regelmäßig mit dem GPS-Messfahrzeug zu befahren.

Die Daten der ANPR-Systeme sind Grundlage der Kalibrierung der Simulationen. Die beobachteten Routen der Systeme werden in der Simulation als Haupttrouten extra ausgewertet. Dies entspricht auch der Optimierungsstrategie der Steuerungsverfahren in Bremerhaven.

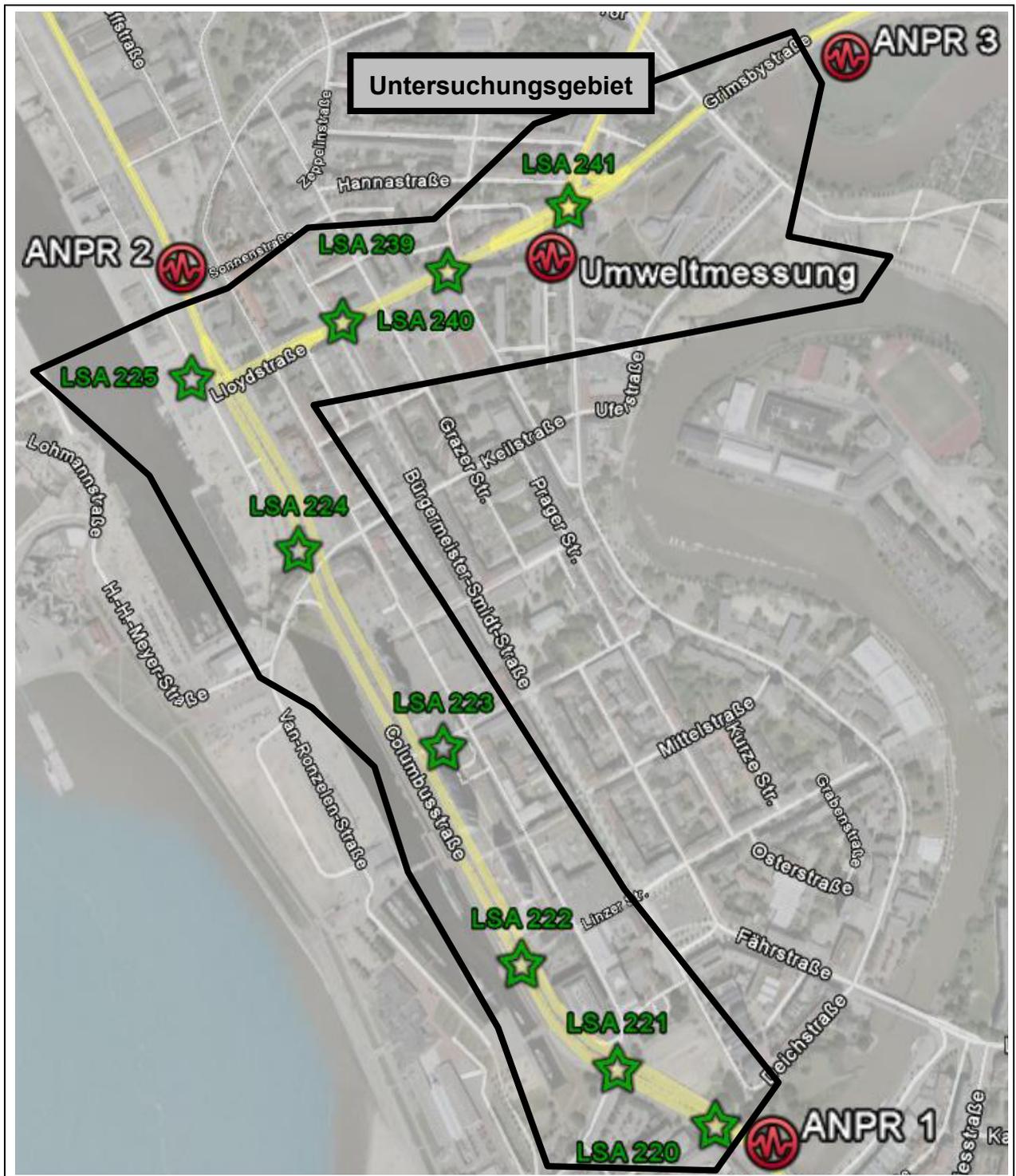


Abbildung 81: Übersicht Messstandorte in Bremerhaven (Bildquelle: GoogleEarth).

Von-Nach	Symbolik	GPS-Erhebung	Länge [km]
1-2	↑	Ja	1,199
1-3	↗	Ja	1,982
2-1	↓	Ja	1,186
2-3	↘	Ja	0,923
3-1	↖	Ja	1,978
3-2	←	Ja	0,909

Tabelle 41: Erfasste Relationen in Bremerhaven.

8.5.2.2 Clusterung der Verkehrsnachfrage

Da aufgrund der unterschiedlichen Anteile der erfasste Durchgangsverkehr keine Basis für die Beschreibung der Verkehrsnachfrage bildet, werden sechs RMQs (Tabelle 42) zur Clusterung der Verkehrsnachfrage ausgewählt.

Name	Beschreibung
1 einfahrend	Verkehrsstrom nach Norden an der Messstelle 1. Setzt sich aus den von Siemens definierten Detektoren MQ002 und MQ003 zusammen, wobei kleinere Korrekturen notwendig sind.
2 einfahrend	Verkehrsstrom nach Süden an der Messstelle 2. Basiert auf der interpolierten manuellen Querschnittszählung an dem ANPR-Messstandort 2.
3 einfahrend	Verkehrsstrom nach Westen an der Messstelle 3. Setzt sich aus den von Siemens definierten Detektoren MQ035 und MQ036 zusammen.
4 einfahrend	Verkehrsstrom nach Süden an LSA 241 (aus der Hafestraße). Setzt sich aus den von Siemens definierten Detektoren MQ029, MQ030 und MQ031 zusammen.
Columbusstr -> Lloydstr	Aus Süden kommender Rechtsabbieger an der LSA 225. Setzt sich aus dem von Siemens definierten Detektor MQ019 zusammen, wobei kleinere Korrekturen notwendig sind.
Lloydstr -> Columbusstr	Aus Osten kommender Linksabbieger an der LSA 225. Setzt sich aus dem von Siemens definierten Detektor MQ018 zusammen.

Tabelle 42: RMQs für die Nachfrageverkehrsstärken.

Die ersten vier Verkehrsströme repräsentieren dabei alle relevanten in das Messgebiet einfahrenden Ströme und somit die Verkehrsmenge, die von der LSA-Steuerung bewältigt werden muss. Die beiden letzten Verkehrsströme berücksichtigen die Abbieger, die der Hauptkoordinierungsrichtung des Steuerungsgebiets folgen. Abbildung 82 zeigt beispielhaft den Verlauf der Rohdaten und der korrigierten Daten, die als Eingang für die Clusterung verwendet werden.

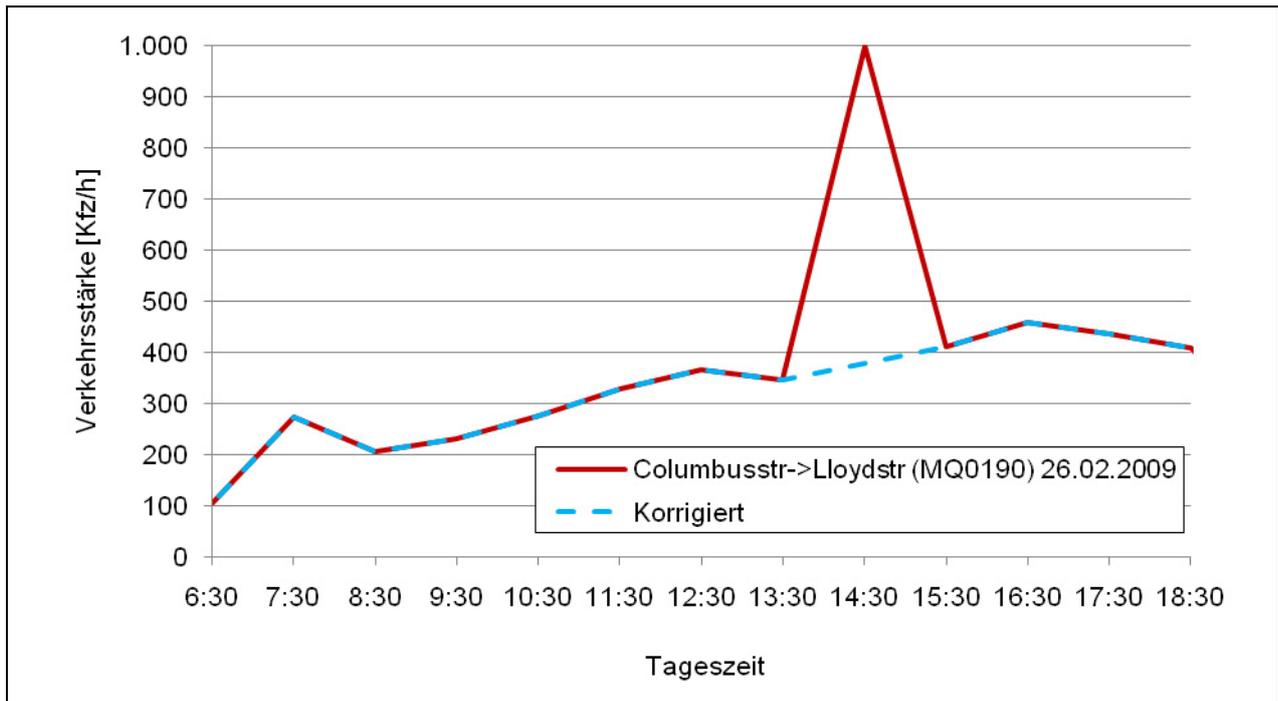


Abbildung 82: Beispiel für die Nachfrageverkehrsstärke in Bremerhaven.

Auf diesen Verkehrsstärken basierend werden 117 Stunden geclustert. Vier Stunden können aufgrund von Ausfällen der Messgeräte oder Störungen in der LSA-Steuerung nicht berücksichtigt werden (16.2.2009 10:30-11:30 Uhr, 18.2.2009 11:30-12:30 Uhr, 23.2.2009 8:30-9:30 Uhr und 23.2.2009 17:30-18:30 Uhr). Mit einem Grenzwert der Distanz (siehe Kapitel 5.1.12.3) für die Zusammenführung von Clustern von 3,55 ergeben sich sechs Cluster, die in Abbildung 83 visualisiert sind und die Grundlage für die Bewertung bilden. Aufgrund der eher flachen Ganglinien der Verkehrsstärken ist dieser Wert im Vergleich zu Hamburg niedriger (siehe Kapitel 9.5.2.2) und hat damit eine strengere Trennung zur Folge (wobei die Zahl der Cluster aufgrund der weniger unterschiedlichen Verkehrsstärken trotzdem kleiner ist).

In Abbildung 83 werden alle 120 Stunden durch ein Dreieck repräsentiert. Die Position entlang der X- und Y-Achse gibt Aufschluss über den Wochentag beziehungsweise die Stunde des Tages. Das jeweils obere linke Dreieck steht dabei für die erste Messwoche (KW 8) und das untere rechte Dreieck für die zweite Messwoche (KW 9). Die Einfärbung erfolgt abhängig von dem Cluster in den die jeweilige Stunde gehört, wobei die Stunden, die aufgrund von Störungen nicht in die Bewertung (und die Clusterung) einfließen, in der Farbe Weiß hervorgehoben sind. Die sechs entstandenen Cluster, die Anzahl darin enthaltener Stunden und der Mittelwert der Summe der Nachfrageverkehrsstärken sind in Tabelle 43 aufgeführt. Im Folgenden soll analysiert werden, warum die jeweiligen Cluster entstanden und ob die Resultate plausibel sind.

Cluster	1	2	3	4	5	6
Anzahl Stunden	28	17	45	17	9	1
Mittlere Summe der Nachfrageverkehrsstärken	2.844	2.749	3.031	3.412	2.415	2.608

Tabelle 43: Cluster für Bremerhaven.

Abbildung 84 zeigt die „Kurve“ (die Verbindung der einzelnen Punkte hat dabei nur den Sinn, der visuellen Hervorhebung) der sechs Nachfrageverkehrsstärken und deren Summe für alle 117 geclusterten Stunden und vermittelt einen groben Überblick über die Ähnlichkeit der Stunden, die in denselben Clustern gelandet sind. Abbildung 85 wiederum enthält Kurven der mittleren Werte der Stunden, die einen Cluster bilden (ohne die in Tabelle 43 bereits enthaltene Summe).

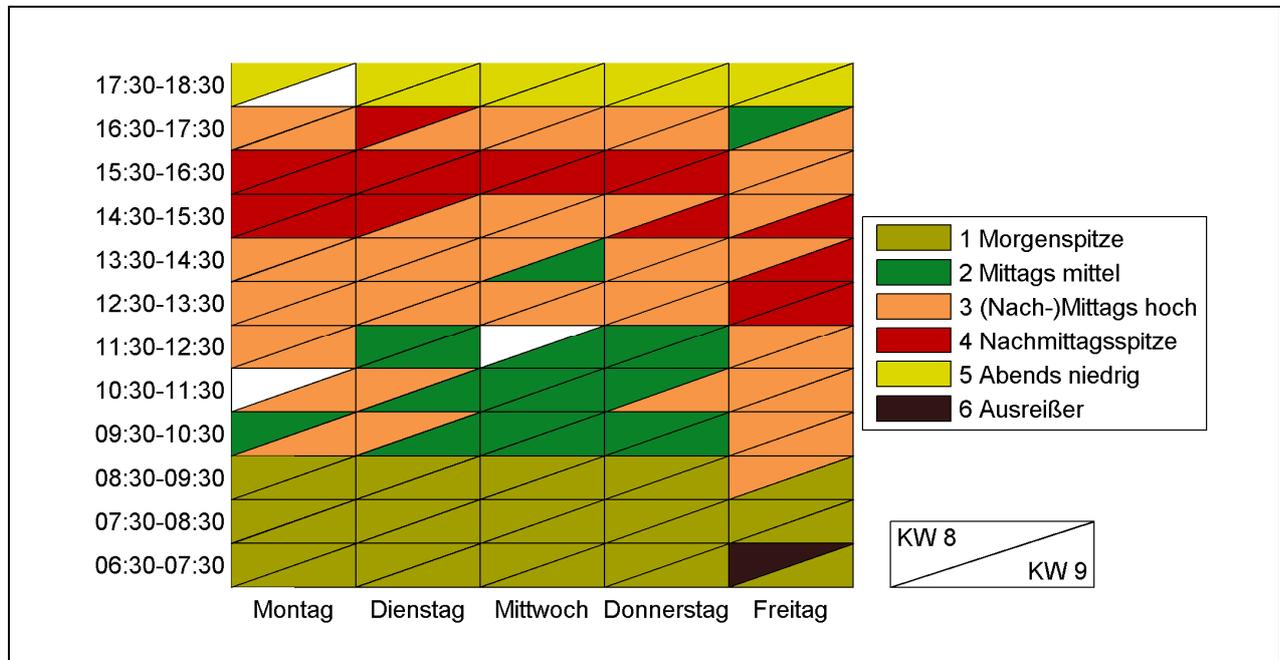


Abbildung 83: Übersicht der Clustering für Bremerhaven.

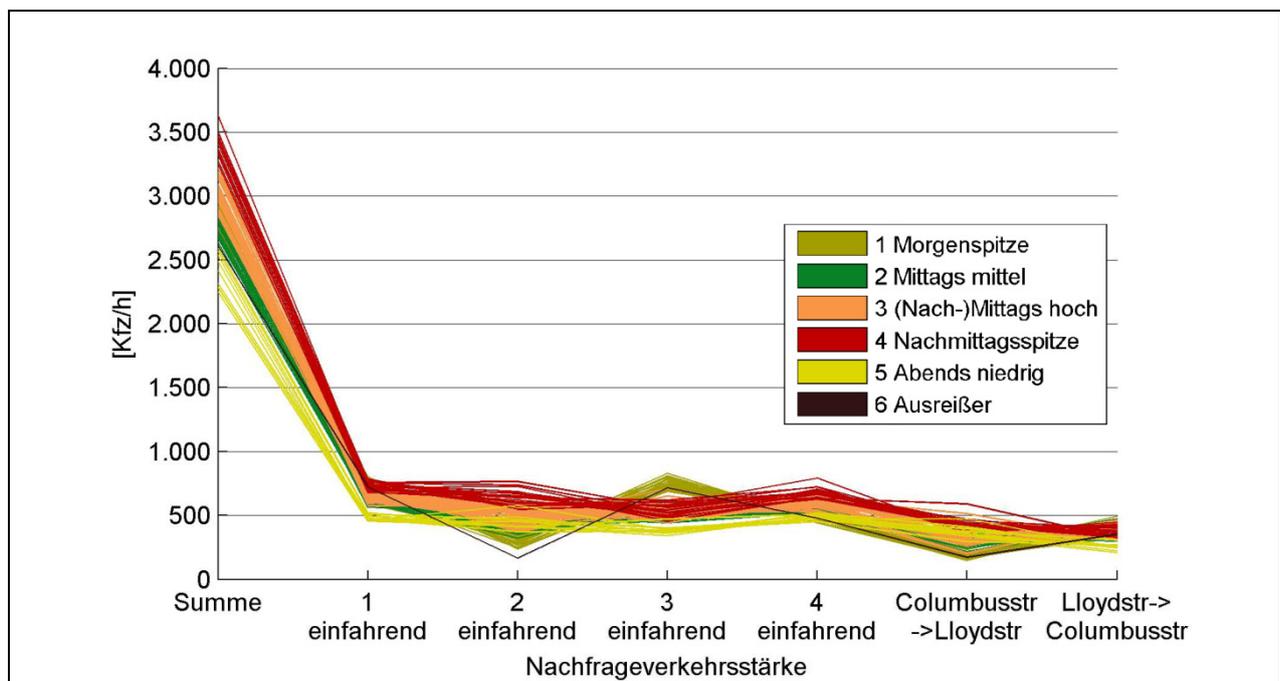


Abbildung 84: Geclusterte Nachfrageverkehrsstärken für Bremerhaven.

Die Cluster und deren Eigenschaften lassen sich wie folgt klassifizieren und beschreiben (die Begriffe „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ beziehen sich hier stets auf die Vergleiche innerhalb von Bremerhaven):

- Cluster 1: Vormittagscluster mit mittlerer Verkehrsstärke - Morgenspitze
Abgesehen von jeweils zwei Ausreißern befinden sich die Stunden in diesem Cluster zwischen 6:30-9:30 Uhr und alle Stunden dieses Zeitraums in diesem Cluster (Abbildung 83). Die Struktur von Cluster 1 unterscheidet sich deutlich von den übrigen Clustern und repräsentiert die Morgenspitze in Bremerhaven (Abbildung 85).
- Cluster 2: Mittagscluster mit mittlerer Verkehrsstärke
Dieser Cluster weist eine ähnliche Struktur wie Cluster 3 auf. Der Unterschied zwischen diesen beiden Clustern besteht in den unterschiedlich hohen Verkehrsstärken, die bei Cluster 2 durchweg niedriger sind (siehe Abbildung 85 und Tabelle 43). Die enthaltenen Stunden finden sich, von zwei Ausreißern abgesehen, (KW 8 Freitag 16:30-17:30 Uhr und KW 9 Mittwoch 13:30-14:30 Uhr siehe Abbildung 83) in den frühen Mittagsstunden.
- Cluster 3: (Nach-)Mittagscluster mit hoher Verkehrsstärke
Cluster 3 beinhaltet Stunden die strukturell ähnlich zu Cluster 2 sind und eine dazu verhältnismäßig hohe Verkehrsstärke aufweisen (Abbildung 85). Abgesehen von dem an Querschnitt 2 einfahrenden Verkehr ist die Struktur der Nachfrage außerdem ähnlich zu der von Cluster 4, wobei dort die Verkehrsstärken noch höher sind. Die Stunden von Cluster 3 decken die Zeiträume zwischen Morgen- und Nachmittagsspitze, sowie nach der Nachmittagsspitze ab (Abbildung 83). An den beiden Freitagen ist zu erkennen, dass die Verkehrsstärken früher ansteigen (und sinken), wodurch Cluster 2 mit den niedrigeren Verkehrsstärken morgens „ausgelassen“ wird.

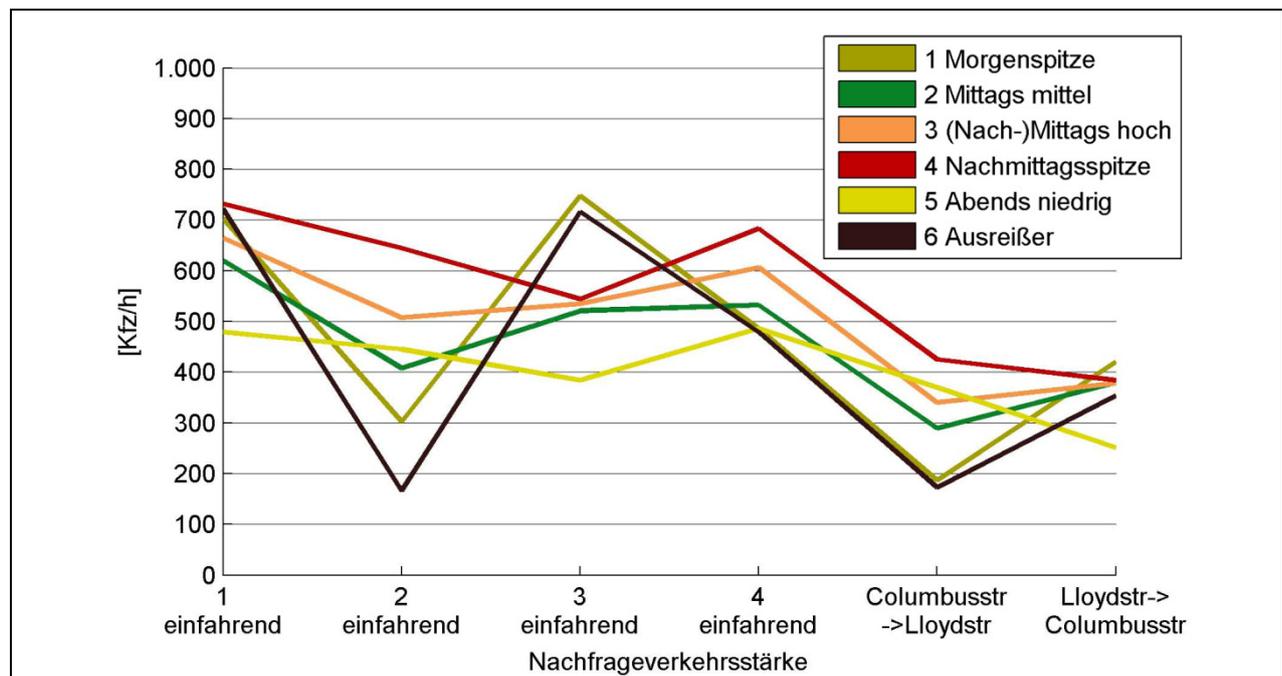


Abbildung 85: Geclusterte mittlere Nachfrageverkehrsstärken (ohne Summe) für Bremerhaven.

- Cluster 4: Nachmittagscluster mit hoher Verkehrsstärke - Nachmittagsspitze
Die Stunden dieses Clusters weisen die deutlich höchsten Verkehrsstärken auf (Abbildung 85 und Tabelle 43) und finden sich von Montag bis Donnerstag größtenteils von 14:30-16:30 Uhr (Abbildung 83). An den Freitagen tritt diese Spitzenbelastung früher auf.
- Cluster 5: Abendcluster mit niedriger Verkehrsstärke
Alle Stunden dieses Clusters finden sich von 17:30-18:30 Uhr (Abbildung 83) - genauso wie sich (abgesehen von der nicht bewerteten Stunde) alle diese Stunden in diesem Cluster befinden. Dieser Cluster hat seine eigene Struktur und weist die niedrigste Verkehrsstärke überhaupt auf (Abbildung 85 und Tabelle 43).
- Cluster 6: Ausreißer
Dieser Cluster ist der Einzige der nur aus einer Stunde (KW 8 Freitag 6:30-7:30 Uhr) besteht. Die Struktur ähnelt Cluster 1, wobei die Verkehrsstärken etwas niedriger sind (Abbildung 85). Insbesondere der einfahrende Verkehr am Messstandort 2 und der Abbieger von der Lloydstraße in die Columbusstraße liegen auffallend unter denen von Cluster 1 und sind der Grund, warum diese Stunde in einem eigenen Cluster verbleibt. Lediglich Cluster 5 weist für den Abbieger in die Columbusstraße niedrigere Werte auf (Abbildung 85). Die Stunden dieses Clusters finden sich allerdings allesamt in den späten Nachmittagsstunden (Abbildung 83) und weisen insgesamt eine deutlich andere Struktur und Verkehrsstärke auf.

Insgesamt ist das Ergebnis der Clusterung plausibel und nachvollziehbar. Im Vergleich zu einer rein tageszeitbasierten Zusammenfassung werden Ausreißer erkannt und dementsprechend um- beziehungsweise aussortiert.

Für die Simulation des Testfelds Bremerhaven werden die Verkehrsdaten des 25.2.2009 verwendet. Es wird hierbei der komplette Tag für verschiedene Steuerungsverfahren simuliert. Dazu werden für diesen Tag auch die Stunden außerhalb der Messungen für diesen Tag, wie oben beschrieben, geclustert.

Eine Ausnahme bilden hier die Stunden mit weniger als 2.000 Fahrzeugen im Netz. Da die Auslastung bei einer Belastung von unter 2.000 Fahrzeugen im Netz an den einzelnen Knoten bei der Mindestumlaufzeit von 60 Sekunden extrem niedrig ist und die Charakteristik der Nachfrage sich in diesen Stunden nicht grundlegend ändert, werden diese Stunden in einem einzigen Cluster zusammengefasst. Es ergibt sich für die Simulation damit die in Abbildung 86 dargestellte Clusterübersicht.

Für die Simulation sind so vier zusätzliche Cluster vorhanden:

- Cluster 7: Morgencluster mit niedriger Verkehrsstärke
Das Cluster ähnelt der Morgenspitze. Es verfügt aber über deutlich geringere Verkehrsstärken.
- Cluster 8: Abendcluster mit sehr niedriger Verkehrsstärke
Das Cluster ähnelt dem Abendcluster mit niedriger Verkehrsstärke, weist aber eine noch niedrigere Belastung auf.

- Cluster 9: Nachtcluster mit sehr niedriger Belastung
Nachts ist keine klare Struktur in der Verkehrsnachfrage zu erkennen. Die Verkehrsnachfrage in diesem Cluster ist sehr gering.
- Cluster 10: Nachtcluster mit extrem niedriger Belastung
Wie in Cluster 9 ist auch hier keine klare Struktur in der Verkehrsnachfrage zu erkennen. Die Verkehrsnachfrage ist extrem niedrig.

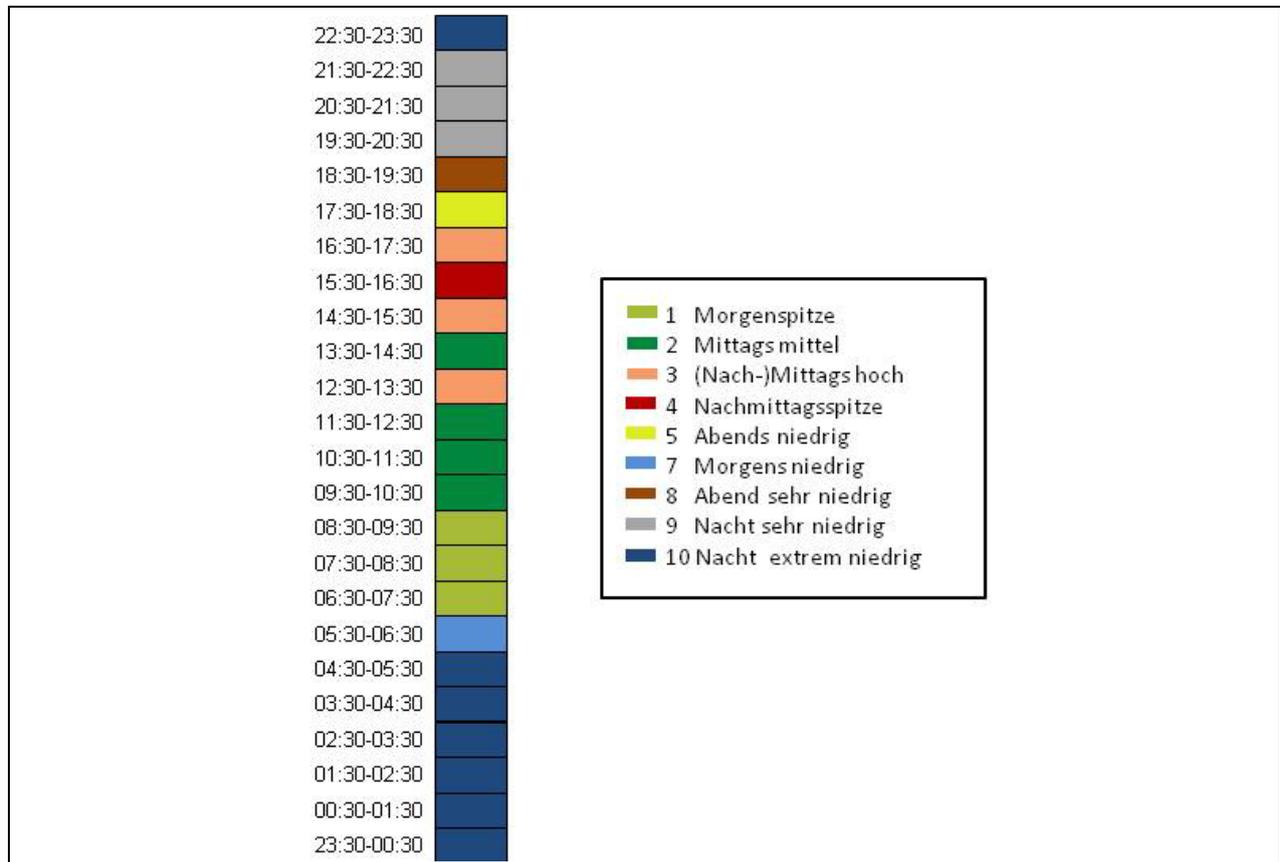


Abbildung 86: Geclusterte Nachfrageverkehrsstärken für Bremerhaven am 25.2.2009.

8.5.2.3 Bewertung und Analyse

Grundlagen

Im Testfeld Bremerhaven wurden die in Tabelle 44 aufgeführten Daten gemessen. Die Tabelle verdeutlicht, dass auf den Relationen 1-3 und 3-1 zu wenige Fahrzeiten für eine Bewertung vorhanden sind. Insbesondere ist der Großteil dieser Fahrzeiten als gebrochener Durchgangsverkehr zu bezeichnen, da die in Kapitel 5.1.12 beschriebene Filterung nicht funktioniert, wenn es fast nur gebrochenen Durchgangsverkehr gibt. Deswegen stützt sich die Bewertung auf die übrigen vier Relationen.

Die Bewertungsverkehrsstärken (siehe Kapitel 5.1.12) setzen sich gemäß Tabelle 45 zusammen. Das heißt die auf den jeweiligen Relationen erhobenen Fahrzeiten werden zur Berechnung von mittleren Fahr- und Verlustzeiten mit diesen Verkehrsströmen quantifiziert.

Dabei wird die Annahme getroffen, dass alle Fahrzeuge, die das Untersuchungsgebiet an einem bestimmten Querschnitt befahren, gemäß der dortigen Aufteilung, von der vollen Fahrzeit einer Relation durch das Untersuchungsgebiet betroffen sind. Diese Pauschalisierung stützt sich darauf, dass zwar nicht alle Fahrzeuge das Untersuchungsgebiet komplett durchfahren, aber

1. jedes Fahrzeug das Untersuchungsgebiet wieder verlassen muss und dadurch die Strecke zweimal zurücklegt und
2. im Mittel die Fahrziele im Untersuchungsgebiet in etwa gleich weit von den Einfahrtsquerschnitten entfernt sind.

Demzufolge kann pauschal jedes Fahrzeug, welches in das Untersuchungsgebiet hineinfährt mit einer vollen Durchgangsfahrzeit in die Bewertung einfließen.

Relation	ANPR-Fahrzeiten		GPS-Fahrten	
	Gesamt	Je Stunde	Gesamt	Je Stunde
1-2	12.429	104	185	1,5
1-3	864	7	175	1,5
2-1	13.763	115	202	1,7
2-3	5.411	45	180	1,5
3-1	1.246	10	172	1,4
3-2	5.323	44	191	1,6

Tabelle 44: Erhobene Daten in Bremerhaven.

Relation	Verkehrstrom	Datenquelle
1-2	1 einfahrend	Wie Nachfrageverkehrsstärke (siehe Tabelle 42).
3-2	3 einfahrend	Wie Nachfrageverkehrsstärke (siehe Tabelle 42).
2-1	2 einfahrend	Wie Nachfrageverkehrsstärke (siehe Tabelle 42). Aufteilung nach dem Verhältnis des erfassten Durchgangsverkehrs 2-1 und 2-3.
2-3		

Tabelle 45: Bewertungsverkehrsstärken in Bremerhaven.

Bewertung

Vergleich zweier Tage

Insgesamt muss festgestellt werden, dass aufgrund der relativen niedrigen Verkehrsstärken, während der gesamten Erhebungszeit kein Überlastungszustand aufgetreten ist. Abbildung 87, die die Fahrzeiten an zwei Donnerstagen zeigt, verdeutlicht dies.

In dieser Darstellung scheint MOTION (oben) etwas besser abzuschneiden, wobei die Belastungen am 26.2.2009 von 10:30-11:30 Uhr und 14:30-15:30 Uhr etwas höher sind (vergleiche Abbildung 83) - deshalb werden zur Bewertung auch Stunden desselben Clusters und nicht desselben Wochentages verglichen. In der Klassifizierung der Anzahl Halte schneidet MOTION besser ab, da die Umlaufzeit zur Mittagszeit nicht von 90 auf 70 Sekunden reduziert

wird. Ein Unterschied, der die Anzahl Halte reduzieren kann, aber zusätzlich dem Verfahren zur Ableitung der Anzahl Halte entgegen kommt (siehe Kapitel 5.1.12).

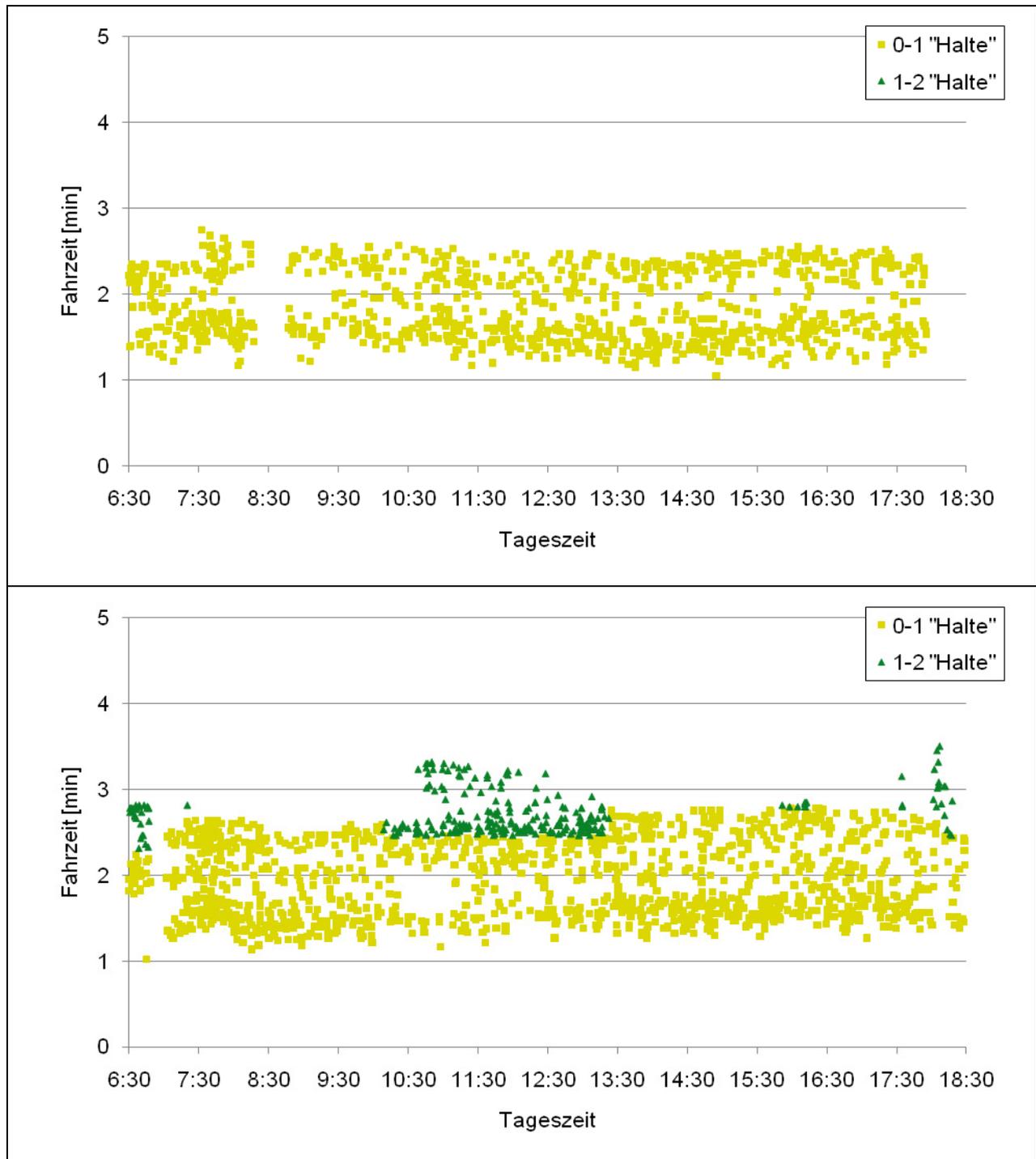


Abbildung 87: Fahrzeiten entlang der Relation 1-2 am 19.2.2009 (MOTION, oben) und am 26.2.2009 (LRS, unten).

Die in Abbildung 88 und Abbildung 89 dargestellten GPS-Fahrten dieser beiden Tage bestätigen die ANPR-Fahrzeiten und die Anzahl abgeleiteter Halte, wobei hier beachtet werden muss, dass das GPS-Messfahrzeug aufgrund seines Wendemanövers häufig ganz am Ende einer Grünphase in das Untersuchungsgebiet hineinfährt. Dies verursacht dementsprechend

häufig einen Halt an der LSA 221, den die Mehrzahl aller übrigen Verkehrsteilnehmer nicht erfährt - demzufolge werden diese Halte nicht berücksichtigt. Insgesamt lässt sich keine einzelne LSA als Verursacher zusätzlicher Halte ausmachen.

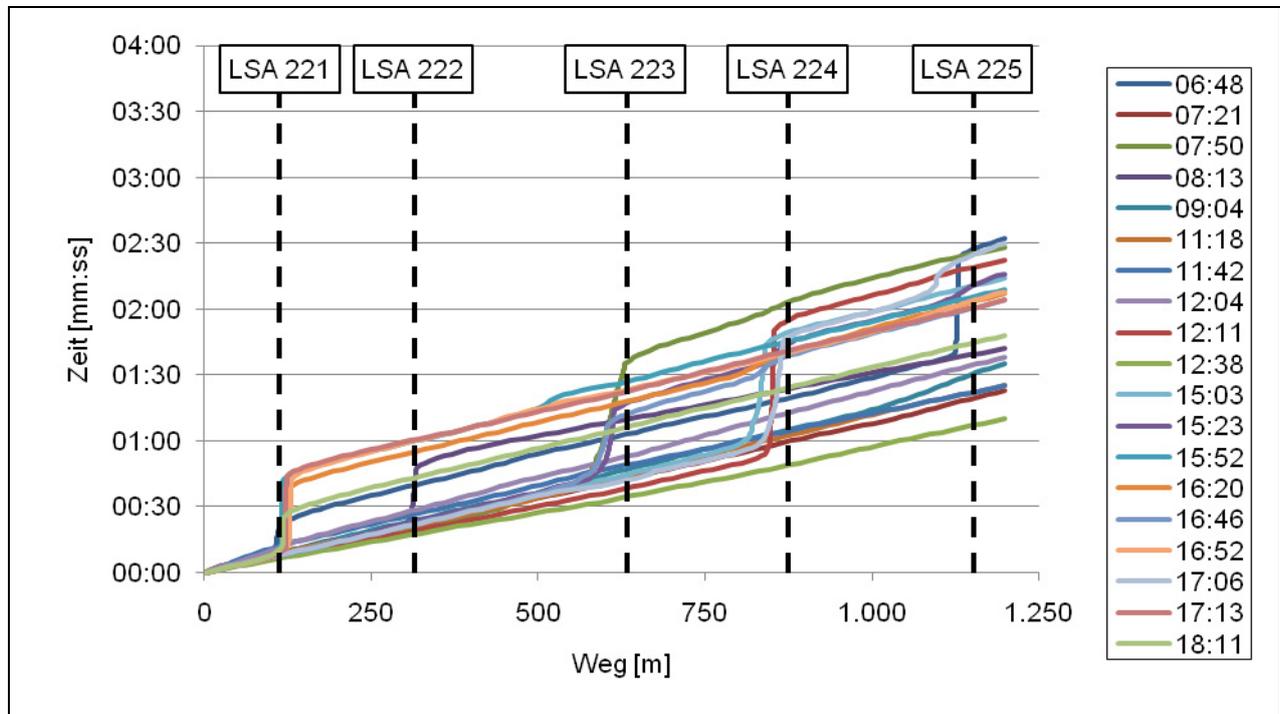


Abbildung 88: GPS-Fahrten entlang der Relation 1-2 am 19.2.2009 (MOTION).

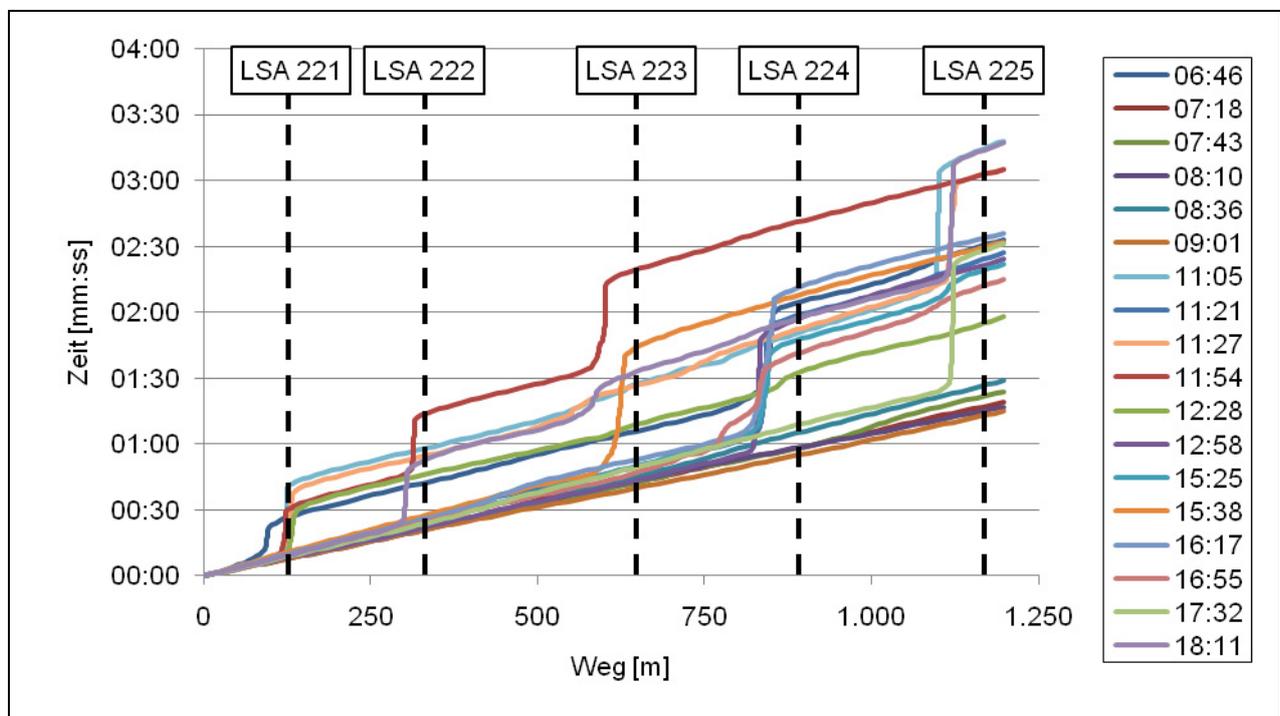


Abbildung 89: GPS-Fahrten entlang der Relation 1-2 am 26.2.2009 (LRS).

Analyse eines Clusters

Eine detaillierte Bewertung und Analyse der drei Steuerungsverfahren wird anhand des größten Clusters 3 durchgeführt (siehe Kapitel 8.5.2.2). Dieser Cluster enthält 45 Stunden, die sich entsprechend der Legende in Abbildung 90 auf die drei Steuerungsverfahren verteilen. Diese Abbildung zeigt die mittleren Fahr- und Wunschfahrzeiten (nach Steuerungsverfahren eingefärbte Balken und schwarze horizontale Linie) der vier bewerteten Relationen aller Stunden der jeweiligen Steuerungsverfahren. Nach den Verkehrsstärken gewichtet, ergeben sich daraus die mittlere Fahrzeit und die mittlere Verlustzeit aller Relationen beziehungsweise aller Verkehrsteilnehmer. Die ebenfalls in der Legende enthaltene mittlere Summe der Eingangsverkehrsstärken (siehe Tabelle 42 Zeilen 1-4) je Steuerungsverfahren bestätigt, dass für alle Steuerungsverfahren ähnliche Verkehrsmengen zu bewältigen waren.

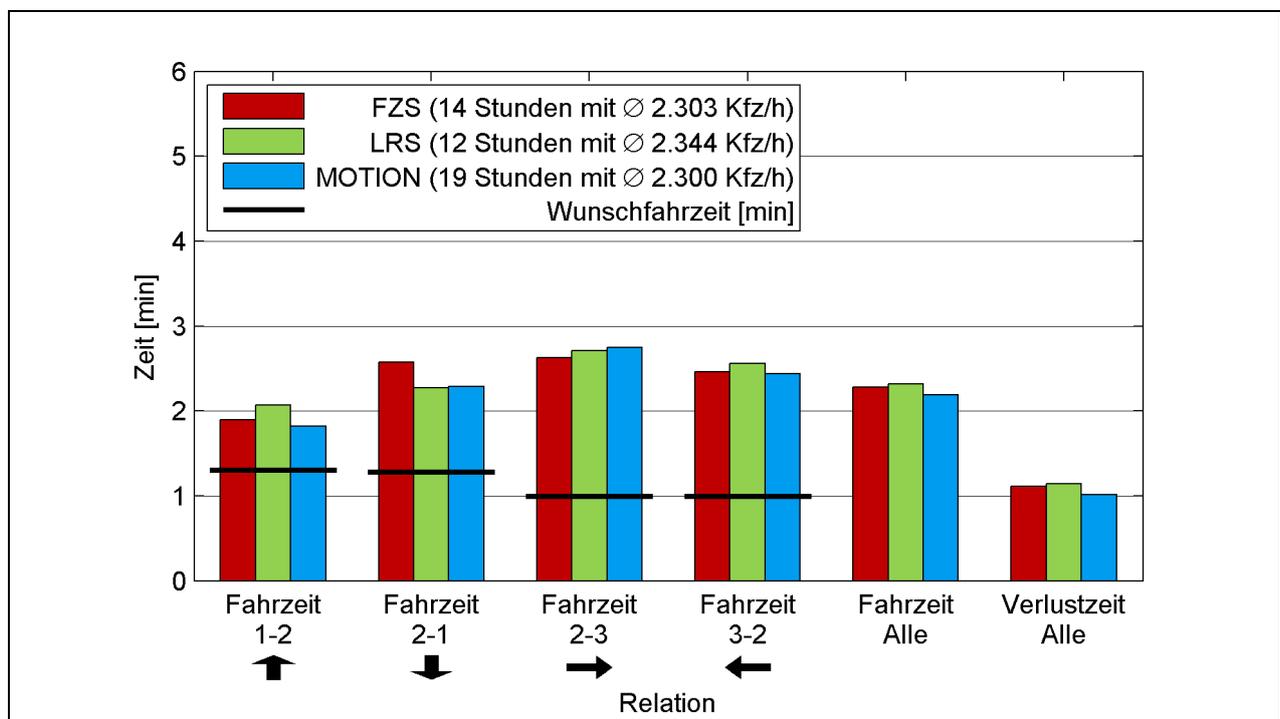


Abbildung 90: Cluster 3 - (Nach-)mittags - mittlere Fahr- und Verlustzeiten.

Da, wie bereits angeführt, während des gesamten Untersuchungszeitraums keine Überlastungssituation zu beobachten war, sind die Unterschiede zwischen den Fahrzeiten marginal. Der auffälligste Unterschied findet sich auf der Relation 2-1, hier ist die Fahrzeit der Festzeitsteuerung mit 2,58 im Vergleich zu 2,27 (LRS) und 2,28 (MOTION) Minuten um ca. 13 % beziehungsweise 19 Sekunden höher als die der anderen beiden Verfahren.

Abbildung 91 enthält die aus den Protokollen der Signalgruppen berechneten Freigabezeitanteile für alle Relationen an allen Lichtsignalanlagen.

Hier zeigt sich, dass die Festzeitsteuerung für die Relation 2-1 einen geringeren Freigabezeitanteil vergibt, wodurch sich die höhere Fahrzeit entlang dieser Relation erklären lässt (der Fahrzeitpeak der lokal regelbasierten Steuerung entlang der Relation 1-2 findet mit dieser Argumentation keine Begründung, ist aber auch weniger deutlich). Des Weiteren fällt auf, dass

die Festzeitsteuerung insgesamt geringere Freigabezeitanteile erreicht, was sich durch höhere Freigabezeitanteile für die Fußgänger und die Möglichkeit der verkehrsabhängigen Steuerungen (LRS und MOTION), schwach befahrene Querverkehrsströme abzurechnen, begründet.

Unabhängig davon unterscheiden sich die mittleren Verlustzeiten aller Relationen, aufgrund der niedrigen Belastungen, mit 1,11 (FZS) 1,14 (LRS) und 1,02 (MOTION) Minuten nur geringfügig (umgerechnet entsprechen die Zeiten 67, 68 und 62 Sekunden). Insbesondere der geringe Unterschied zwischen der Festzeitsteuerung und der lokal regelbasierten Steuerung kann bei einer zeitlich beschränkten Testreihe stochastischen Ursprungs sein.

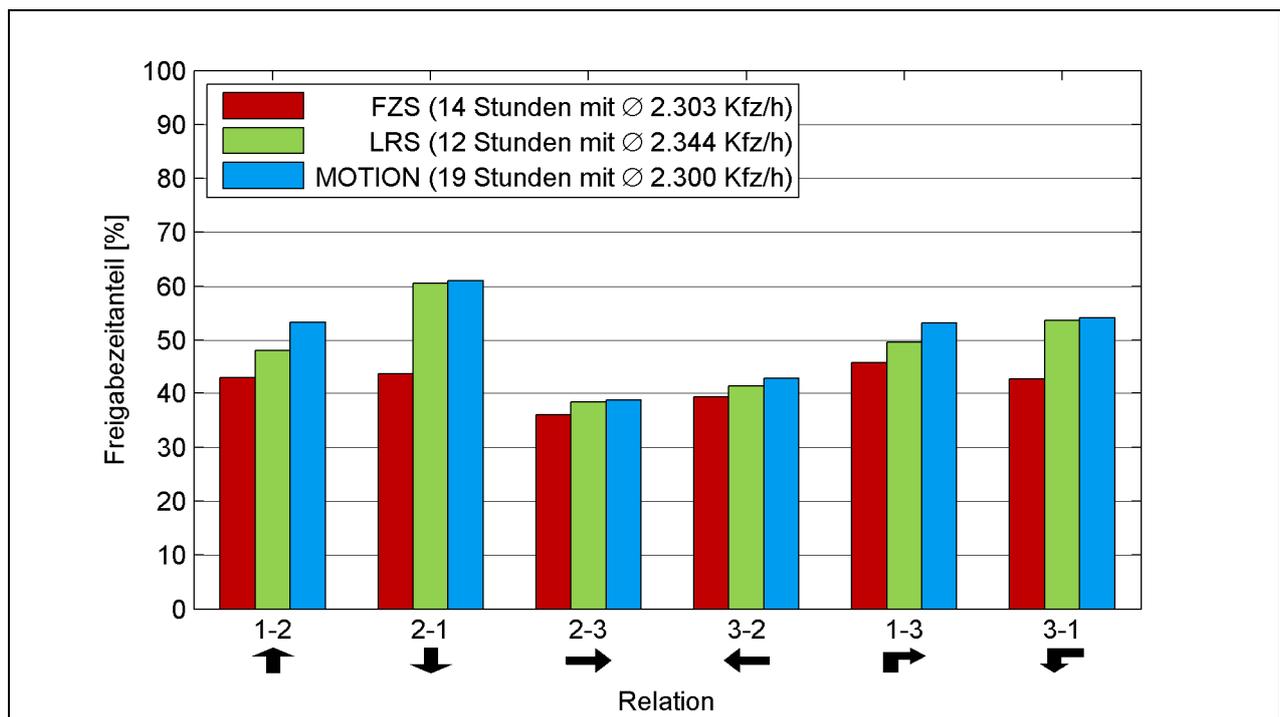


Abbildung 91: Cluster 3 - (Nach-)mittags - mittlere Freigabezeitanteile der Relationen an allen LSAs.

Abbildung 92 zeigt die Summenkurve der mittleren Anzahl Halte für jedes Steuerungsverfahren. Hier ist kein Unterschied zwischen der Festzeitsteuerung und der lokal regelbasierten Steuerung festzustellen. MOTION, das einzige Verfahren, das die Versatz- und Umlaufzeiten beeinflussen kann, erreicht hier den niedrigsten Wert.

Die in Abbildung 93 dargestellten Bufferindizes weisen, Werte zwischen 21 und 40 % auf, wobei sich die Steuerungsverfahren im Mittel in derselben Größenordnung bewegen. Demzufolge ist die Zuverlässigkeit der Steuerungsverfahren ähnlich.

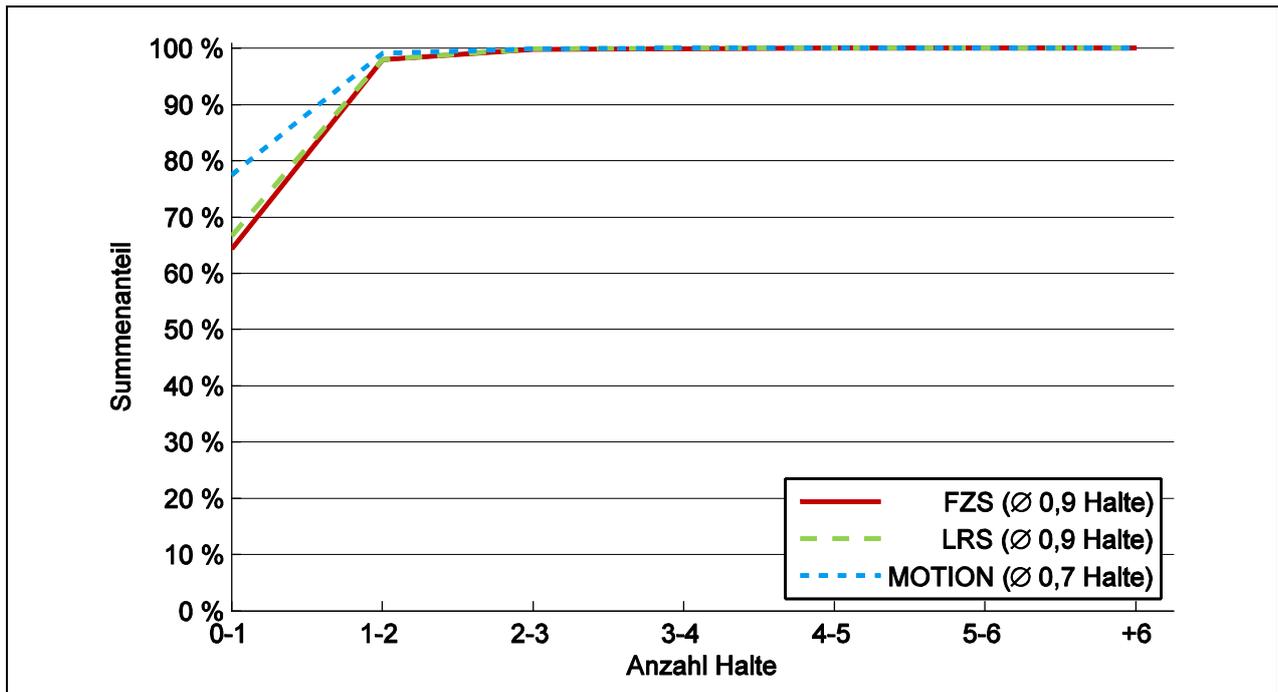


Abbildung 92: Cluster 3 - (Nach-)mittags - mittlere Anzahl Halte.

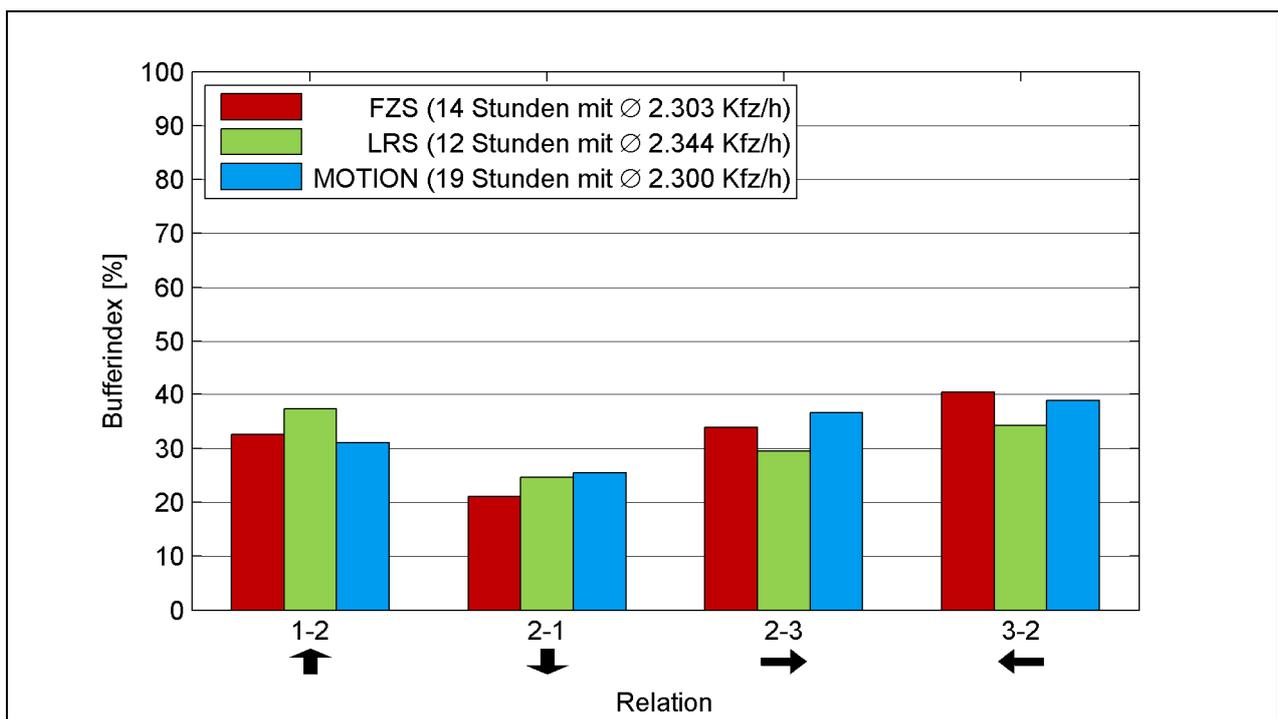


Abbildung 93: Cluster 3 - (Nach-)mittags - Bufferindizes.

Gesamtbewertung

Der Verlauf der mittleren Fahrzeit und der mittleren Anzahl Halte für einen durchschnittlichen Tag (siehe Kapitel 5.1.12.3 Erzeugung eines durchschnittlichen Tages) ist in Abbildung 94 und Abbildung 95 dargestellt.

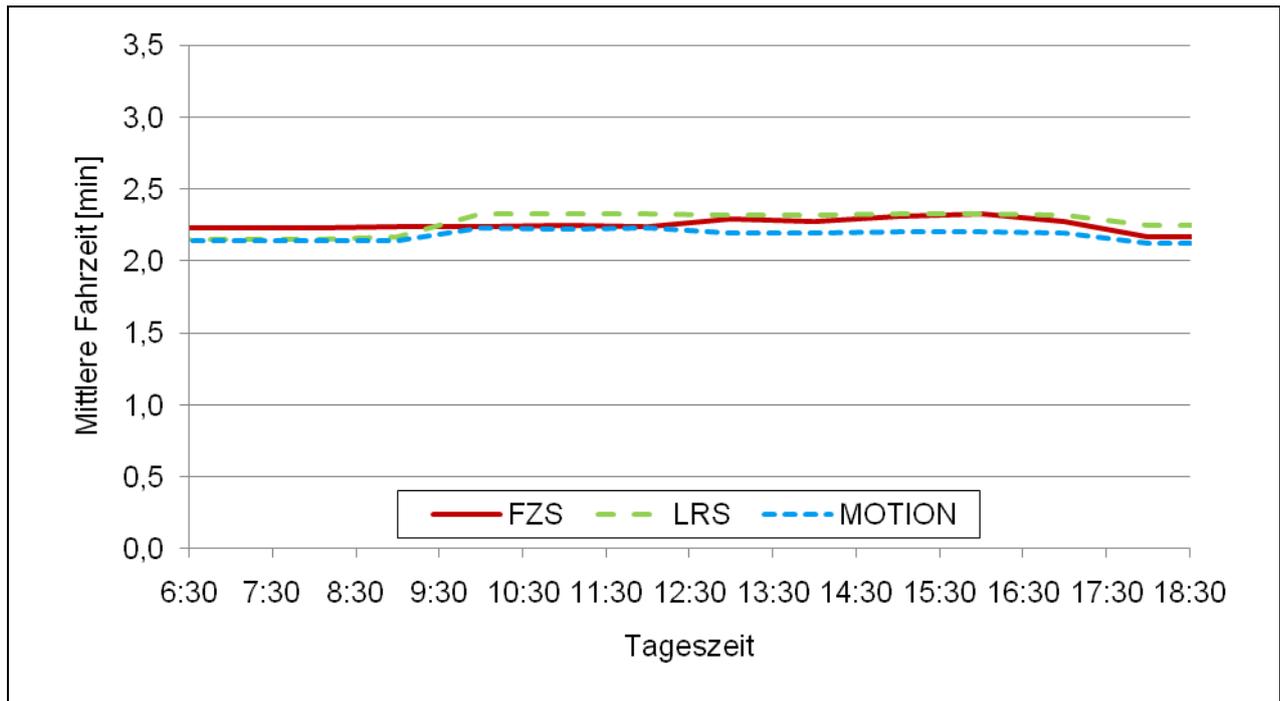


Abbildung 94: Durchschnittliche mittlere Fahrzeiten nach Steuerungsverfahren über alle Relationen (durchschnittliche betroffene Nachfrage pro Stunde 1.680 Kfz/h).

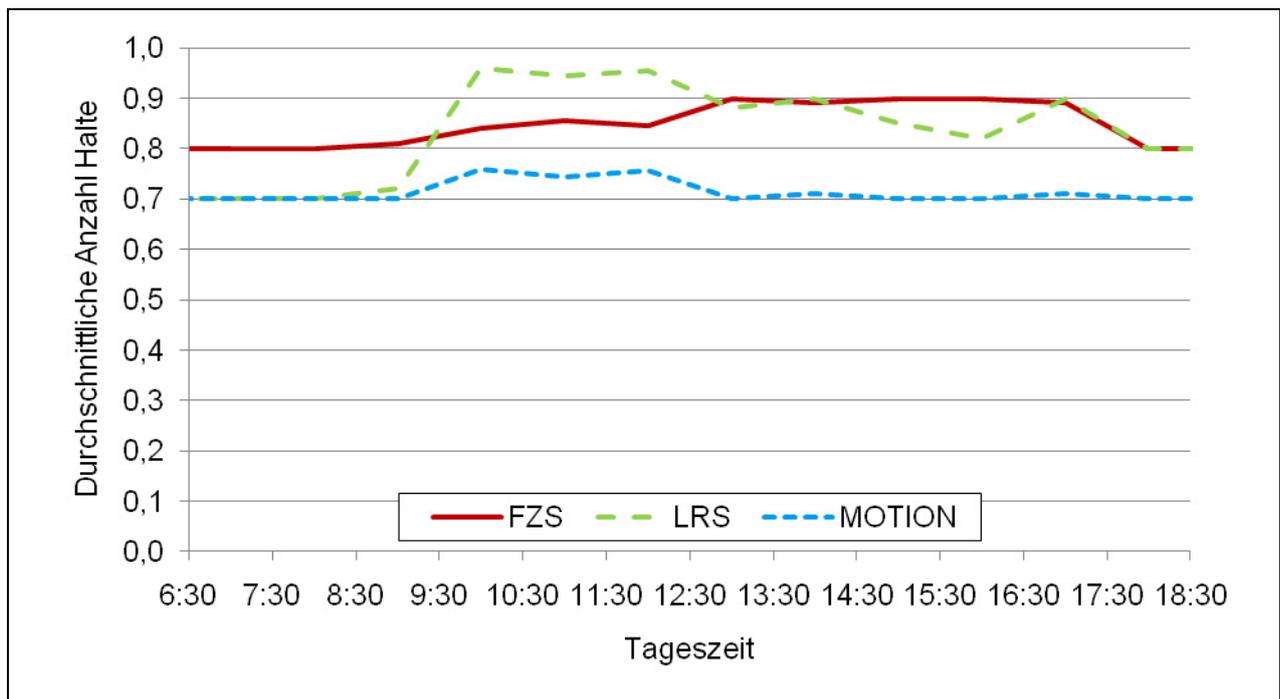


Abbildung 95: Durchschnittliche Anzahl Halte nach Steuerungsverfahren über alle Relationen (durchschnittliche betroffene Nachfrage pro Stunde 1.680 Kfz/h).

Tabelle 46 enthält die über den durchschnittlichen Tag gemittelten und auf die lokal regelbasierte Steuerung normierten Kenngrößen als hoch aggregierte Vergleichswerte. Hier zeigt sich, den vorangegangenen Abbildungen wie auch der nachfolgenden Betrachtung über alle Cluster entsprechend, dass die Festzeitsteuerung und die lokal regelbasierte Steuerung eine

ähnliche Qualität erreichen und MOTION diesen gegenüber eine leicht reduzierte mittlere Fahrzeit aufweist und insbesondere eine niedrigere Anzahl mittlerer Halte erreicht.

Steuerungsverfahren	Anteil an der lokal regelbasierten Steuerung [%]	
	Mittlere Fahrzeit	Mittlere Anzahl Halte
Festzeitsteuerung	99	101
Lokal regelbasierte Steuerung (mit Priorisierung des ÖV)	100	100
MOTION (mit Priorisierung des ÖV)	96	85

Tabelle 46: Aggregierte auf die lokal regelbasierte Steuerung normierte Kenngrößen für einen durchschnittlichen Tag.

Die wichtigsten Kenngrößen für alle Cluster und alle Stunden insgesamt sind in Tabelle 47 aufgeführt. Zusammenfassend kann, für die Stunden in denen MOTION aktiv war, die niedrigste Fahr- beziehungsweise Verlustzeit festgestellt werden. MOTION hat für die Cluster eins und drei bis fünf die niedrigste Fahrzeit und für den zweiten Cluster die Zweitniedrigste. Für die von der Nachfrage unabhängige Gesamtbetrachtung aller Stunden ist die Fahrzeit für MOTION ebenfalls die Kürzeste. Die Fahrzeiten der Festzeitsteuerung und der lokalen regelbasierten Steuerung schwanken zwischen den einzelnen Clustern stärker. Insbesondere unter Berücksichtigung der Gesamtbetrachtung (und der zeitlich begrenzten Beobachtungsdauer) lässt sich hier nicht klar feststellen, welches dieser beiden Verfahren die besseren Kenngrößen aufweist.

Für die Anzahl Halte lässt sich ebenfalls ein Vorteil für MOTION feststellen. Hier begründen sich die Vorteile durch eine bessere Koordinierung, die teilweise dadurch realisiert beziehungsweise ergänzt wird, dass MOTION während der Mittagszeit die Umlaufzeit höher hält.

Die Bufferindizes bewegen sich im Mittel für alle Verfahren um ca. 30 %, was bedeutet, dass alle Verfahren eine ähnliche Zuverlässigkeit aufweisen (abgesehen von einem Ausreißer in Cluster 1 auf der Relation 2-3 mit einer lokal regelbasierten Steuerung).

Abschließend muss festgestellt werden, dass aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens, keines der Verfahren schlechte Ergebnisse aufweist und zu keinem Zeitpunkt der Erhebung signifikante Anstiege in den Fahrzeiten zu verzeichnen sind, was dadurch unterstrichen wird, dass die höchste mittlere Fahrzeit einer einzelnen Stunde weniger als 40 % über der niedrigsten mittleren Fahrzeit einer einzelnen Stunde liegt (im Testfeld Hamburg, siehe auch Kapitel 9.5.2 ist die höchste mittlere Fahrzeit 140 % höher als die niedrigste mittlere Fahrzeit).

	Anzahl Stunden im Cluster	Fahrzeit [min]	Verlustzeit [min]	Eingangsverkehrsstärken [Kfz/h]	Anzahl Halte	Bufferindex[%] auf Relation			
						1-2	2-1	2-3	3-2
Cluster 1 - vormittags mittlere Verkehrsstärke - Morgenspitze¹									
FZS	8	2,23	1,08	2.238	0,8	33	23	29	36
LRS	9	2,15	1,00	2.229	0,7	31	29	61	37
MOTION	10	2,14	0,99	2.228	0,7	31	25	30	33
Cluster 2 - mittags mittlere Verkehrsstärke									
FZS	6	2,21	1,04	2.081	0,8	32	21	34	35
LRS	7	2,33	1,16	2.092	1,0	31	24	31	33
MOTION	4	2,26	1,09	2.060	0,8	32	25	44	39
Cluster 3 - (nach-)mittags hohe Verkehrsstärke									
FZS	14	2,28	1,11	2.303	0,9	33	21	34	40
LRS	12	2,32	1,14	2.344	0,9	37	25	29	34
MOTION	19	2,19	1,02	2.300	0,7	31	25	37	39
Cluster 4 - nachmittags hohe Verkehrsstärke - Nachmittagsspitze									
FZS	4	2,34	1,17	2.599	0,9	39	22	31	36
LRS	4	2,33	1,15	2.641	0,8	36	26	34	30
MOTION	9	2,21	1,03	2.588	0,7	31	26	31	37
Cluster 5 - abends niedrige Verkehrsstärke									
FZS	3	2,17	1,01	1.758	0,8	41	18	26	37
LRS	3	2,25	1,08	1.834	0,8	37	31	29	26
MOTION	3	2,12	0,96	1.789	0,7	31	20	28	32
Cluster 6 - Ausreißer									
FZS	1	2,14	0,98	2.082	0,8	37	24	22	42
LRS	0	-	-	-	-	-	-	-	-
MOTION	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Alle Stunden¹									
FZS	36	2,26	1,09	2.233	0,8	34	21	32	38
LRS	35	2,27	1,11	2.254	0,8	34	26	38	34
MOTION	45	2,18	1,02	2.286	0,7	31	25	34	37
<p>1 Die Summe der Anzahl Stunden aller drei Verfahren im Cluster 1 ist mit 27 eins kleiner als die Summe der Stunden im Cluster 1 nach Tabelle 43. Dies liegt daran, dass die Stunde von 7:30-8:30 Uhr zum Teil mit Festzeitsteuerung und zum Teil mit MOTION gesteuert wurde (siehe auch Tabelle 40). Für diese Stunde liegen alle notwendigen Daten und keine Störungen vor, sodass sie zwar in die Clusterung der Nachfrage einfließen kann aber eine Zuordnung zu einem Steuerungsverfahren nicht möglich ist.</p>									

Tabelle 47: Bewertungsübersicht nach Clustern und insgesamt in Bremerhaven.

8.5.2.4 Auswertung der Fahrzeugwiedererkennung mittels Induktionsschleifensignatur

Zu Beginn der Auswertung wurde das bereits prototypisch als Matlab-Bibliothek verfügbare Verfahren in Java re-implementiert und für den Anwendungsfall Bremerhaven angepasst. In einem ersten Schritt wurden hierzu die aufgezeichneten Daten der zehn Messquerschnitte, die

in verschiedenen Tabellen einer Microsoft Access Datenbank verfügbar waren, konsolidiert und einheitlich in eine MySQL-Datenbank importiert. Durch die Verwendung von Indizes wird eine effiziente Möglichkeit geboten, Signaturen anhand ihres zeitlichen Bezugsintervalls auszulesen.

Um den Rechenaufwand für die Zuordnung der einzelnen Signaturen möglichst gering zu halten und das Verfahren hinsichtlich der Geschwindigkeit zu optimieren, werden für den Signaturabgleich ausschließlich Daten betrachtet, die innerhalb eines bestimmten Zeitfensters liegen. Dessen Größe orientiert sich an der räumlichen Entfernung der beiden Induktionsschleifen und beträgt für die betrachteten (direkten) Verkehrsbeziehungen im Mittel 10 – 300 Sekunden. Die Induktionsschleifen waren in einem Abstand von ca. 300 - 400m installiert. Es besteht also prinzipiell die Möglichkeit alle Fahrzeuge zuzuordnen, die sich mit einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 4 km/h bis knapp über 100 km/h von einem zum anderen Querschnitt bewegen.

Für das Extrahieren der Signaturen aus den 32-sekündigen Verstimmungskurven wurden die Schwellwerte von 1 Promille (Eingangsschwellwert) und 1.5 Promille (Ausgangsschwellwert) verwendet. Für den zweiten Detektor wurden diese Schwellen abhängig vom Kalibrierungsfaktor angepasst. Außerdem wurden die Signaturen verworfen, die zu Beginn oder am Ende eines Intervalls unvollständig oder deren maximale Verstimmung weniger als 10 Promille betrug, da diese fehlerhafte Zuordnungen förderten. Zur Normierung wurden die zwischen den Messpunkten kubisch interpolierten Signaturen an 21 äquidistanten Stützstellen abgetastet.

Von den folgenden 20 Induktionsschleifen (siehe Abbildung 96) wurden Daten jeweils paarweise ausgelesen und aufgezeichnet:

- Knoten 220 Ausfahrt Süd: 220.z1, 220.z2
- Knoten 221 Zufahrt Nord: 221.a2, 221.a3
- Knoten 224 Zufahrt Nord: 224.a1, 224.a2, 224.a3, 224.a4
- Knoten 225 Zufahrt West: 225.a1, 225.a2, 225.c2, 225.d2, 225.e1, 225.e1
- Knoten 240 Zufahrt West: 240.a1, 240.a2
- Knoten 241 Zufahrt West: 241.c1, 241.c2, und Zufahrt Nord: 241.a1, 241.a2

Für die Auswertung wurde der Schwerpunkt auf die folgenden Messquerschnitte gelegt:

- 241.c1/241.c2
- 241.a1/241.a2
- 240.a1/240.a2
- 225.a1/225.a2
- 224.a1/224.a2
- 224.a3/224.a4

Für den Messquerschnitt 221.a2/221.a3 lagen aufgrund eines Defektes keine ausreichenden Daten vor. Die Entfernung zwischen den Knotenpunkten 224 und 220 ist für eine Fahrzeitmessung mittels dieses Verfahrens zu groß.

Für die Auswertung werden im ersten Schritt nur die benachbarten Querschnittsbeziehungen entlang der Lloydstraße von Nord-Osten kommend in südwestlicher Fahrtrichtung betrachtet. Diese sind im Speziellen:

- 241.c1 – 240.a1, 241.c1 – 240.a2, 241.c2 – 240.a1, 241.c2 – 240.a2
- 240.a1 – 225.a1, 240.a2 – 225.a1, 240.a2 – 225.a1, 240.a2 – 225.a2

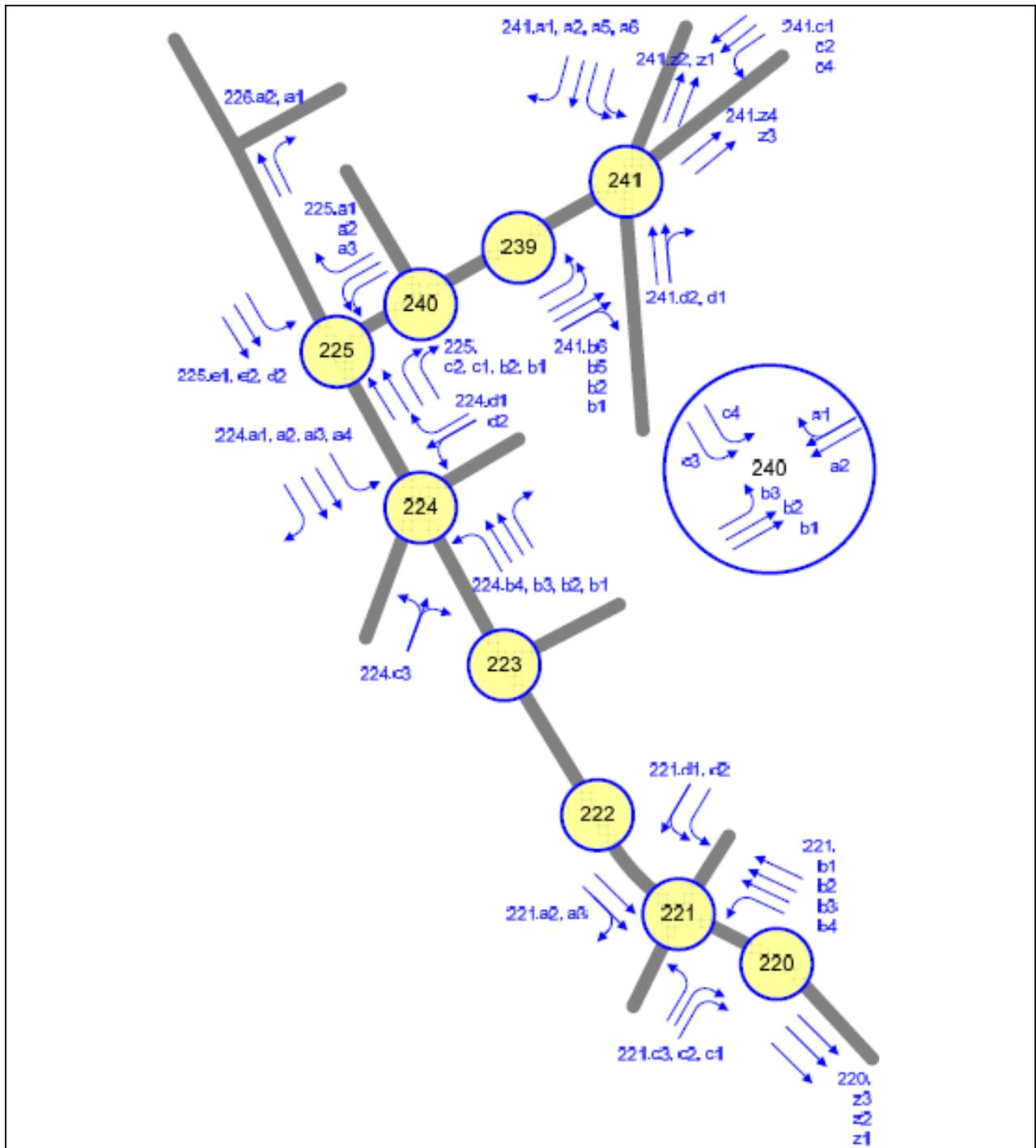


Abbildung 96: Messstellenübersicht (Bildquelle: Siemens).

Für diese Beziehungen wurden die Detektoren für alle vorhandenen Messtage kalibriert. Die entsprechenden Kalibrierungsfaktoren sind in Tabelle 48 dargestellt.

Da am 16.2.2009 vor allem vormittags an allen Querschnitten nur wenige Daten aufgezeichnet werden konnten und der Stichprobenumfang daher für eine Kalibrierung nicht umfangreich genug ist, werden im Folgenden nur die restlichen neun Messtage, also vom 17. - 27.2.2009 als für die weitere Auswertung relevant betrachtet.

An diesen neun Tagen ist deutlich zu erkennen, dass sich die Detektoren in der nord-östlichen Zufahrt zum Knotenpunkt 241 und die Detektoren in der nord-östlichen Zufahrt zu Knotenpunkt 240 sehr gut aufeinander abstimmen ließen; der Kalibrierungsfaktor blieb über die Woche hinweg sehr stabil. Bei den Detektoren in der nord-östlichen Zufahrt zum Knotenpunkt 225 zeigt die Kalibrierung deutliche Instabilitäten, was auch zu Problemen bei der späteren Zuordnung von Signaturen führte. Hier konnte an den beiden Tagen lediglich eine Signatur zugeordnet werden. Daher wurde der Messquerschnitt in der nordöstlichen Zufahrt zum Knotenpunkt 225 von weiteren Analysen ausgenommen und stattdessen der Querschnitt in der Zufahrt zu Knotenpunkt 224 in süd-östlicher Richtung für die Auswertung berücksichtigt.

		16.2.2009	17.2.2009	18.2.2007	19.2.2007	20.2.2007	23.2.2007	24.2.2007	25.2.2007	26.2.2007	27.2.2007
241.c1	240.a1	1,20	1,20	1,21	1,21	1,19	1,20	1,20	1,21	1,20	1,19
241.c1	240.a2	1,13	1,13	1,14	1,14	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,12
241.c2	240.a1	1,07	1,15	1,21	1,18	1,19	1,21	1,21	1,19	1,20	1,22
241.c2	240.a2	1,01	1,09	1,14	1,11	1,13	1,13	1,14	1,12	1,12	1,14
240.a1	225.a1	1,08	1,15	1,19	1,15	1,15	1,12	1,19	1,24	1,15	1,17
240.a1	225.a2	1,33	1,27	1,22	1,27	1,25	1,27	1,24	1,34	1,26	1,20
240.a2	225.a1	1,15	1,21	1,26	1,23	1,22	1,19	1,27	1,32	1,23	1,25
240.a2	225.a2	1,42	1,35	1,29	1,35	1,32	1,35	1,32	1,43	1,34	1,28

Tabelle 48: Kalibrierungsfaktoren.

Auf dem Fahrstreifen für Rechtsabbieger und dem rechten Geradeausfahrstreifen in der nord-westlichen Zufahrt zu Knotenpunkt 224 war eine Kalibrierung möglich, sie wurde für Dienstag den 17.2.2009 und Mittwoch, den 25.2.2009 durchgeführt.

		16.2.2009	17.2.2009	18.2.2007	19.2.2007	20.2.2007	23.2.2007	24.2.2007	25.2.2007	26.2.2007	27.2.2007
240.a1	224.a1		0,78						0,79		
240.a1	224.a2		0,96						0,94		
240.a2	224.a1		0,83						0,84		
240.a2	224.a2		1,01						1,00		

Tabelle 49: Kalibrierungsfaktoren II.

Aus den Daten der beiden Detektoren auf dem linken Geradeausfahr- und Linksabbiegerstreifen (224.a3 und 224.a4) ließ sich mit den standardmäßigen Verstimmungsschwellwerten leider nur eine unzureichende Anzahl an Fahrzeugsignaturen extrahieren (ca. 40-70 pro Tag). Daher wurden diese beiden Detektoren ebenfalls von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Im Folgenden sind die Fahrzeitganglinien für die beiden Tage, sowie für folgende Fahrtbeziehungen dargestellt:

- 241.c1/241.c2 – 240.a1/240.a2
- 241.a1/241.a2 – 240.a1/240.a2
- 240.a1/240.a2 – 224.a1/224.a2

Um die Daten mit den Fahrzeitganglinien der Kennzeichenerfassungssysteme leichter vergleichen zu können, ist in den Grafiken die y-Achse auf einen Maximalwert von 1200 Sekunden (20 Minuten) skaliert. Die ermittelten Messwerte liegen aber nur innerhalb des aufgrund der Lage der Induktionsschleifen zueinander definierten Zeitfensters von 10 – 300 Sekunden. Für den roten Graphen sind die Messwerte (90% schnellste) exponentiell geglättet ($\alpha = 0.7$).

Um einen Abgleich von Daten eines ganzen Messquerschnitts zu ermöglichen war zu berücksichtigen, dass alle möglichen Detektorkombinationen entsprechend einzeln kalibriert werden mussten.

Abschnitt 241.c1/241.c2 – 240.a1/240.a2

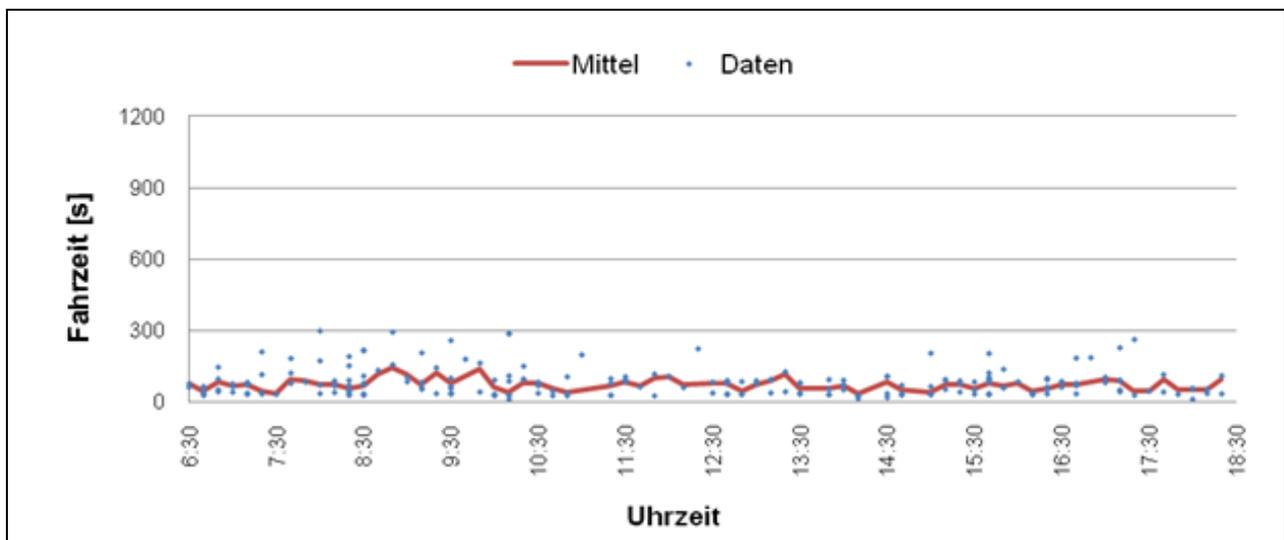


Abbildung 97: 17.2.2009: 241.c1/241.c2 – 240.a1/240.a2.

Von den untersuchten Querschnittsbeziehungen war dies die am besten auszuwertende und stabilste; dies ist an den über alle Messtage relativ stabilen Kalibrierungsfaktoren erkennbar.

Der räumliche Abstand für die Fahrzeiten zwischen den beiden betrachteten Querschnitten beträgt ca. 360m. Bei einer angenommenen mittleren Geschwindigkeit von 30km/h sollten die

Fahrzeuge die Strecke in ca. 43 Sekunden passieren. Zuzüglich einer maximalen Rotphase von ca. 56 Sekunden sollten die ermittelten Fahrzeiten bei freiem Verkehr daher mit einem kleinen Puffer für das Anfahren zwischen ca. 20 und 110 Sekunden liegen.

Unter Beachtung der vergleichbar umfangreichen Stichprobe der Strecke von Knotenpunkt 241 nach 240 können nun mittlere Verlustzeiten für den Streckenabschnitt bestimmt werden. Allein durch die Fahrzeitmessung mithilfe der Kennzeichenerfassungskameras über die gesamte Strecke hinweg wäre das nicht möglich gewesen.

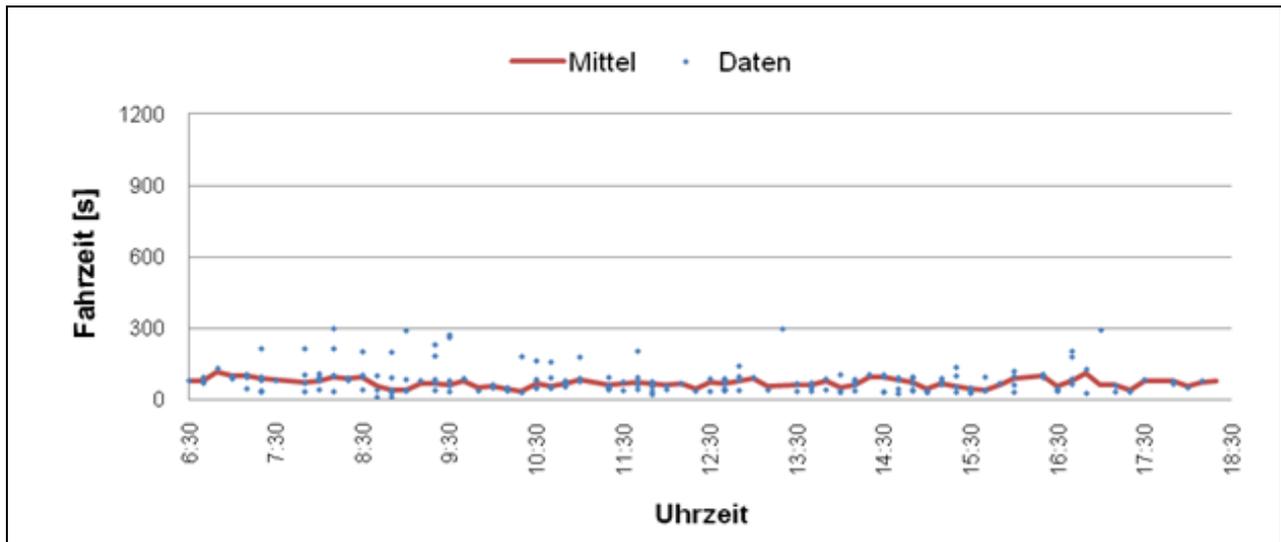


Abbildung 98: 25.2.2009: 241.c1/241.c2 – 240.a1/240.a2.

In Tabelle 50 sind die mittleren Verlustzeiten – aufgeschlüsselt nach Tagen – für die Strecke zwischen den Detektoren im nord-östlichen Zulauf des Knotenpunktes 241 und den Induktionsschleifen im nord-östlichen Zulauf zum Knotenpunkt 240 aufgeführt.

Im Vergleich zu den Verlustzeiten, die zwischen dem Messquerschnitt M3 und dem Messquerschnitt M2 mithilfe von Kennzeichenerfassungskameras ermittelt wurden, ist zu erkennen, dass durchschnittlich 62% der Verlustzeiten am Knotenpunkt 241 entstehen; vernachlässigt wurden hierbei aufgrund des geringeren Stichprobenumfangs der erste und letzte Messtag. Auf die beiden Knotenpunkte 240 und 225 entfallen somit die restlichen 40% der Verlustzeiten.

	16.2.2009	17.2.2009	18.2.2007	19.2.2007	20.2.2007	23.2.2007	24.2.2007	25.2.2007	26.2.2007	27.2.2007
ANPR M3 nach M2	1,30	1,17	1,15	1,33	1,22	1,20	1,25	1,20	1,22	1,10
VWF 241 nach 240	0,67	0,74	0,69	0,81	0,74	0,77	0,87	0,68	0,76	0,82
Anteil	0,52	0,63	0,60	0,61	0,61	0,64	0,70	0,57	0,62	0,74

Tabelle 50: Mittlere Verlustzeit in Minuten.

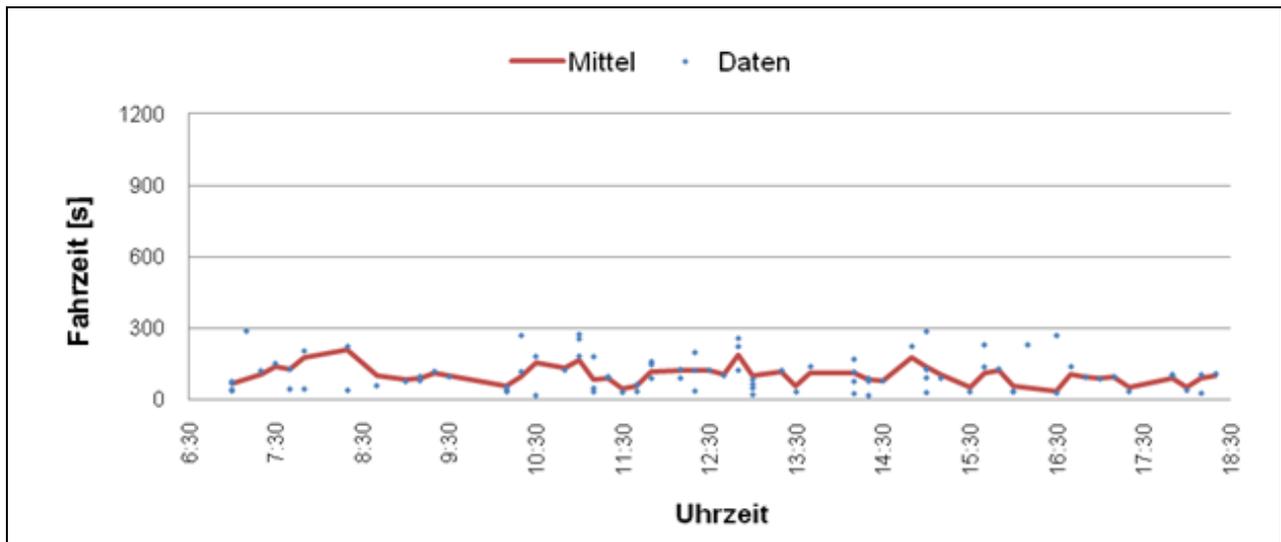
Abschnitt 241.a1/241.a2 – 240.a1/240.a2

Abbildung 99: 17.2.2009: 241.a1/241.a2 – 240.a1/240.a2.

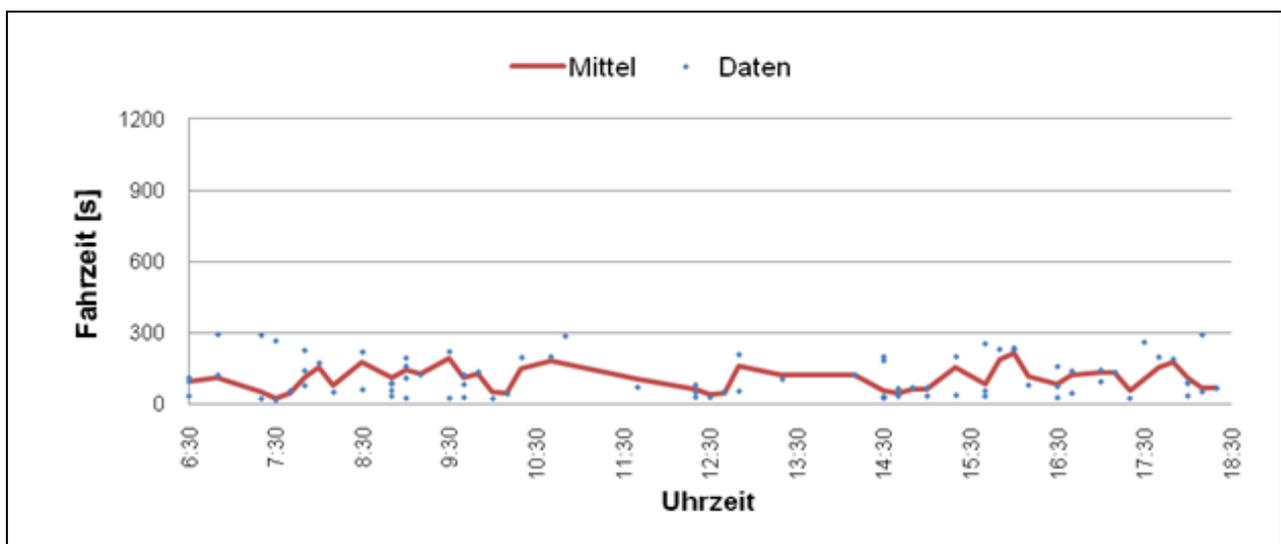


Abbildung 100: 25.2.2009: 241.a1/241.a2 – 240.a1/240.a2.

Der räumliche Abstand zwischen den betrachteten Querschnitten beträgt ca. 295m. Im Gegensatz zur ersten analysierten Beziehung stehen für diese Fahrtbeziehung an beiden Tagen weniger wiederkannte Fahrzeuge zur Verfügung. Dies liegt daran, dass nur die Rechtsabbieger wiedererkannt wurden. Für manche Zeitintervalle fehlen Daten komplett. Außerdem lässt sich erkennen, dass die Streuung der Fahrzeiten deutlich erhöht ist.

Abschnitt Knoten 240 Zufahrt Ost (240.a1/240.a2) – Knoten 224 Zufahrt Nord (224.a1/224.a2)

Der räumliche Abstand zwischen den betrachteten Querschnitten beträgt ca. 420m. Aus den Abbildungen unten lässt sich erkennen, dass die Wiedererkennung von Fahrzeugen über

mehrere Knotenpunkte hinweg fehleranfälliger wird. Geringer Ab- und Zufluss kann sich als Störgröße im Verfahren darstellen.

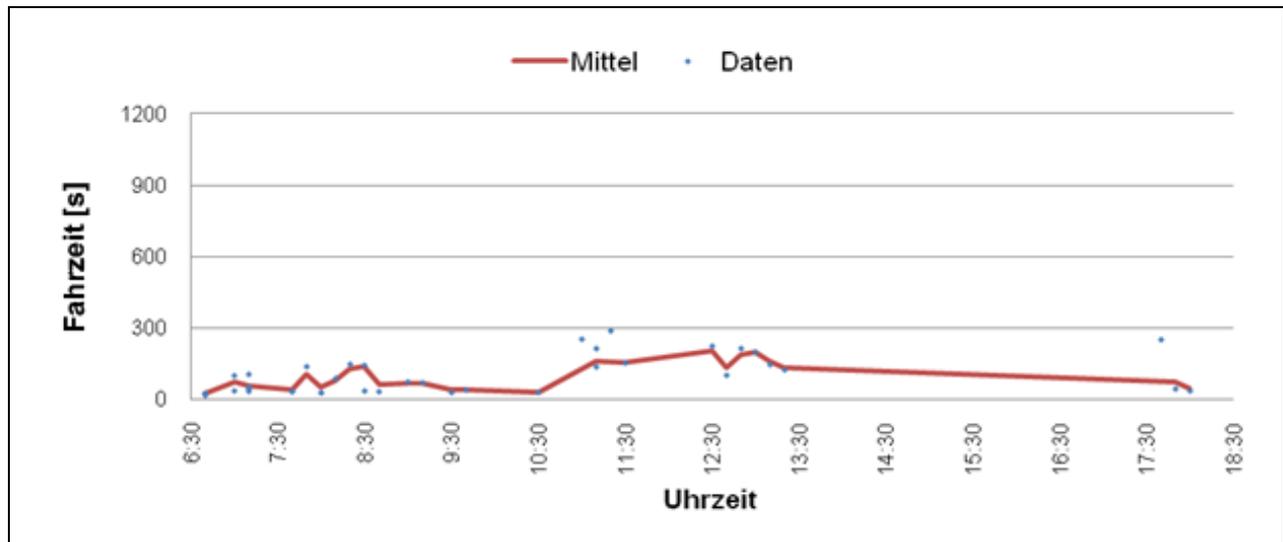


Abbildung 101: 17.2.2009: 240.a1/240.a2 – 224.a1/224.a2.

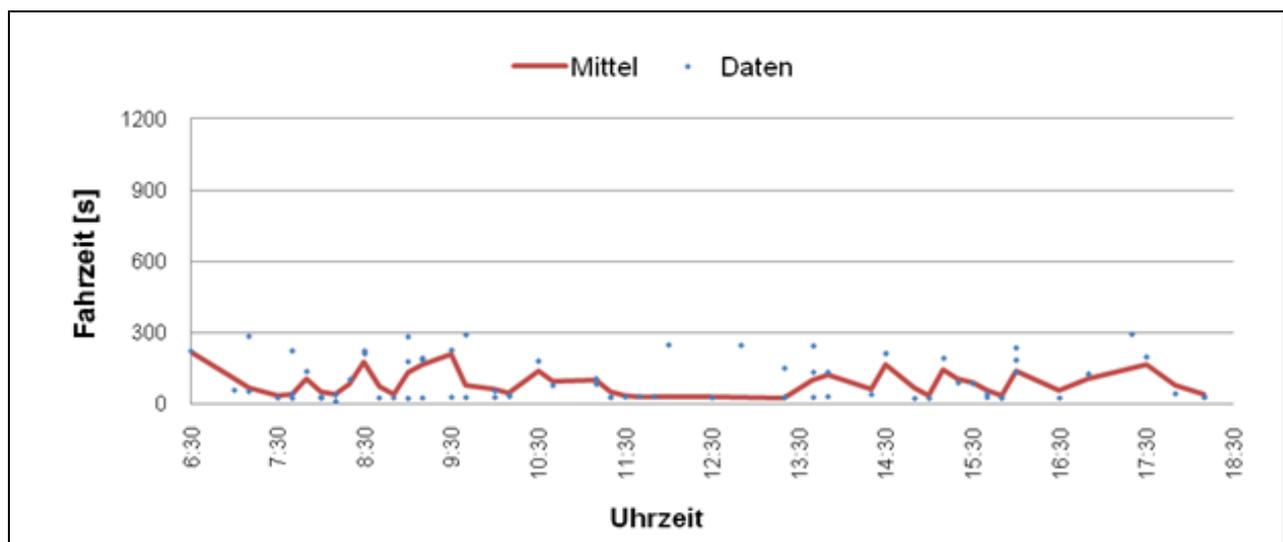


Abbildung 102: 25.2.2009: 240.a1/240.a2 – 224.a1/224.a2.

Fahrzeit 240.c1/240.c2 – 224.a1/224.a2

Um die mit dem Verfahren zur Wiedererkennung von Fahrzeugen ermittelten Fahrzeiten mit den Daten aus der Erhebung durch die Kennzeichenerfassungskameras vergleichbar zu machen, wurde für den 25.2.2009 exemplarisch eine Summenganglinie über zwei erfasste Querschnitte hinweg ermittelt (siehe Abbildung 103).

Diese Ganglinie stellt die Summenganglinie der beiden Abschnitte zwischen den Knotenpunkten 241 und 240 und den Knotenpunkten 240 und 224 dar; entsprechende Werte wurden nur berechnet, sofern innerhalb eines Zeitintervalls für beide Streckenabschnitte sinnvolle Fahrzeiten verfügbar waren. Genauigkeitseinschränkend wirkte sich hierbei die

geringe Abdeckung auf dem zweiten Streckenabschnitt von Knotenpunkt 240 nach 224 aus, da viele der Fahrzeiten aus dem ersten Streckenabschnitt, die eigentlich verfügbar gewesen wären, für die summierte Darstellung nicht berücksichtigt werden konnten.

Zudem sind die gemessenen Streckenabschnitte nicht deckungsgleich. Bei der Fahrzeiterhebung mittels Kennzeichenerfassungssystem wird eine Strecke erhoben, die ca. 150 Meter länger als die der Fahrzeitmessung mittels Signaturwiedererkennung ist. Da sich die Streckenanteile überwiegend auf freier Strecke in der Zufahrt zum Knoten 241 befinden, wurde eine Geschwindigkeit von 45 km/h angesetzt was einer Fahrzeit von 12 Sekunden entspricht.

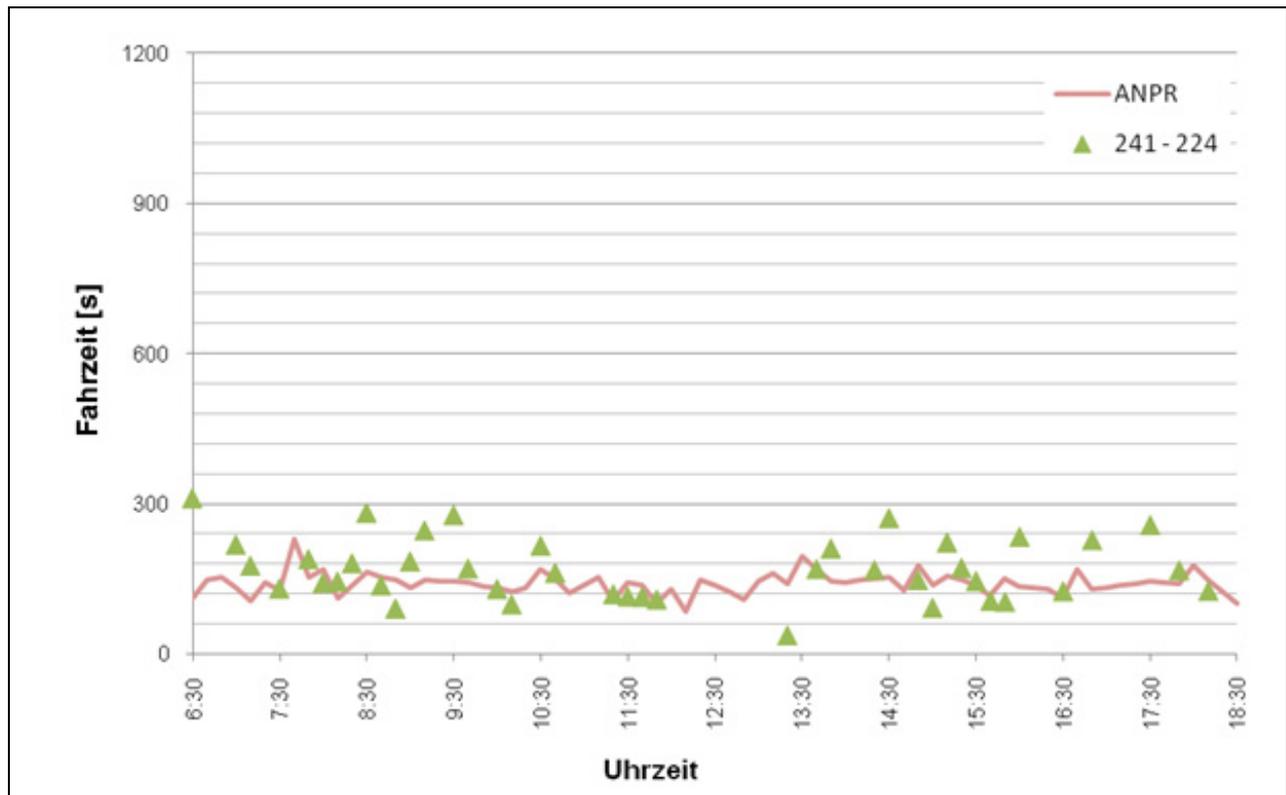


Abbildung 103: 25.2.2009 Summenganglinie des Abschnitts 241 - 224.

8.5.2.5 Simulationsergebnisse

Grundlagen

Für die Bewertung der Steuerungen mittels Simulation werden im Testfeld Bremerhaven die Kenngrößen Verlustzeiten und Anzahl der Halte für die Hauptrouten (Routen zwischen den APNR Messstellen) und für das gesamte Netz herangezogen. Für den ÖPNV werden die Wartezeiten verglichen. Staulängen werden für die Simulation in Bremerhaven nicht ausgewertet, da sie aufgrund der geringen Verkehrsstärke so gut wie nicht auftreten.

Untersucht werden neben den drei in der Realität getesteten Steuerungen,

- Festzeitsteuerung (FZS),

- lokale regelbasierte Steuerung mit Priorisierung des öffentlichen Verkehrs (LRS+ÖV),
- Netzsteuerung MOTION mit lokaler regelbasierter Steuerung und Priorisierung des öffentlichen Verkehrs (MOTION+LRZ+ÖV)

weitere 3 Steuerungen untersucht:

- lokale regelbasierte Steuerung (LRS)
- Netzsteuerung MOTION mit lokaler regelbasierter Steuerung (MOTION+LRS)
- Netzsteuerung MOTION (MOTION)

Für jedes Szenario werden 10 Simulationsläufe durchgeführt.

Leider konnten bis zum Abschluss des Projektes im Testfeld Bremerhaven nur für die Steuerungsszenarien ohne die Netzsteuerung MOTION plausible Ergebnisse aus der Simulation erzeugt werden. Eine ausführliche Erläuterung der Gründe erfolgt in Kapitel 11.1.

Bewertung

Die Ergebnisse sind für alle Steuerungsverfahren und für alle Verkehrsströme mit 95 prozentiger Sicherheit signifikant. Dies gilt für alle untersuchten Kenngrößen.

Analyse eines Clusters

Eine detaillierte Bewertung und Analyse der sechs Steuerungsverfahren wird analog zu den realen Daten für Clusters 3 durchgeführt. Es wird hier nach sechs unterschiedlichen Verkehrsströmen im Netz bewertet.

- Hauptrouten:
Diese Gruppe umfasst die Fahrzeuge, die zwischen den Ein- und Ausfahrten mit APNR-Systemen fahren (1-2;2-1;2-3;3-2;1-3;3-1, siehe Abbildung 81).
- Abbieger:
Diese Gruppe umfasst die Fahrzeuge, die auf einer Hauptroute einfahren diese aber als Rechts- oder Linksabbieger verlassen.
- Einbieger:
Diese Gruppe umfasst Fahrzeuge, die nicht auf einer Hauptroute einfahren, das Netz aber auf einer der Hauptrouten verlassen.
- Querer:
Diese Gruppe umfasst Fahrzeuge, die weder über eine der Hauptrouten einfahren, noch das Netz über eine der Hauptrouten verlassen.
- Netz:
Diese Gruppe umfasst alle Fahrzeuge im Netz
- ÖPNV:
Diese Gruppe umfasst alle Fahrzeuge des öffentlichen Personenverkehrs. Hier werden statt Verlustzeiten Wartezeiten ausgewertet.

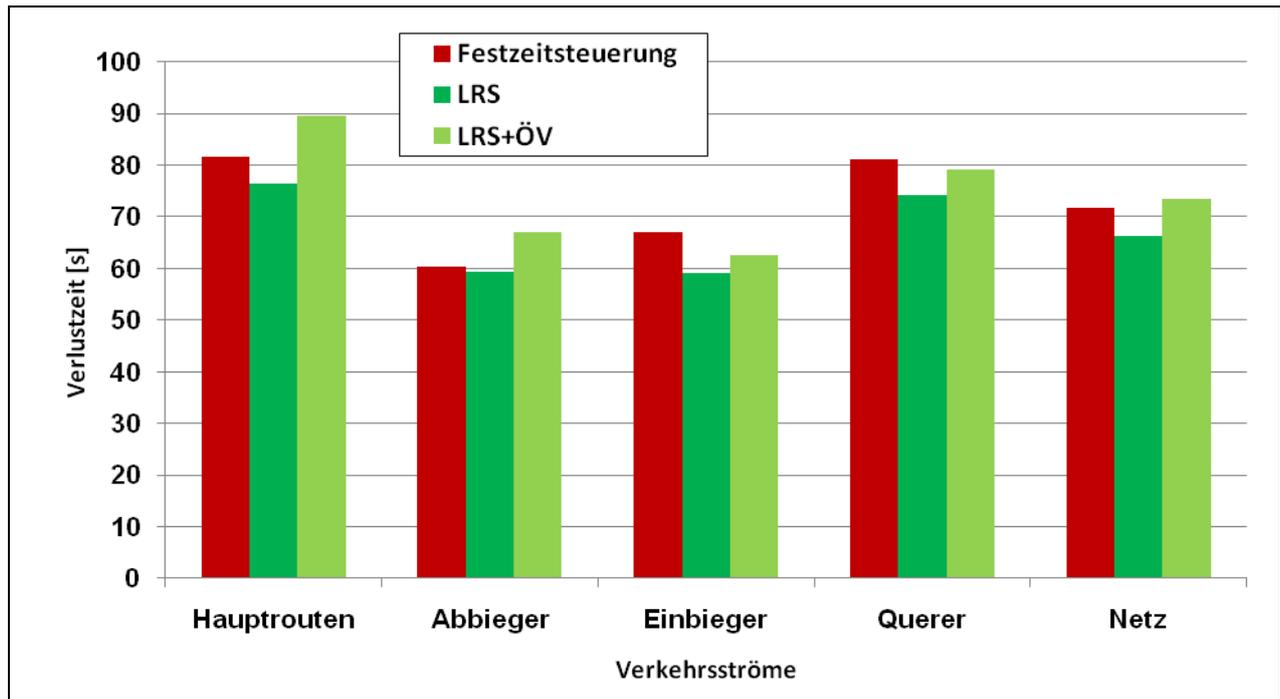


Abbildung 104: Cluster 3 - (Nach-)mittags - mittlere Verlustzeiten je Fahrzeug.

Im Unterschied zu den realen Messungen fallen die Verlustzeiten in der Simulation und auch die Unterschiede für die einzelnen Steuerungsverfahren höher aus. Dies liegt im Wesentlichen an der unterschiedlichen Art der Berechnung. Während in der Simulation jedem Fahrzeug eine Wunschgeschwindigkeit zugewiesen wird und sich die Verlustzeit dann für jedes Fahrzeug aus der Differenz, die sich aus dieser individuellen Wunschgeschwindigkeit ergebenden Fahrzeit und der tatsächlich realisierten Fahrzeit ergibt, musste bei den realen Messungen eine einheitliche Wunschgeschwindigkeit beziehungsweise ideale Fahrzeit für alle Fahrzeuge kollektiv abgeschätzt werden.

Die Verlustzeiten sind bei der Steuerung durch lokale regelbasierte Verkehrsabhängigkeiten für alle Verkehrsströme besser als dies bei der Festzeitsteuerung der Fall ist. Die Verlustzeiten reduzieren sich je nach betrachtetem Verkehrsstrom zwischen 1,3 und 11,7 Prozent. Die höchste Reduzierung wird dabei für die Einbieger mit ca. 7 Sekunden erreicht. Für die auch in der Realität betrachteten Hauptrouden verringerte sich die Verlustzeit im Durchschnitt um 5,3 Sekunden, dies entspricht einer Verbesserung um 6,5 Prozent. Im gesamten Netz verringern sich die Verlustzeiten im Schnitt um 5,3 Sekunden, dies entspricht 7,4 Prozent.

Mit zusätzlicher Beschleunigung des ÖPNV zur lokalen verkehrsabhängigen Steuerung ist das Bild gegenüber der Festzeitsteuerung differenzierter. Für die Hauptrouden und die Abbieger ergeben sich höhere Verlustzeiten. Diese Erhöhung liegt bei 7,8 Sekunden je Fahrzeug für die Hauptrouden, was eine Verschlechterung um 9,5 % bedeutet, und für die Abbieger bei 6,5 Sekunden, was eine Verschlechterung um 11,4 Prozent bedeutet. Für Einbieger und Querer dagegen ist die Verlustzeit niedriger als bei der Festzeitsteuerung. Je Fahrzeug sind dies 4,5 Sekunden für die Einbieger, eine Verbesserung um 6,6 Prozent, und 2,0 Sekunden für die Querer, eine Verbesserung von 2,5 Prozent. Der Unterschied zwischen Hauptrouden und Abbiegern einerseits und Einbiegern und Querern andererseits lässt sich hauptsächlich damit

erklären, dass Mitten im Testgebiet eine zentrale Haltestelle des Bremerhavener Busnetzes liegt, von der aus die meisten Linien die Haupttrouten kreuzen oder in diese einbiegen. Hierdurch bekommen natürlich auch die Querenden und Einbiegenden Fahrzeuge eine längere Grünzeit. Im gesamten Netz erhöht sich die Wartezeit damit um 1,9 Sekunden je Fahrzeug. Dies entspricht einer Verschlechterung um 2,7 Prozent.

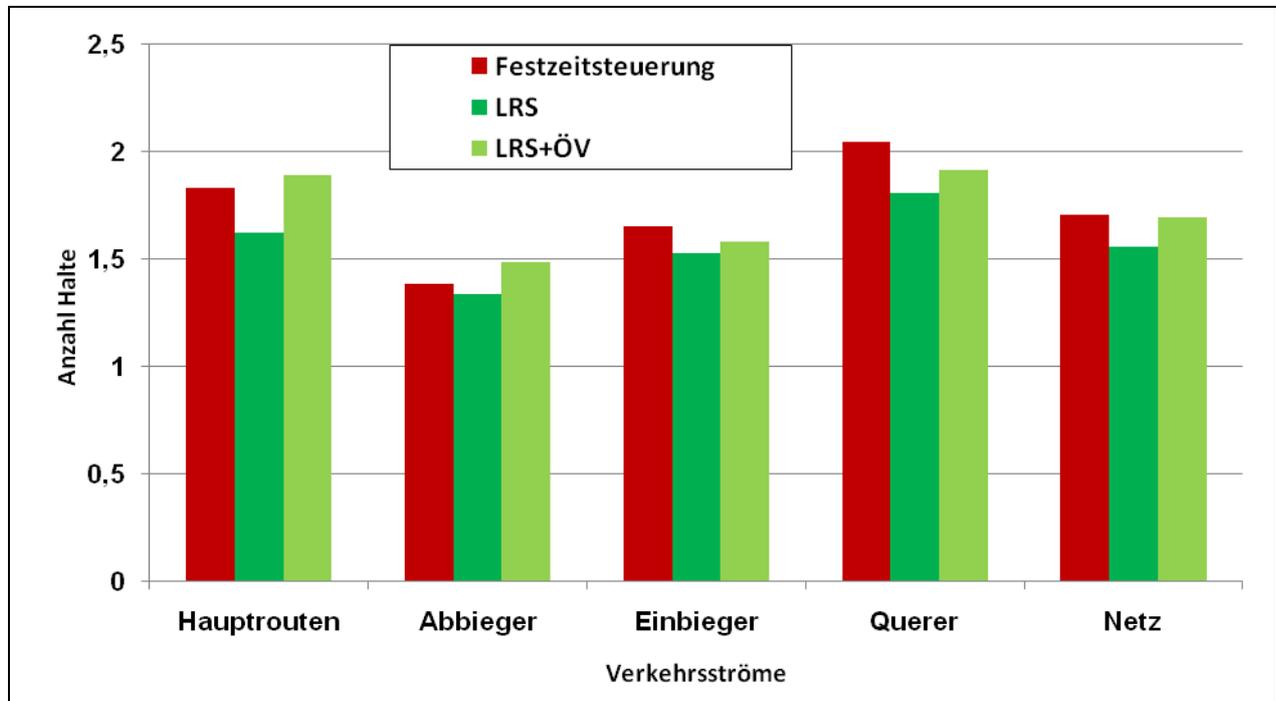


Abbildung 105: Cluster 3 - (Nach-)mittags - mittlere Anzahl der Halte je Fahrzeug.

Ähnlich wie bei den Verlustzeiten ist auch die Tendenz bei der Anzahl der Halte. Für alle Verkehrsströme schneidet die lokale verkehrabhängige Steuerung auch hier besser als bei der Festzeitsteuerung ab. Die Verbesserungen liegen dabei zwischen circa 11,5 Prozent für Haupttrouten und Querer und 3,5 Prozent für Abbieger. Im gesamten Netz reduziert sich die Anzahl der Halte um 8,7 Prozent.

Mit zusätzlicher Beschleunigung des ÖPNV ist die Anzahl der Halte für die Haupttrouten mit 3,4 Prozent und die Abbieger mit 7,1 Prozent höher als dies mit der Festzeitsteuerung der Fall ist. Für Einbieger und Querer ist die Anzahl der Halte 4,4 Prozent bzw. 6,3 Prozent niedriger als mit der Festzeitsteuerung. Für das gesamte Netz ergeben sich keine Signifikanten Änderungen.

Gesamtbewertung

Nachfolgend sind für die verschiedenen Steuerungsverfahren mittlere Verlustzeit und die mittlere Anzahl der Halte über den Tag dargestellt als Mittelwert aller 10 Simulationsläufe dargestellt.

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

Die Steuerung ist daher aufgrund der fehlenden Anfragen des ÖPNV mit der Steuerung ohne ÖPNV identisch.

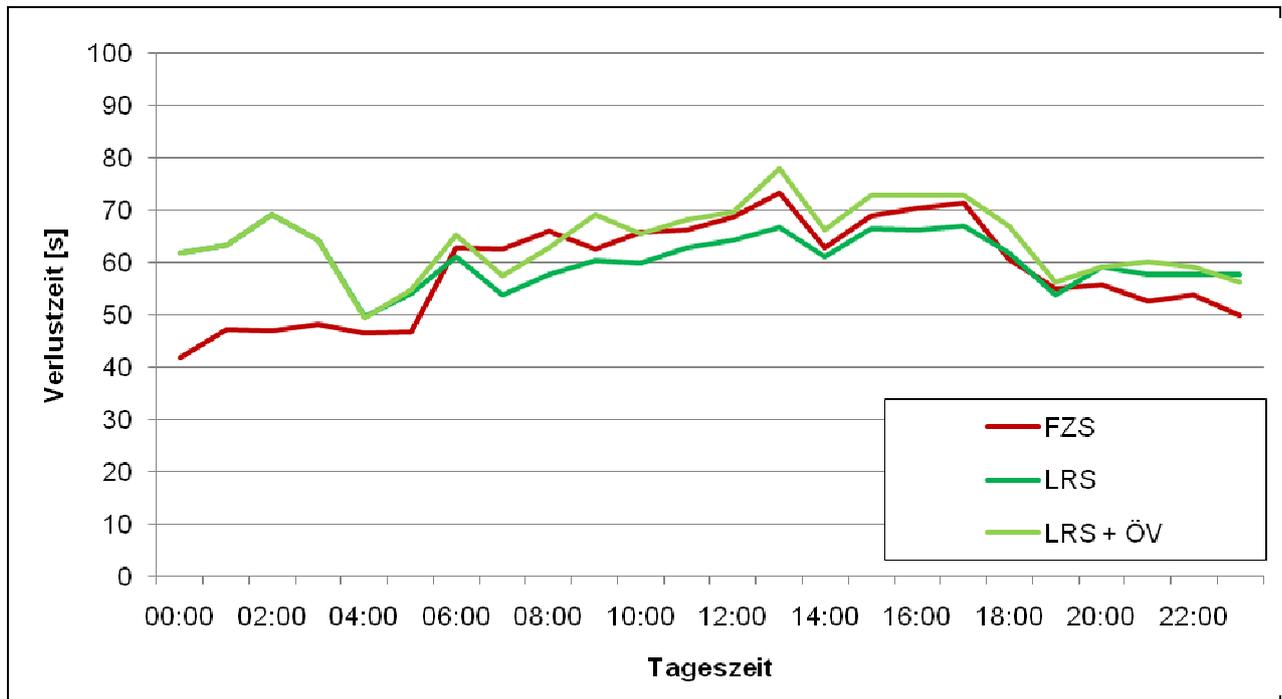


Abbildung 106: Durchschnittliche mittlere Verlustzeit nach Steuerungsverfahren für das gesamte Netz.

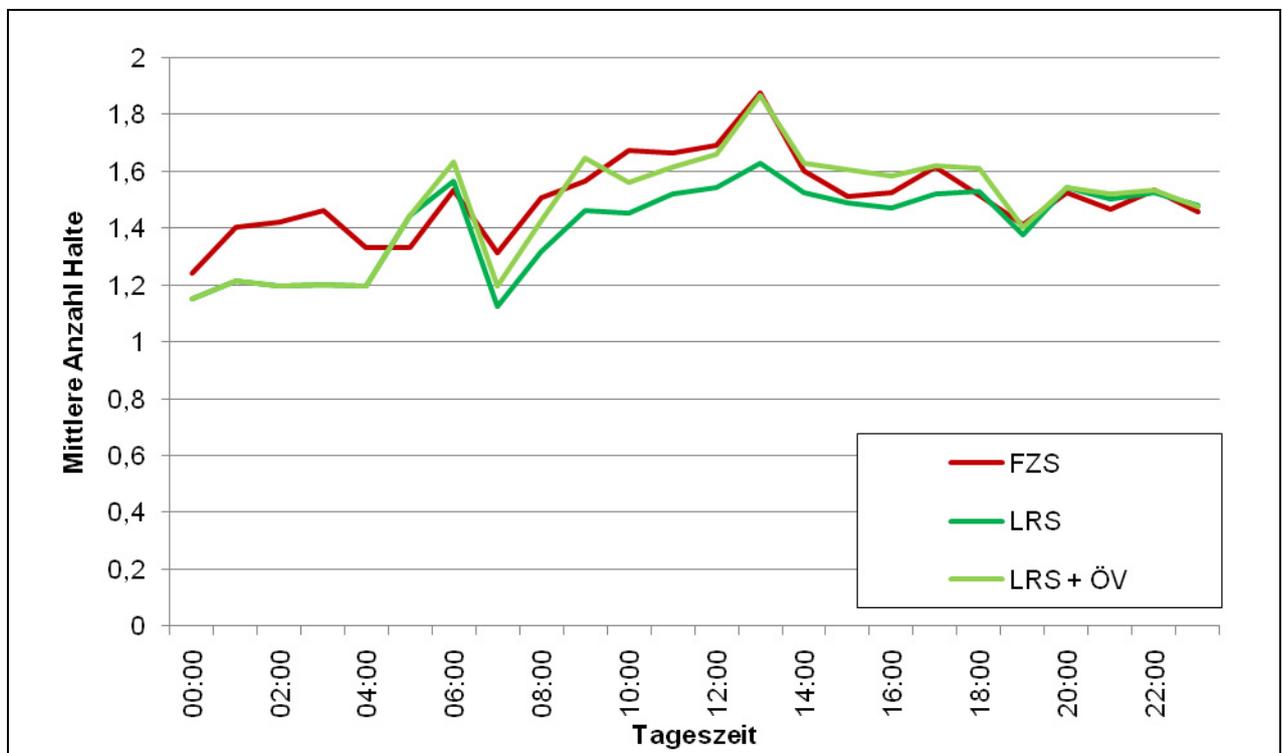


Abbildung 107: Durchschnittliche Anzahl Halte nach Steuerungsverfahren für das gesamte Netz.

Die lokale regelbasierte Steuerung kann ihre Vorteile in Bremerhaven vor allem bei mittleren und sehr niedrigen Verkehrsstärken ausspielen. Bei hohen Verkehrsstärken kann aufgrund der Auslastung der Nebenströme von der Steuerung nicht sehr stark eingegriffen werden. Grund für die schlechteren Ergebnisse in den Nachstunden der lokalen regelbasierten Steuerung ist, dass bei geringer Nachfrage die Fahrzeugpulks sehr leicht auseinander brechen und eine Phase aufgrund der Zeitlückensteuerung abgebrochen wird obwohl noch nicht alle Fahrzeuge die Haltelinie passiert haben. Bei sehr niedrigen Verkehrsstärken sind dagegen gar keine Pulks vorhanden, so dass dieser Effekt nicht eintreten kann.

Die Priorisierung des ÖPNV egalisiert in den meisten Fällen die Vorteile die die lokale regelbasierte Steuerung gegenüber der Festzeitsteuerung erzielen konnte.

Die wichtigsten Kenngrößen für alle Cluster und den gesamten Tag sind in nachfolgender Tabelle für die Haupttrouten aufgeführt.

	Mittlere Verlustzeit [s]	Mittlere Standzeit [s]	Mittlere Anzahl Halte	Eingangsverkehrsstärken [Kfz]
Cluster 1 - vormittags mittlere Verkehrsstärke - Morgenspitze				
FZS	70,0	40,0	1,48	3.152
LRS	59,4	32,9	1,26	3.141
LRS + ÖV	69,3	39,0	1,48	3.142
Cluster 2 - mittags mittlere Verkehrsstärke				
FZS	77,8	43,5	1,87	3.219
LRS	73,9	41,7	1,67	3.206
LRS + ÖV	85,8	49,5	1,92	3.206
Cluster 3 - (nach-)mittags hohe Verkehrsstärke				
FZS	81,7	47,3	1,83	2.649
LRS	76,4	44,2	1,62	2.642
LRS + ÖV	89,5	53,0	1,89	2.652
Cluster 4 - nachmittags hohe Verkehrsstärke – Nachmittagsspitze				
FZS	68,5	40,3	1,32	1.095
LRS	67,3	40,1	1,27	1.096
LRS + ÖV	79,2	47,6	1,50	1.088
Cluster 5 - abends niedrige Verkehrsstärke				
FZS	77,9	45,7	1,70	763
LRS	77,2	46,0	1,65	754
LRS + ÖV	88,7	53,6	1,86	763
Cluster 7 – Morgens niedrige Verkehrsstärke				
FZS	67,6	40,1	1,76	487
LRS	69,0	40,0	1,88	485
LRS + ÖV	70,6	41,1	1,90	485
Cluster 8 – Abend sehr niedrige Verkehrsstärke				
FZS	61,5	33,6	1,46	569
LRS	63,7	36,6	1,47	560
LRS + ÖV	70,8	41,1	1,61	570
Cluster 9 – Nacht sehr niedrige Verkehrsstärke				
FZS	64,3	37,8	1,73	945
LRS	66,5	39,8	1,76	945
LRS + ÖV	69,0	41,5	1,79	947
Cluster 10 – Nacht extrem niedrige Verkehrsstärke				
FZS	61,6	37,6	1,80	541
LRS	53,7	31,9	1,60	540
LRS + ÖV	55,4	33,1	1,62	539
Tag				
FZS	73,3	42,1	1,68	13.494
LRS	68,7	39,4	1,53	13.441
LRS + ÖV	78,7	45,9	1,73	13.467

Tabelle 51: Bewertungsübersicht nach Clustern und insgesamt für die Haupttrouten.

	Mittlere Verlustzeit [s]	Mittlere Standzeit [s]	Mittlere Anzahl Halte	Eingangsverkehrsstärken [Kfz]
Cluster 1 - vormittags mittlere Verkehrsstärke - Morgenspitze				
FZS	64,8	37,6	1,46	8.996
LRS	57,1	32,3	1,29	8.993
LRS + ÖV	62,7	35,9	1,41	8.996
Cluster 2 - mittags mittlere Verkehrsstärke				
FZS	65,1	36,2	1,65	12.579
LRS	61,9	34,5	1,51	12.576
LRS + ÖV	68,6	39,2	1,64	12.577
Cluster 3 - (nach-)mittags hohe Verkehrsstärke				
FZS	71,6	41,5	1,70	10.769
LRS	66,3	37,9	1,55	10.770
LRS + ÖV	73,5	43,1	1,69	10.768
Cluster 4 - nachmittags hohe Verkehrsstärke – Nachmittagsspitze				
FZS	68,6	40,5	1,49	3.878
LRS	65,7	38,5	1,46	3.876
LRS + ÖV	72,5	43,3	1,58	3.877
Cluster 5 - abends niedrige Verkehrsstärke				
FZS	69,1	39,9	1,62	3.341
LRS	66,7	38,5	1,58	3.340
LRS + ÖV	73,2	43,2	1,68	3.341
Cluster 7 – Morgens niedrige Verkehrsstärke				
FZS	55,2	31,2	1,48	1.195
LRS	58,9	33,5	1,59	1.193
LRS + ÖV	59,2	33,9	1,57	1.194
Cluster 8 – Abend sehr niedrige Verkehrsstärke				
FZS	57,1	31,2	1,45	2.527
LRS	56,8	31,7	1,42	2.523
LRS + ÖV	59,9	33,9	1,47	2.528
Cluster 9 – Nacht sehr niedrige Verkehrsstärke				
FZS	54,1	31,2	1,48	3.760
LRS	56,7	33,6	1,48	3.751
LRS + ÖV	58,2	34,8	1,49	3.764
Cluster 10 – Nacht extrem niedrige Verkehrsstärke				
FZS	49,3	28,8	1,43	1.823
LRS	57,8	37,9	1,39	1.828
LRS + ÖV	58,7	38,6	1,40	1.823
Tag				
FZS	65,0	37,2	1,57	49.120
LRS	61,7	35,3	1,47	49.104
LRS + ÖV	67,4	39,3	1,58	49.121

Tabelle 52: Bewertungsübersicht nach Clustern und insgesamt für das gesamte Netz.

8.5.3 Auswertung umweltbezogener Kenngrößen

Die Auswertung der umweltbezogenen Kenngrößen erfolgt analog zur im Kapitel 5.2.6 beschriebenen methodischen Vorgehensweise. In den folgenden Unterkapiteln werden die testfeldspezifischen Besonderheiten und die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Die eingesetzten Verfahren werden detailliert in 5.2.6 beschrieben.

8.5.3.1 Datenerhebung und Datenaufbereitung

Messstandort und Messaufbau

Messstandort war der Knotenpunkt Hafenstraße/Lloydstraße in Bremerhaven. In beiden Messwochen wurden NO_x -Parallelmessungen (in ca. 15 m und 25 m Abstand von der Haltlinie) durchgeführt. Die PM_x - und die Messung der meteorologischen Kenngrößen erfolgte in ca. 15 m Abstand von der Haltlinie. Die Probenahme an beiden Immissionsmessstellen erfolgte in ca. 1 m Abstand vom Fahrbahnrand und in ca. 1,5 m Höhe.

Zur Messung der PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration werden optische Partikelzähler der Firma Grimm, Typ Grimm OPC 107, eingesetzt. Die Geräte leiten anhand der gemessenen Partikelanzahl und -durchmesser sowie anhand empirischer Dichtefaktoren die Massenkonzentration von PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ und PM_1 ab. Diese Abschätzung erfüllt die in der 39. BImSchV geforderte Genauigkeit, so dass sie als Alternative zum Referenzverfahren zugelassen sind. Nach Herstellerangaben wird eine Reproduzierbarkeit der Messwerte von +/- 3 % im gesamten Messbereich erreicht [Grimm Aerosol Technik 2008]. Die Datenerfassung ist mit einer zeitlichen Auflösung von 6 Sekunden möglich. Die untere Grenze des Erfassungsbereichs liegt bei einem Partikeldurchmesser von 0,25 μm . Die Geräte werden in wetterfesten Grimm-Gehäusen betrieben. Ein Impaktor mit eingebauter Lufttrocknung dient der Probenahme. Die Lufttrocknung schaltet sich in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte ein- und aus (der Schwellenwert liegt nach Auskunft der Firma Grimm bei 65 %). Die Wetterschutzgehäuse werden auf Kisten gestellt, so dass die Probenahme in ca. 1,5 m Höhe erfolgt.

Zur Messung der NO_x , NO und NO_2 -Konzentration werden Stickoxidmonitore vom Typ Horiba APNA370 eingesetzt, die nach dem Chemolumineszenzprinzip arbeiten. Vom Hersteller wird eine Reproduzierbarkeit von +/- 1 % angegeben [HORIBA Europe GmbH 2010]. Die Messung ist mit dem verwendeten Gerät in einer zeitlichen Auflösung von fünf Sekunden möglich. Zur Probenahme wird ein Teflonschlauch mit einer Ansaugende in 1,5 m Höhe verwendet. Die Messgeräte werden vor jedem Messzeitraum von der Firma Horiba kalibriert.

Zur Messung der lokalen meteorologischen Kenngrößen werden die Wettersensoren des Grimm-Wetterschutzgehäuses eingesetzt. Damit ist die Messung der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte, des Luftdrucks sowie der Windgeschwindigkeit und Windrichtung in der gleichen zeitlichen Auflösung wie die Messung der Partikelkonzentration möglich.

Die lokalen verkehrlichen Kenngrößen werden manuell via Notebook und Microsoft-Excel erfasst. Jede Ausprägung einer Verkehrskenngröße und der zugehörige Zeitstempel werden unter Nutzung eines Excel-Makros mit einem Tastendruck erfasst.

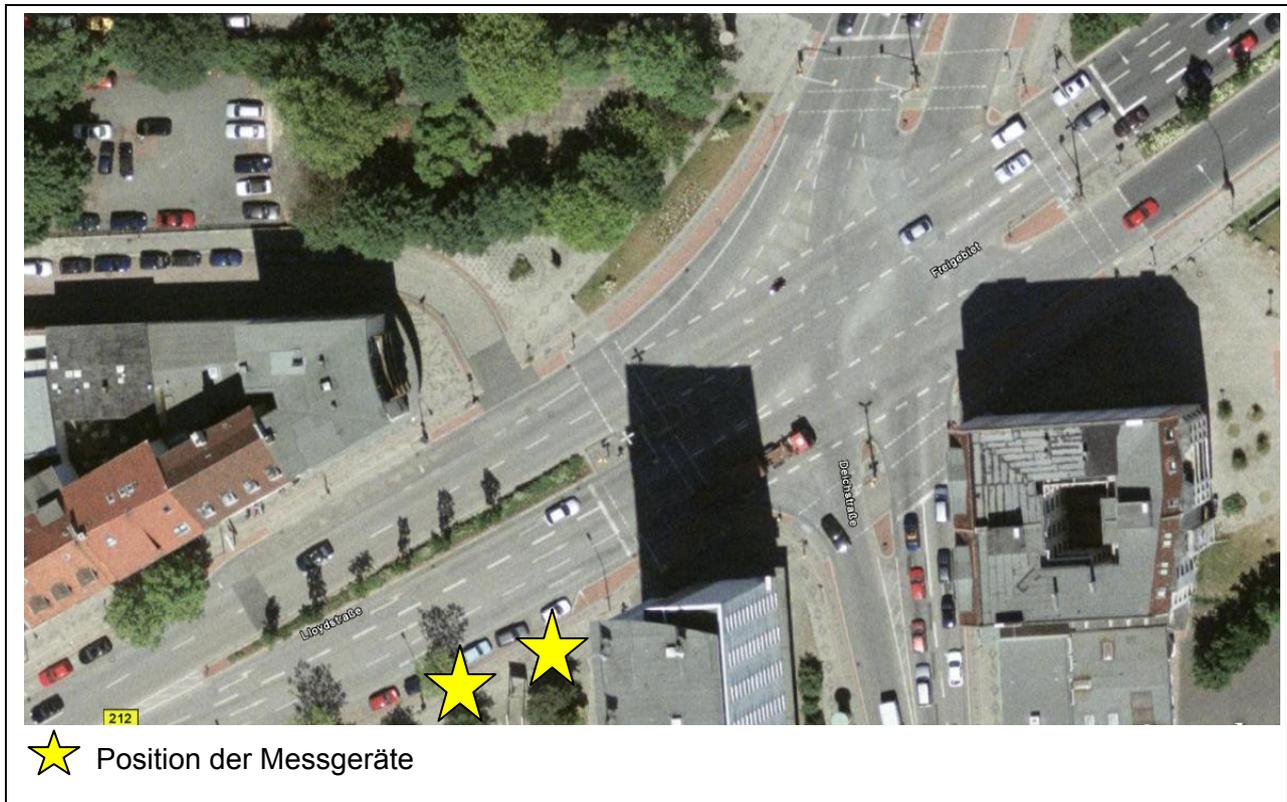


Abbildung 108: Standort der Umweltmessung im Testfeld Bremerhaven (Bildquelle: Google Earth).

Erhobene Kenngrößen im Testfeld

Nachstehend sind die im Testfeld vom Partner TUD-FVV erhobenen sowie zusätzlich in den Auswertungen berücksichtigten Kenngrößen mit dem genauen Messstandort und dem Messzeitraum aufgeführt. Die Messungen haben im Zeitraum vom 16.2.2009 bis zum 27.2.2009 stattgefunden.

Erfasste Kenngrößen	Messort	Messung in Messwoche	Zeitliche Auflösung der Erfassung
NO _x / NO / NO ₂	Straßenmessstelle TUD	1+2	5 s
	Städtische Messstelle Bremerhaven Hansastraße	1+2	30 min
PM ₁₀	Straßenmessstelle TUD	1+2	6 s
	Städtische Messstelle Bremerhaven Hansastraße	1+2	30 min
PM _{2,5}	Straßenmessstelle TUD	1+2	6 s
	Städtische Messstelle Bremerhaven Hansastraße	1+2	30 min
Windrichtung	Straßenmessstelle TUD	1+2	6 s
Windgeschwindigkeit	Straßenmessstelle TUD	1+2	6 s
Temperatur	Straßenmessstelle TUD	1+2	6 s
Luftfeuchte	Straßenmessstelle TUD	1+2	6 s
Luftdruck	Straßenmessstelle TUD	1+2	6 s
Verkehrsstärke	Straßenmessstelle TUD	1+2	5 s
	Verkehrsdetektoren Lloydstraße		1 min
Fahrsituation	Straßenmessstelle TUD	1+2	5 s
Fahrzeugart	Straßenmessstelle TUD	1+2	5 s
Fahrstreifen (zur erfassten Fahrsituation)	Straßenmessstelle TUD	1+2	5 s

Tabelle 53: Erfasste Kenngrößen im Testfeld Bremerhaven.

8.5.3.2 Datenfusion und Datenaufbereitung

Die Datenzusammenführung, die Qualitätssicherung der erhobenen Zeitreihen und die Ableitung weiterer Kenngrößen werden analog zur in 5.2.6.2 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Die im Detail durchgeführten Plausibilitätsprüfungen und die vorgenommenen Korrekturen können dem Anhang entnommen werden.

Im *Testfeld Bremerhaven* werden die erhobenen und abgeleiteten Kenngrößen zu einem 630 Sekunden-Mittelwert als kleinstes gemeinsames Vielfaches der am häufigsten geschalteten Umlaufzeiten von 70 Sekunden und 90 Sekunden sowie zu Stundenmittelwerten aggregiert¹³. Zur Untersuchung der hochfrequenten Komponente werden die Zeitreihen mit der Auflösung von fünf Sekunden sowie und 630 Sekunden verwendet. Die trendbereinigte hochfrequente Komponente wird aus der Differenz zwischen den hochfrequenten Messwerten und der niederfrequenten kubischen Regression über die Zeit ermittelt. Zur Untersuchung der niederfrequenten Komponente werden die Zeitreihen mit der Auflösung von einer Stunde herangezogen.

¹³ Im Testfeld Bremerhaven wurden auch Umlaufzeiten von 60 und 80 Sekunden geschaltet, im gesamten Messzeitraum aber nur für etwa eine Stunde. Sie werden nicht weiter berücksichtigt.

8.5.3.3 Datenanalyse

Qualitative Interpretation der erhobenen Zeitreihen

Eine Auswahl der erfassten Zeitreihen ist als Sequenzdiagramm in Abbildung 109 (1. Messwoche) und in Abbildung 110 (2. Messwoche) dargestellt. Die Gegenüberstellung der Tagesganglinien zeigt dabei nur wenige klar erkennbare Abhängigkeiten: So ist eine Ähnlichkeit im relativen Verlauf der NO_x - und der PM_x -Ganglinie vorhanden, die absolute Ausprägung einzelner Maxima unterscheidet sich jedoch deutlich. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Immissionskonzentrationen ist gut erkennbar, insbesondere in der zweiten Messwoche bei stark schwankender Windgeschwindigkeit. Der erwartete entgegengesetzte Verlauf von Temperatur und Luftfeuchte ist für den gesamten Messzeitraum gut erkennbar. Weiter ist ein entgegengesetzter Verlauf von Temperatur und Stickoxidkonzentration sichtbar; besonders deutlich wird dies bei sehr niedrigen Temperaturen um 0°C . Ein typischer Tagesgang mit niedrigen morgendlichen Werten, einer Mittagsspitze und sinkenden Werten zur Abendzeit ist bei den Kenngrößen Temperatur und Luftdruck vorhanden. Die Verkehrsstärke weist keine Morgen- sondern nur eine Abendspitze auf und liegt im Mittel mit deutlich unter 1.000 Fz/h auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Zusammenhänge zwischen den Ganglinien der Verkehrskenngrößen und den Immissionskenngrößen sind zunächst nicht erkennbar.

Die regionalen meteorologischen Daten weisen in der ersten Messwoche grundsätzlich auf austauscharme Wetterlagen mit Inversionen auch während des Tages hin. So lassen sich vom 16.2.2009 bis 20.2.2009 zur Mittagszeit Höheninversionen, zumeist bei ca. 500 m feststellen. Am 18.2. und am 20.2. liegen zur Nachtzeit mehrschichtige Inversionen vor, die vermutlich für die hohen Schadstoffwerte zum Messbeginn verantwortlich sind. Die zweite Messwoche zeigt eine gute Durchlüftung und weist nur am 23.2.2009 und am 24.2.2009 schwache Höheninversionen auf. Am 24.2. wird eine stabile Höheninversion zur Nachtzeit festgestellt, die für die hohe morgendliche Immissionskonzentration verantwortlich sein kann [Kandler 2009].

Zur Überprüfung der Ähnlichkeit und damit der Möglichkeit zur gemeinsamen Betrachtung der beiden Messwochen in den Testfeldern wurden die statistischen Kennwerte Mittelwert, Varianz, das 5. und 95. Perzentil, die Änderungsrate und die Autokorrelation im 1. Lag ermittelt. Die statistische Verteilung der erhobenen Kenngrößen wird anhand eines Kolmogorov-Smirnov-Tests (K-S-Test) und anhand einer qualitativen Interpretation der Histogramme beurteilt (vgl. Anhang).

Es sind deutliche Unterschiede zwischen den beiden Messwochen für den NO_x -Mittelwert, die Varianz der großen Partikel, den Mittelwert und die Varianz der Windgeschwindigkeit sowie die Varianz der Luftfeuchte und des Luftdrucks erkennbar. Aus diesem Grund werden die beiden Messwochen bei der Entwicklung eines Erklärungsmodells als unterschiedliche Grundgesamtheiten und somit getrennt voneinander betrachtet.

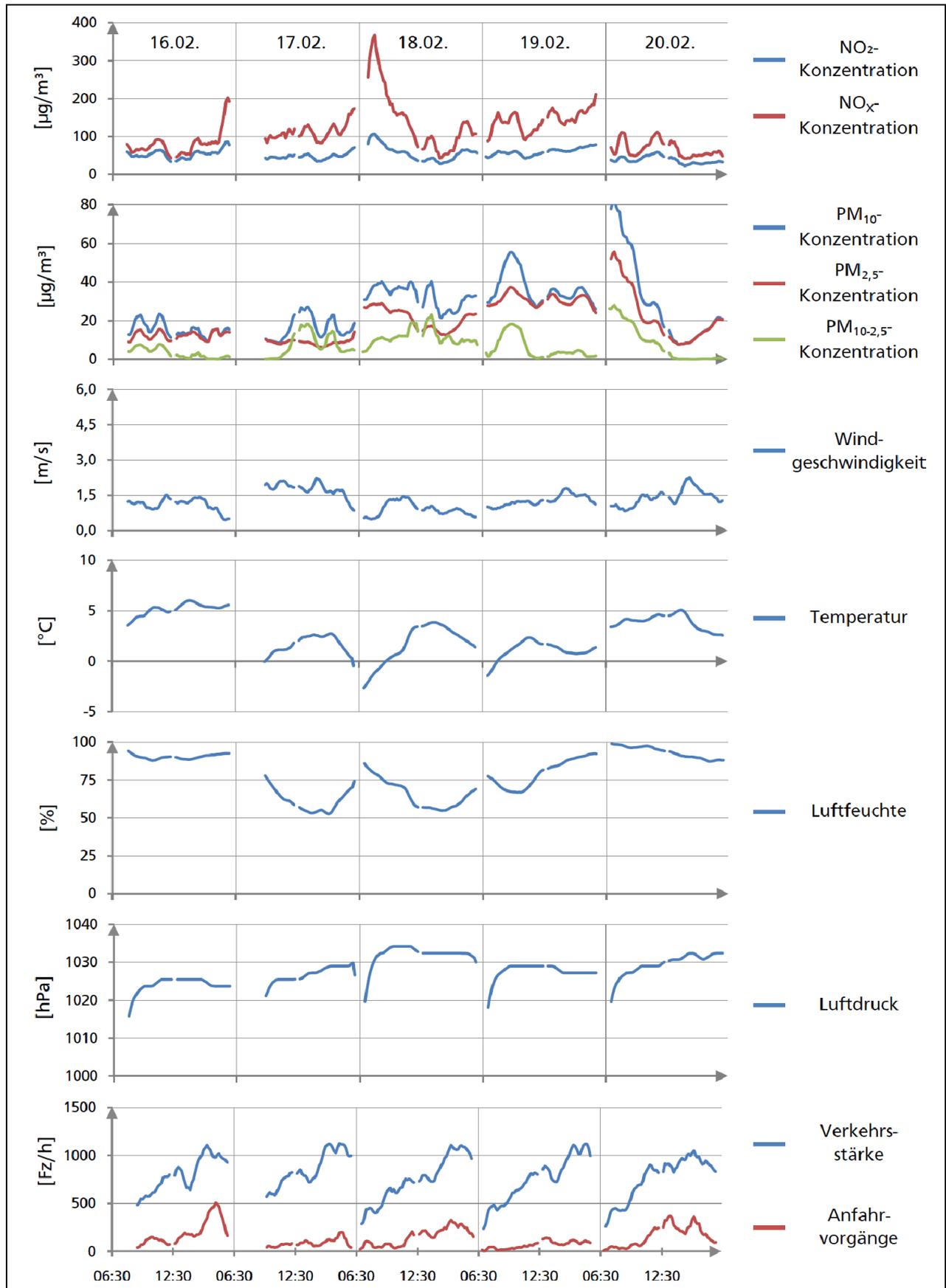


Abbildung 109: Ausgewählte Zeitreihen der ersten Messwoche im Testfeld Bremerhaven (gleitende 1h Mittelwerte).

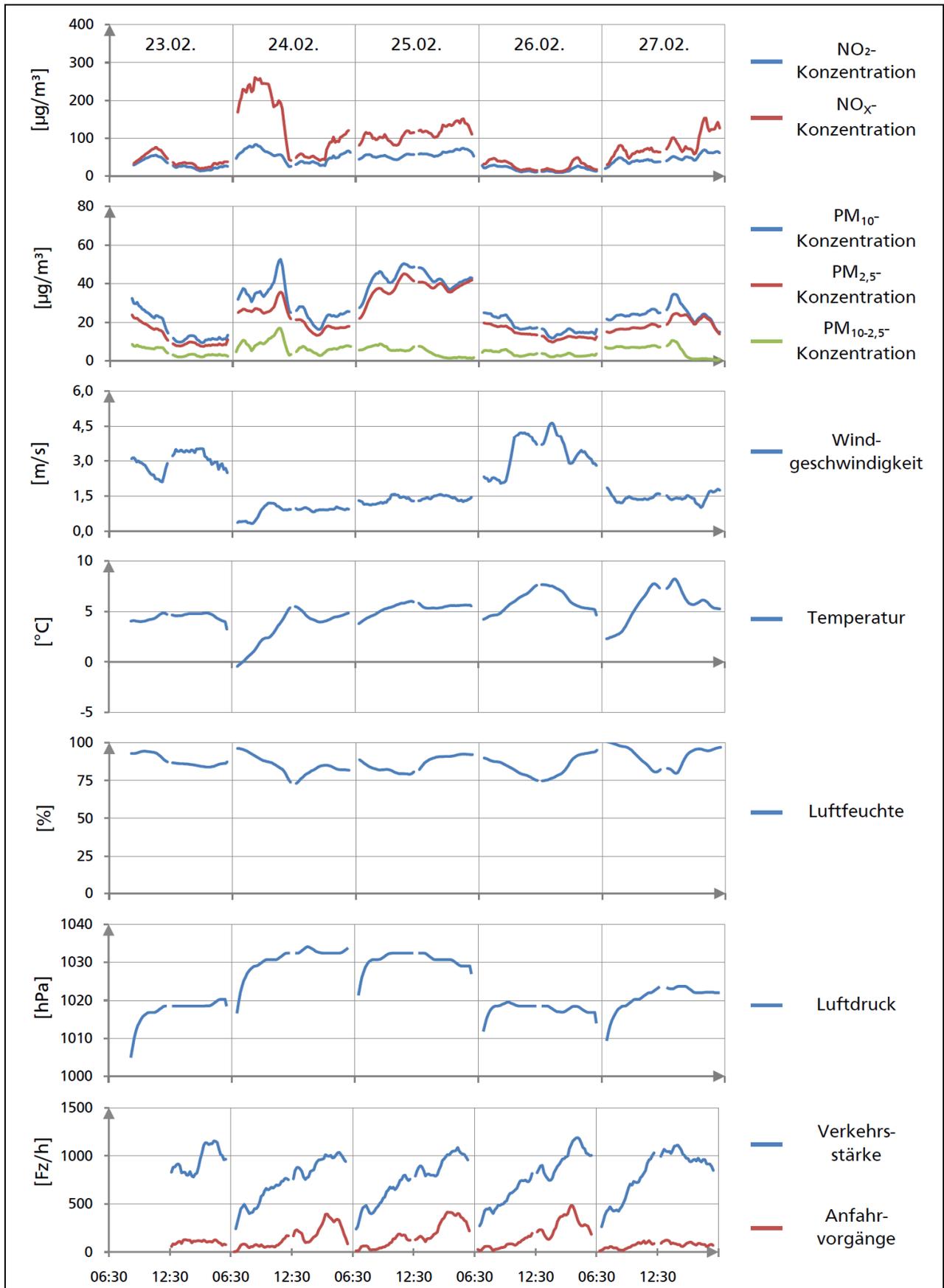


Abbildung 110: Ausgewählte Zeitreihen der zweiten Messwoche im Testfeld Bremerhaven (gleitende 1h Mittelwerte).

Die Änderungsraten der Kenngrößen bestätigen die Annahme, dass die immissions- und windbezogenen sowie die verkehrlichen Kenngrößen die mit Abstand höchsten Änderungsraten aller identifizierten Einflussgrößen auf die Immissionen aufweisen. Sämtliche Kenngrößen weisen eine hohe Autokorrelation im ersten Lag auf. Der K-S-Test zeigt für die Kenngrößen NO₂-Konzentration, Verkehrsstärke und Durchfahrten eine Normalverteilung in beiden Messwochen an. Die Histogramme der Temperatur und der (SV-)Verkehrsstärke zeigen eingipflige, symmetrische Verteilungen mit grundsätzlicher Ähnlichkeit zur Normalverteilung. Die Histogramme für die weiteren Immissionskenngrößen ebenso wie für die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung und die Anfahrvorgänge zeigen linkssteile Verteilungen. Der Luftdruck und die Luftfeuchte weisen teils mehrgipflige, teils auch rechtssteile Verteilungen auf.

Feststellen von Zusammenhängen zwischen Verkehrskenngrößen und Immissionskenngrößen

Verfahrensbedingt lassen sich die Methoden der Frequenzanalyse nur auf lückenlose Zeitreihen anwenden. Diese Voraussetzung ist weder bei den Daten aus dem Testfeld Bremerhaven, noch bei den Daten aus dem Testfeld Hamburg erfüllt. Die Kreuzspektrumsanalyse wird daher für die einzelnen lückenlosen Zeitreihenabschnitte gesondert durchgeführt (vgl. Anhang) und als quadratische Kohärenz $Ch(h)$ dargestellt. Die quadratische Kohärenz kann als spektrales Bestimmtheitsmaß mit dem Wertebereich $0 \leq CH \leq 1$ verstanden werden. Sie wird für die trendbereinigten NO_x-, PM₁₀, PM_{2,5} und PM_{10-2,5}-Zeitreihen, jeweils kombiniert mit der Zeitreihe der trendbereinigten Verkehrsstärke, auf Grundlage der 5-Sekunden-Daten ermittelt. In Tabelle 54 sind die Zeiträume dargestellt, für die eine signifikante quadratische Kohärenz vorliegt.

Für einen großen Anteil der untersuchten Zeiträume werden signifikante spektrale Zusammenhänge nachgewiesen. So weist die Varianz NO_x-Belastung zu nahezu allen Zeiträumen eine signifikante periodische Übereinstimmung mit der Verkehrsstärke auf. Für die PM_x-Konzentration ist dieser Anteil etwas geringer als bei der NO_x-Konzentration. Deutlich reduziert ist der erkannte Zusammenhang hingegen für die Umlaufzeiten, die zu Schwachverkehrszeiten geschaltet wurden (70 Sekunden). Sämtliche erkannten Periodizitäten entsprechen unter Berücksichtigung von Messungenauigkeiten den geschalteten Umlaufzeiten in den beiden Testfeldern.

Es kann festgehalten werden, dass die untersuchten Immissionskenngrößen (als trendbereinigte Kenngrößen) eine Periodizität aufweisen, die der Umlaufzeit der Lichtsignalsteuerung und damit der Periodizität des Verkehrs in der Knotenpunktzufahrt entspricht. Die Hypothese, dass die hochfrequenten Immissionszeitreihen maßgeblich von den hochfrequenten Verkehrszeitreihen bestimmt werden, kann aufrecht erhalten werden. Ferner kann davon ausgegangen werden, dass das angewendete Verfahren zur Trendbereinigung grundsätzlich für den vorgesehenen Zweck geeignet ist.

Geschaltete Umlaufzeit	Untersuchter Zeitraum	Davon signifikante Kohärenz für einen Zeitraum von	bei Periode
90 s	103 h / 84 h	83 h für NO _x	89,3 s
		71 h für PM ₁₀	
		71 h für PM _{2,5}	
		71 h für PM _{10-2,5}	
75 s	84 h	57 h für NO _x	74,6 s
		60 h für PM ₁₀	
		36 h für PM _{2,5}	
		22 h für PM _{10-2,5}	
70 s	103 h	32 h für NO _x	70,4 s
		22 h für PM ₁₀	
		22 h für PM _{2,5}	
		22 h für PM _{10-2,5}	
45 s	103 h	51 h für NO _x	45,1 s
		8 h für PM ₁₀	
		29 h für PM _{2,5}	
		10 h für PM _{10-2,5}	

Tabelle 54: Zeiträume aus den Feldmessungen in Bremerhaven, für die ein signifikanter spektraler Zusammenhang zwischen gemessener Immissionskonzentration und Verkehrsstärke vorliegt.

Identifikation der wesentlichen Einflussgrößen auf die Immissionskenngrößen

Für die Kreuzkorrelationsanalyse werden die 630-Sekunden-Daten verwendet. Die Daten werden auf Phasenverschiebungen bis ca. eine Stunde untersucht. Darüber hinaus gehende Phasenverschiebungen würden die für die weiteren Untersuchungen verfügbare Datenmenge zu stark reduzieren. Weiterhin werden nur solche Phasenverschiebungen näher betrachtet, die für beide Messwochen eine ähnliche Größenordnung aufweisen und die Ursache zeitlich vor der Wirkung anzeigen.

Die partielle Korrelation wird ebenfalls auf Grundlage der genannten Aggregationsebenen untersucht. Die Untersuchung wird getrennt für meteorologische und verkehrliche Einflussfaktoren durchgeführt. Als Kontrollvariablen werden bis zu zwei Einflussfaktoren aus der jeweils nicht untersuchten Gruppe ausgewählt. Dabei werden nur Einflussfaktoren ausgewählt, die inhaltlich deutlich voneinander abgrenzbar sind (zum Beispiel Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte) und die in einer bivariaten Korrelationsuntersuchung eine signifikante Korrelation zur untersuchten Luftschadstoffkenngröße aufweisen.

Für den niederfrequenten Ansatz werden die erhobenen Kenngrößen in ihrer originalen Skala und in der logarithmierten Skala auf Kreuzkorrelation und partielle Korrelation untersucht. Für den hochfrequenten Ansatz werden die trendbereinigten Kenngrößen in ihrer originalen Skala und in der logarithmierten Skala untersucht.

Die Kreuzkorrelationsanalyse zeigt für die originalskalierte NO_x-Konzentration signifikante negative Phasenverschiebungen der Temperatur um etwa 45 Minuten an. Es besteht prinzipiell

die Möglichkeit indirekter, verzögerter Ursache-Wirkungs-Beziehungen. In der Datentabelle wird daher eine neue Kenngröße als Lag-Variable mit entsprechender Phasenverschiebung gebildet.

Für die trendbereinigten Kenngrößen PM₁₀- und PM_{2,5}-Konzentration werden signifikante negative Phasenverschiebungen der Verkehrsstärke und der Anfahrvorgänge um etwa 70 Minuten angezeigt. Für sekundäre Partikel ist eine zeitlich verzögerte Messbarkeit plausibel (vgl. 5.2.1.2). In der Datentabelle wird eine entsprechende Phasenverschiebung vorgenommen.

Für die weiteren Kenngrößen ergeben sich nach Phasenverschiebungen unter den festgelegten Bedingungen keine signifikanten Korrelationen. Unplausibel ist, dass die Phasenverschiebung der Kenngrößen Verkehrsstärke und Anfahrvorgänge weder im Testfeld Hamburg, noch bei weiteren verkehrlichen Kenngrößen im Testfeld Bremerhaven auftritt.

Tabelle 56 zeigt die wesentlichen Ergebnisse der partiellen Korrelationsanalyse für den niederfrequenten Ansatz. Tabelle 55 zeigt die Ergebnisse für die hochfrequenten Kenngrößen. Dargestellt sind sämtliche Kenngrößen mit signifikanter Korrelation sowie die Richtung des Zusammenhangs, getrennt nach den untersuchten Luftschadstoffen. Die Kürzel BH01/BH02 stehen dabei für die unterschiedlichen Messwochen in den Testfeldern. Sofern eine Prädiktorkenngröße in einer Messwoche keinen signifikanten Einfluss besitzt, wird das Vorzeichen nicht angegeben.

Die Detailtabellen zur partiellen Korrelation können dem Anhang entnommen werden.

Kenngröße	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM _{10-2,5}
	BH01 / BH02	BH01 / BH02	BH01 / BH02	BH01 / BH02
Windgeschwindigkeit		- / -		- /
Windrichtung-Vektor	+ / +	+ / +		+ / +
Windvektor	+ / +	+ / +	/ +	+ / +
Verkehrsstärke	+ / +			
Verkehrsstärke (Lag-Variable)		+ / +	+ / +	/ +
Verkehrsstärke SV	+ / +			+ /
Verkehrsstärke SV auf 1. FS	+ / +			+ / +
Verkehrsstärke SV / Verkehrsstärke	+ /			
Anfahrvorgänge	+ / +		- /	/ -
Anfahrvorgänge (Lag-Variable)		/ +		
Durchfahrten		/ +	/ +	/ +
Durchfahrten SV	+ /			+ / +

Tabelle 55: Festgestellte signifikante Korrelationen (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %) zwischen logarithmierten trendbereinigten Einflussfaktoren und logarithmierten, trendbereinigten Immissionskenngrößen für den hochfrequenten Ansatz. +/- steht für die Richtung des Zusammenhangs.

Kenngröße	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM _{10-2,5}
	BH01 / BH02	BH01 / BH02	BH01 / BH02	BH01 / BH02
Windgeschwindigkeit	- / -	- / -	- / -	- / -
Windrichtung-Vektor	+ / +	+ / +	+ / +	+ / +
Windvektor	+ / +	+ / +	+ / +	+ / +
Temperatur	- / -	- /	- /	- / -
Temperatur (Lag-Variable)	- / -	- / -	- /	- / -
Temperatur-Steigung				+ / +
Luftfeuchte	- / +		+ /	- / -
Luftfeuchte-Steigung			+ /	
Luftdruck	/ +	+ / +	+ / +	+ / +
Wasserdampf-Verhältnis	- / -	- /		- / -
NO _x -Hintergrund	/ +			
PM ₁₀ -Hintergrund		+ / +	+ / +	+ /
Verkehrsstärke	/ +	- / -	- /	- / -
Verkehrsstärke SV	+ /	+ / +		+ / +
Verkehrsstärke auf 1. FS	/ +	- /	- /	
Verkehrsstärke SV auf 1. FS	+ /	/ +		+ / +
Verkehrsstärke SV / Verkehrsstärke	+ /	+ / +	+ /	+ / +
Anfahrvorgänge	- /	- /	- /	- / -
Anfahrvorgänge / Verkehrsstärke	- /	- /	- / +	- / -
Anfahrvorgänge SV		- /	- /	
Durchfahrten	+ / +	- / -	- / -	
Durchfahrten SV	+ /	+ /	+ /	+ / +
NO _x -Emissionen	/ +	- /	- /	
PM _{2,5} -Emissionen	+ /	- /	- /	- / -

Tabelle 56: Festgestellte signifikante Korrelationen (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %) zwischen logarithmierten Einflussfaktoren und logarithmierten Immissionskenngrößen für den niederfrequenten Ansatz. +/- steht für die Richtung des Zusammenhangs.

Quantifizieren der Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und den Immissionskenngrößen (Modellentwicklung)

Mit den festgestellten relevanten Einflussgrößen wird ein lineares autoregressives Erklärungsmodell gemäß des in Unterabschnitt 5.2.6.3 beschriebenen Ansatzes entwickelt. In das Erklärungsmodell werden nicht alle der identifizierten relevanten Einflussgrößen aufgenommen, da sich diese teilweise inhaltlich überschneiden und in Bezug auf ihren Beitrag zur Varianzaufklärung korrelieren. Daher werden die beschriebenen Merkmalsselektionsverfahren angewendet, so dass sich eine reduzierte Menge potenzieller Prädiktoren ergibt. Die Ergebnisse der verschiedenen Merkmalselektionsverfahren sind im Anhang dargestellt. Auch nach Anwendung dieser Verfahren ist allerdings nicht sichergestellt, dass eine optimale Merkmalsmenge mit maximaler Varianzaufklärung und mit minimaler inhaltlicher Überschneidung gefunden wird. Daher wird die resultierende Merkmalsmenge kritisch auf inhaltliche Überschneidungen geprüft und weitere Kenngrößen aus der Menge potenzieller

Prädiktoren entfernt und mögliche alternative Prädiktoren (sofern sie in den Korrelationsuntersuchungen als relevant identifiziert wurden) hinzugefügt. Im Zuge dieses qualitativen Auswahlprozesses wird zudem auf möglichst einheitliche Prädiktoren in den beiden Messwochen sowie für die nieder- und hochfrequenten Modelle geachtet.

Die Modellentwicklung wird in beiden Testfeldern getrennt nach niederfrequentem und nach hochfrequentem Ansatz, für die zu untersuchenden Immissionskenngrößen NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ und $\text{PM}_{10-2,5}$ sowie die für die einzelnen Messwochen in den Testfeldern durchgeführt.

Sämtliche Prädiktorkenngrößen in den niederfrequenten Modellen sind logarithmierte Kenngrößen. Die Prädiktorkenngrößen in den hochfrequenten Modellen sind logarithmierte und anschließend trendbereinigte Kenngrößen.

Im Folgenden werden die verschiedenen Erklärungsmodelle differenziert nach den betrachteten Immissionskenngrößen anhand statistischer Kenngrößen zur Modellgüte sowie anhand einer graphischen Gegenüberstellung von Messung und Modell dargestellt. Im Sequenzdiagramm werden die modellierten Werte ohne Berücksichtigung der Lag-Variable dargestellt. Eine Einbeziehung der Lag-Variable als Modellfehler zum Zeitpunkt t-1 würde voraussetzen, dass das Modell kontinuierlich anhand einer Messung geeicht wird. Das Ziel des Erklärungsmodells ist es jedoch, den Anteil der identifizierten Prädiktoren an den gemessenen Immissionen festzustellen. Die Differenz zwischen den modellierten Werten (*ohne* Berücksichtigung der Lag-Variable) und den gemessenen Werten vermittelt daher einen guten Eindruck der tatsächlich ungeklärten Varianz.

Das entwickelte Erklärungsmodell werde anhand der beschriebenen Kriterien bewertet und fachlich interpretiert. Die Kürzel BH01/BH02 stehen dabei für die unterschiedlichen Messwochen in den Testfeldern. Die Prüfung der erforderlichen statistischen Voraussetzungen für die weitere Verwendung des Modells ist ebenso wie detaillierte Angaben zu den einzelnen Prädiktorkenngrößen im Anhang dargestellt.

Erklärungsmodell für die gemessene NO_x -Konzentration:

Das *niederfrequente Modell* erklärt in beiden Messwochen etwa 80 % der Varianz der NO_x -Konzentration. Der relative Standardfehler, bezogen auf die mittlere gemessene Immissionskonzentration, liegt in einer Größenordnung von etwa 35 % (Tabelle 57).

Modell	Bestimmtheitsmaß R^2	Relativer Standardfehler rSE
	BH01 / BH02	BH01 / BH02
Niederfrequent	0,73 / 0,85	31% / 37%
Hochfrequent	0,21 / 0,43	44% / 19%

Tabelle 57: Übergreifende Modellparameter der nieder- und hochfrequenten NO_x -Erklärungsmodelle.

Das *hochfrequente Modell* erklärt in der ersten Messwoche nur etwa 20 % und in der zweiten Messwoche etwa 40 % der Varianz. Der relative Standardfehler, bezogen auf die doppelte Standardabweichung der trendbereinigten NO_x -Zeitreihe, liegt in einer Größenordnung von 40 % in der ersten Messwoche und bei knapp 20 % in der zweiten Messwoche (Tabelle 57).

Die graphische Gegenüberstellung von gemessenen und modellierten Werten im niederfrequenten Ansatz (Abbildung 111) zeigt, dass der Tagesgang bis auf einzelne Ausnahmen (18.2.2010) gut wiedergegeben wird. Im relativen Verlauf zeigt das Modell der ersten Messwoche trotz des niedrigeren Bestimmtheitsmaßes eine höhere Güte als das Modell der zweiten Messwoche. Einzelne Maxima und Minima innerhalb eines Tages werden in der ersten Messwoche zumeist gut vom Modell abgebildet. In der zweiten Messwoche ist dies nur vereinzelt der Fall.

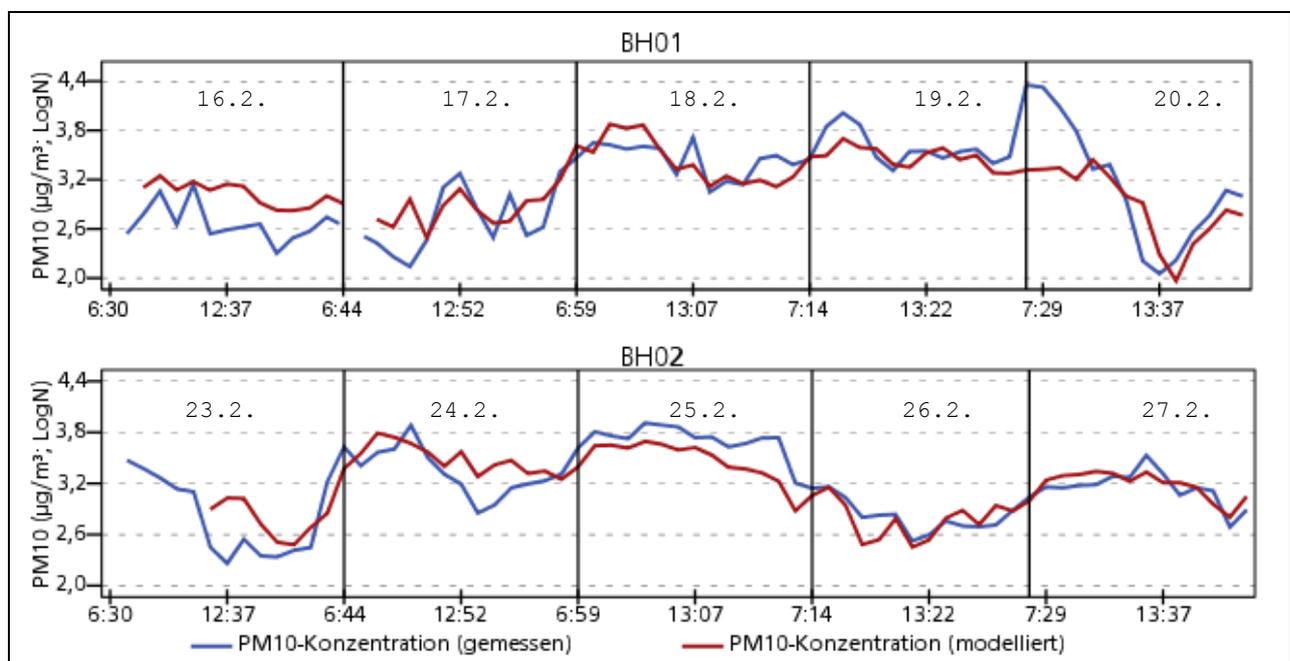


Abbildung 111: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der niederfrequenten NO_x -Konzentration im Testfeld Bremerhaven (getrennt nach Messwochen BH01 und BH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

Für den hochfrequenten Ansatz zeigt die graphische Gegenüberstellung (Abbildung 111) an etwa sechs Tagen eine weitestgehende Ähnlichkeit in Bezug auf den relativen Verlauf, wobei in der ersten Messwoche nur für den 17.2. eine Ähnlichkeit vorhanden ist. An nahezu allen Tagen wird die absolute Ausprägung der Maxima und Minima vom Modell unterschätzt.

Tabelle 58 zeigt die Prädiktoren im Erklärungsmodell und die Vorzeichen ihrer Koeffizienten. Sofern eine Prädiktorengröße in einer Messwoche keinen signifikanten Einfluss besitzt, wird das Vorzeichen nicht angegeben.

Die Windgeschwindigkeit zeigt im NO_x -Modell signifikante Wirkungen – höhere Windgeschwindigkeiten führen demnach zu niedrigeren Immissionen. Die positiven Vorzeichen

von Windrichtung und Windrichtungsvektor zeigen für Messungen im Luv in Bremerhaven höhere Immissionen.

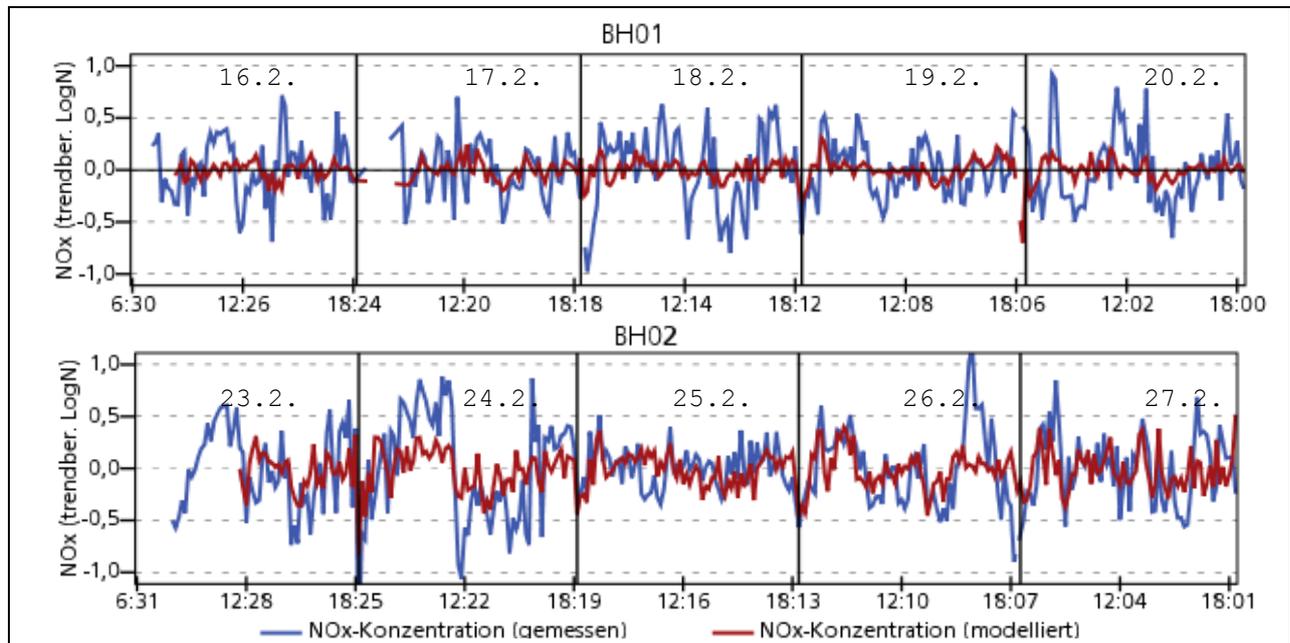


Abbildung 112: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der hochfrequenten NO_x-Konzentration im Testfeld Bremerhaven (getrennt nach Messwochen BH01 und BH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

Prädiktorengröße	Vorzeichen des Regressionskoeffizienten	
	niederfrequent	hochfrequent
	BH01/BH02	BH01/BH02
Windgeschwindigkeit	-/-	-/-
Windrichtung Vektor	+/+	+/+
Wasserdampf-Verhältnis	-/-	
Ozon-Hintergrund	-/-	
Durchfahrten	+/+	
Verkehrsstärke		+/+

Tabelle 58: Prädiktoren der NO_x-Modelle (95 %-Signifikanzniveau).

Auch der Luftdruck und das Wasserdampf-Mischungsverhältnis, das neben der Luftfeuchte und der Temperatur auch vom Luftdruck abhängt, haben im niederfrequenten Modell einen erheblichen Erklärungsanteil. Grundsätzlich muss bei beiden Kenngrößen aber von indirekten Einflüssen auf die Immissionen ausgegangen werden. Sowohl der Luftdruck als auch das Wasserdampf-Mischungsverhältnis sind dabei als Indikatoren für die Gesamtwetterlage oder für den Luftmassenaustausch zu verstehen. Der Prädiktor Ozon-Hintergrundkonzentration hat einen signifikanten antiproportionalen Einfluss auf die modellierten NO_x-Werte.

Verkehrliche Kenngrößen in der ersten Messwoche haben ein deutlich höheres Gewicht als in der zweiten Messwoche, was aufgrund der hohen mittleren Windgeschwindigkeiten in der

zweiten Messwoche plausibel ist. Als kritisch wird jedoch angesehen, dass die Kenngröße Durchfahrten einen höheren Erklärungsanteil aufweist als beispielsweise die Gesamtverkehrsstärke oder die Schwerverkehrsstärke.

Festgehalten werden kann, dass das NO_x-Erklärungsmodell wesentliche Anteile der Varianz der NO_x-Konzentration mit verhältnismäßig geringem Standardfehler aufklären kann. Die im Modell enthaltenen meteorologischen Prädiktoren und die Vorzeichen der Regressionskoeffizienten sind zum Großteil fachlich plausibel. Anhand der statistischen Kenngrößen und der graphischen Gegenüberstellung wird das Bremerhavener Modell als „befriedigend“ bewertet.

Das hochfrequente NO_x-Erklärungsmodell im Testfeld Bremerhaven wird anhand des visuellen Vergleichs nur in der zweiten Messwoche als „gut“ bewertet. Das Modell der ersten Messwoche wird als „nicht ausreichend“ bewertet und verworfen. Die Prädiktoren und die Vorzeichen der Regressionskoeffizienten sind fachlich plausibel.

Erklärungsmodell für die gemessene PM₁₀-Konzentration

Tabelle 59 zeigt die übergreifenden Modellparameter des PM₁₀-Erklärungsmodells. Das niederfrequente Modell erklärt 70 bis deutlich über 80 % der Varianz der PM₁₀-Konzentration. Der relative Standardfehler, bezogen auf die mittlere gemessene Immissionskonzentration, liegt bei etwa 35 % in der ersten Messwoche und knapp 20 % in der zweiten (Tabelle 59).

Das hochfrequente Modell erklärt etwa 50 % der Varianz der hochfrequenten Komponente der PM₁₀-Konzentration. Der relative Standardfehler, bezogen auf die doppelte Standardabweichung der trendbereinigten Immissionskonzentration, liegt unter 20 % (Tabelle 59).

Modell	Bestimmtheitsmaß R ²	Relativer Standardfehler rSE
	BH01 / BH02	BH01 / BH02
Niederfrequent	0,72 / 0,86	35% / 19%
Hochfrequent	0,50 / 0,52	17% / 19%

Tabelle 59: Übergreifende Modellparameter der nieder- und hochfrequenten PM₁₀-Erklärungsmodelle.

Die visuelle Prüfung des niederfrequenten Modells (Abbildung 113) lässt erkennen, dass der modellierte Tagesgang in beiden Messwochen sowohl in Bezug auf die absoluten Werte als auch in Bezug auf den relativen Verlauf an nahezu allen Tagen mit den gemessenen Werten übereinstimmt.

Die graphische Gegenüberstellung von gemessenen und modellierten Werten (Abbildung 114) des hochfrequenten Modells im Testfeld Bremerhaven zeigt für 6 von 10 Messtagen eine hohe Ähnlichkeit der Zeitreihen. Erhebliche Abweichungen sowohl in den absoluten Werten als auch im relativen Verlauf sind am 16.2., am 24.2., am 25.2. und am 27.2. erkennbar.

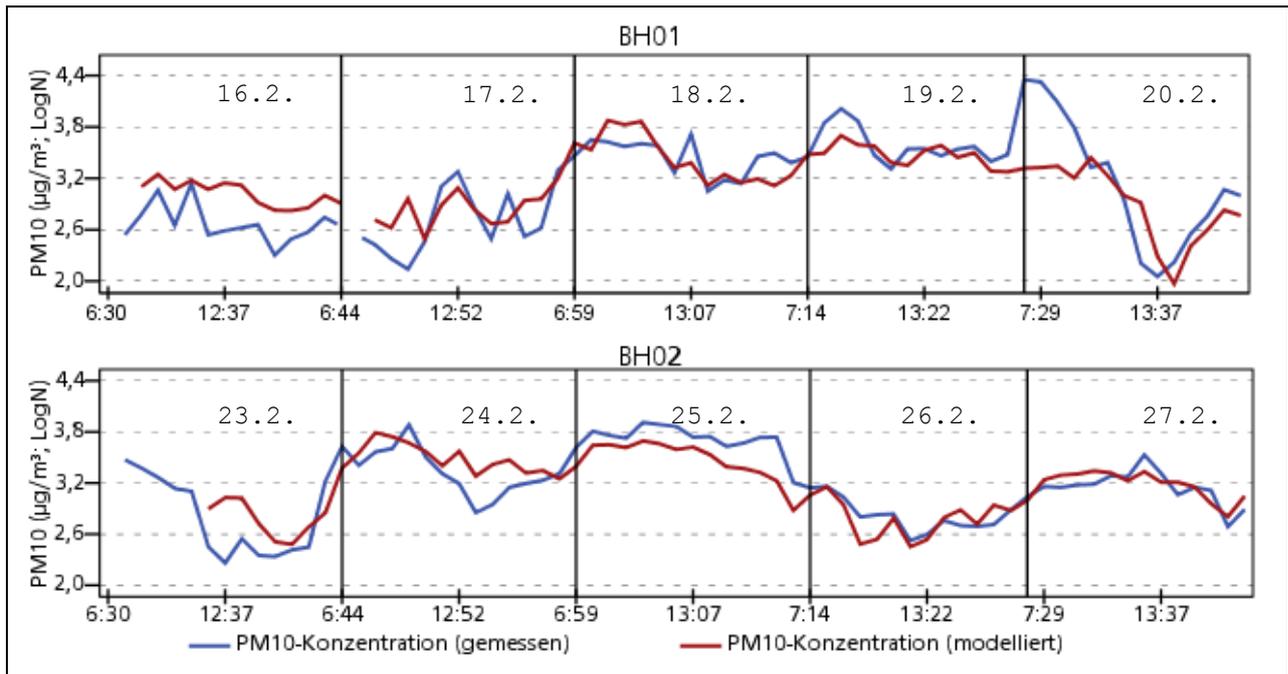


Abbildung 113: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der niederfrequenten PM_{10} -Konzentration im Testfeld Bremerhaven (getrennt nach Messwochen BH01 und BH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

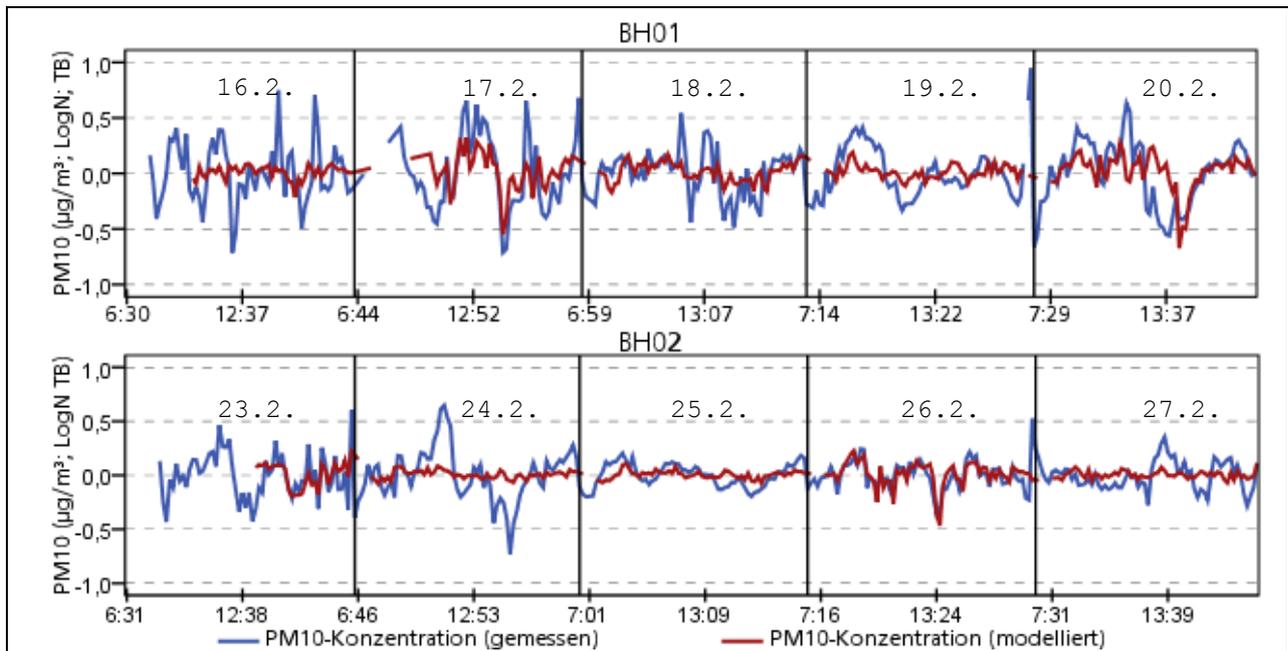


Abbildung 114: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der hochfrequenten PM_{10} -Konzentration im Testfeld Bremerhaven (getrennt nach Messwochen BH01 und BH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

Tabelle 60 zeigt die Prädiktoren in den Erklärungsmodellen und die Vorzeichen ihrer Regressionskoeffizienten. Sofern eine Prädiktorengröße in einer Messwoche keinen signifikanten Einfluss besitzt, wird das Vorzeichen nicht angegeben.

Prädiktorkenngröße	Vorzeichen der Regressionskoeffizienten	
	niederfrequent	hochfrequent
	BH01/BH02	BH01/BH02
Windvektor	+/+	+/+
Luftdruck	/+	
PM10-Hintergrund	+/+	
SV-Anteil	+/+	
Verkehrsstärke (Lag-Variable)		+/+

Tabelle 60: Prädiktoren der PM₁₀-Modelle (95 %-Signifikanzniveau).

Die lokalen windbezogenen Kenngrößen zeigen eine hohe Relevanz. Der Windvektor geht hier als kombinierte Kenngröße aus Windrichtung und Windgeschwindigkeit signifikant mit einem plausiblen positiven Vorzeichen des Koeffizienten ein.

Auch der Luftdruck leistet im niederfrequenten Modell einen signifikanten Beitrag zur Varianzaufklärung. Das positive Vorzeichen ist aufgrund mehrerer Inversionswetterlagen in der zweiten Messwoche plausibel. Zudem trägt die PM₁₀-Hintergrundbelastung erheblich zur Aufklärung der PM₁₀-Varianz mit einem plausiblen positiven Vorzeichen bei.

Der Schwerverkehrsanteil ist der einzige verkehrsbezogene Prädiktor im niederfrequenten Modell. Analog zum NO_x-Modell ist der Erklärungsbeitrag in der ersten Messwoche erheblich und in der zweiten Messwoche niedriger bzw. nahe der Signifikanzgrenze.

Im hochfrequenten Modell ist die Verkehrsstärke als zeitlich verschobene Lag-Variable in beiden Messwochen maßgebend. Die ist grundsätzlich plausibel, kritisch zu bewerten ist allerdings, dass die zeitliche Verschiebung nur im Testfeld Bremerhaven, nur für die Kenngröße Gesamtverkehrsstärke und nur in der hochfrequenten Konzentrationskomponente erkennbar ist.

Die Modellierungsgüte des niederfrequenten Erklärungsmodells wird aufgrund der statistischen Kenngrößen und der visuellen Prüfung als „befriedigend“ bewertet. Die Modellierungsgüte des hochfrequenten Erklärungsmodells wird anhand der visuellen Prüfung als „befriedigend“ bewertet.

Erklärungsmodelle für die gemessene PM_{2,5}-Konzentration

Tabelle 61 zeigt die übergreifenden Modellparameter der PM_{2,5}-Erklärungsmodelle. Die niederfrequenten Modelle erklären in beiden Messwochen teils deutlich über 80 % der Varianz der PM_{2,5}-Konzentration. Der relative Standardfehler, bezogen auf die mittlere gemessene Immissionskonzentration, liegt in einer Größenordnung von 10 bis 30 %. Analog zu den PM₁₀-Modellen erklären die hochfrequenten Modelle abgesehen von der ersten Messwoche im Testfeld Hamburg mehr als 50 % der Varianz der hochfrequenten Komponente der PM_{2,5}-Konzentration bei einem relativen Standardfehler von etwa 30 %.

Modell	Bestimmtheitsmaß R^2	Relativer Standardfehler rSE
	BH01 / BH02	BH01 / BH02
Niederfrequent	0,81 / 0,84	28% / 23%
Hochfrequent	0,51 / 0,61	34% / 30%

Tabelle 61: Übergreifende Modellparameter der nieder- und hochfrequenten $PM_{2,5}$ -Erklärungsmodelle.

Die graphische Gegenüberstellung von gemessenen und modellierten Werten (Abbildung 115) im niederfrequenten Erklärungsmodell zeigt sowohl für die absoluten Werte als auch für den relativen Verlauf der Tagesganglinie an nahezu allen Tagen eine hohe Ähnlichkeit.

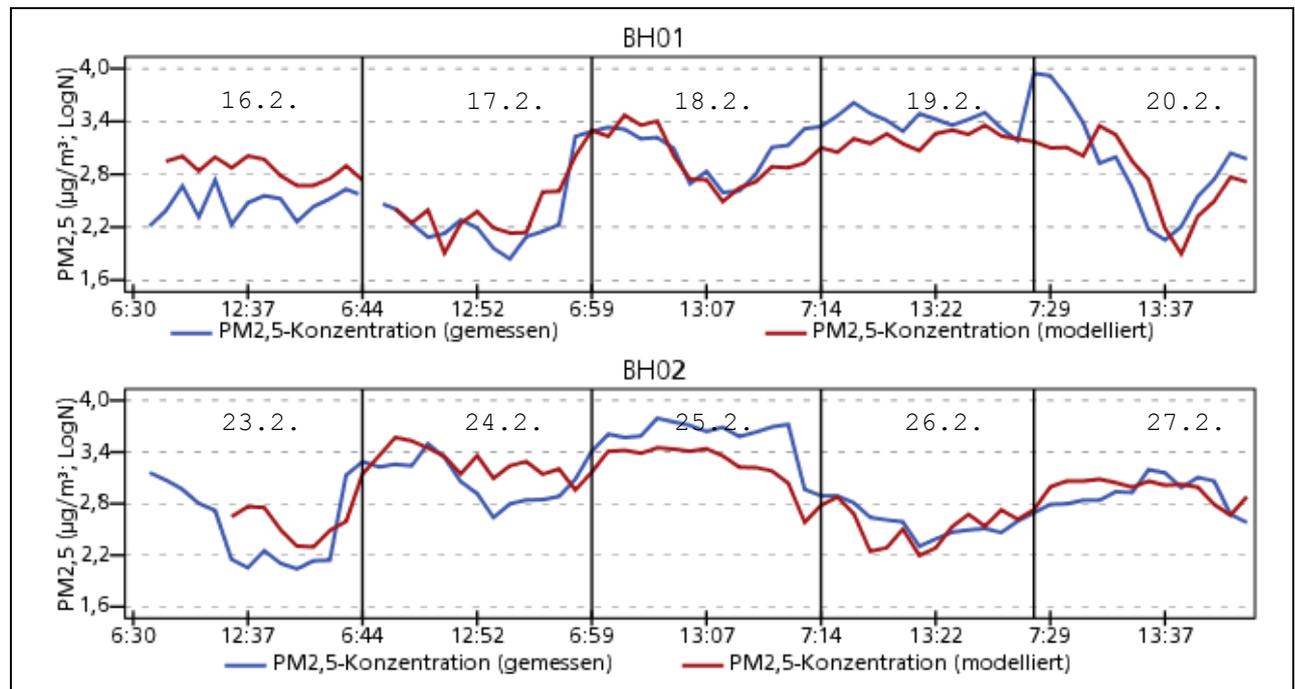


Abbildung 115: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der niederfrequenten $PM_{2,5}$ -Konzentration im Testfeld Bremerhaven (getrennt nach Messwochen BH01 und BH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

Die graphische Gegenüberstellung von gemessenen und modellierten Werten (Abbildung 116) im hochfrequenten Modell zeigt ein heterogenes Bild: Während das Modell an 5 Tagen (17.2., 18.2., 19.2., 20.2., 26.2.) die $PM_{2,5}$ -Konzentrationsschwankungen gut abbilden kann, ist die relative Ähnlichkeit an anderen Tagen eher niedrig.

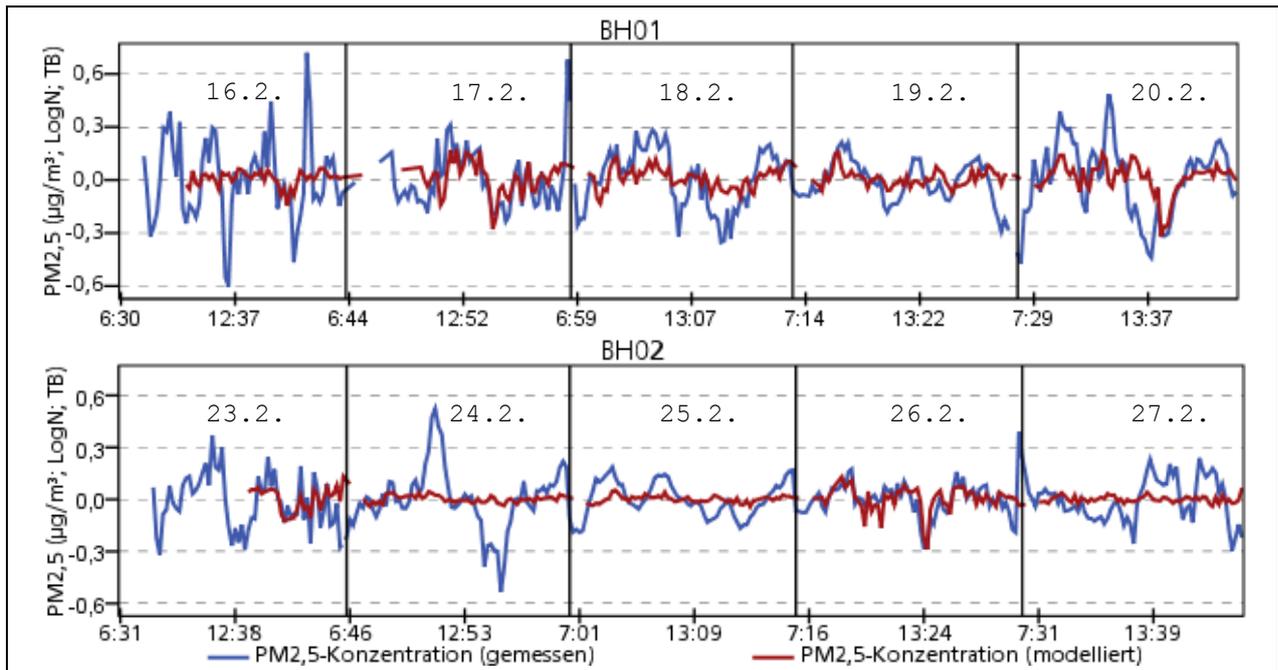


Abbildung 116: Gemessene (blau) und modellierte (rot) der hochfrequenten PM_{2,5}-Konzentration im Testfeld Bremerhaven (getrennt nach Messwochen BH01 und BH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

Tabelle 62 zeigt die Prädiktoren in den Erklärungsmodellen und die Vorzeichen ihrer Koeffizienten. Sofern eine Prädiktorengröße in einer Messwoche keinen signifikanten Einfluss besitzt, wird das Vorzeichen nicht angegeben.

Prädiktorengröße	Vorzeichen der Regressionskoeffizienten	
	niederfrequent	hochfrequent
	BH01/BH02	BH01/BH02
Windvektor	+/+	+/+
Luftfeuchte	+/	
Luftdruck	/+	
PM10-Hintergrund	+/+	
SV-Anteil	+/	
Verkehrsstärke (Lag-Variable)		+/+

Tabelle 62: Prädiktoren der PM_{2,5}-Modelle im Testfeld Bremerhaven (95 %-Signifikanzniveau).

Wie auch im PM₁₀-Modell leistet der Windvektor für die nieder- und hochfrequenten Modelle einen signifikanten Erklärungsbeitrag mit positivem Vorzeichen des Regressionskoeffizienten. Die Luftfeuchte weist im niederfrequenten Modell eine signifikante Varianzaufklärung auf. Eine höhere Luftfeuchte führt zu höheren (modellierten) Immissionen. Dieser Zusammenhang ist allerdings nicht zwingend auf Kausalbeziehungen zurückzuführen (vgl. 5.2.1.4).

Wie auch in den niederfrequenten NO_x- und PM₁₀-Modellen leistet der Luftdruck auch für die PM_{2,5}-Konzentration einen signifikanten Beitrag zur Varianzaufklärung. Aufgrund der hohen

Varianz dieser Kenngröße und mehrerer Inversionswetterlagen in den Messzeiträumen ist dies plausibel. Die PM₁₀-Hintergrundbelastung trägt mit einem plausiblen positiven Vorzeichen erheblich zur Aufklärung der PM_{2,5}-Varianz bei.

Der Schwerverkehrsanteil ist der verkehrsbezogene Prädiktor in der ersten Messwoche des niederfrequenten Bremerhavener PM_{2,5}-Modells. Aufgrund der meteorologischen Situation in der zweiten Messwoche ist die zu diesem Zeitraum vernachlässigbare Bedeutung des verkehrsbezogenen Prädiktors plausibel. Analog zum Bremerhavener PM₁₀-Modell ist die Verkehrsstärke als Lag-Variable im hochfrequenten Modell signifikant. Die Auswahl der Lag-Variable für das Modell sollte aber kritisch hinterfragt werden, da der zeitliche Versatz verkehrlicher Kenngrößen in keinem der weiteren Modelle eine höhere Modellgüte mit sich bringt.

Festgehalten werden kann, dass die Prädiktorenauswahl des niederfrequenten PM_{2,5}-Erklärungsmodells weitestgehend plausibel ist. Die Modellierungsgüte wird als „gut“ bewertet.

Das hochfrequente PM_{2,5}-Erklärungsmodell zeugt nur an etwa 50 % der Messtage von hoher Güte und wird daher als „befriedigend“ bewertet. Die Ursache für die unbefriedigende Datenqualität an einzelnen Tagen ist unklar.

Erklärungsmodell für die gemessene PM_{10-2,5}-Konzentration

Tabelle 63 zeigt die übergreifenden Modellparameter des PM_{10-2,5}-Erklärungsmodells im Testfeld Bremerhaven. Das niederfrequente Modell erklärt in der ersten Messwoche etwa 70 % und in der zweiten Messwoche 45 % der Varianz der PM_{10-2,5}-Konzentration. Der relative Standardfehler, bezogen auf die mittlere gemessene Immissionskonzentration, liegt bei etwa 15 % in der ersten Messwoche und bei 10 % in der zweiten Messwoche.

Das hochfrequente Modell erklärt etwa 30 % der Varianz der hochfrequenten Komponente der PM_{10-2,5}-Konzentration. Der relative Standardfehler, bezogen auf die doppelte Standardabweichung der trendbereinigten Immissionskonzentration, liegt für die erste Messwoche bei 25 % und in der zweiten Messwoche bei 10 %.

Modell	Bestimmtheitsmaß R ²	Relativer Standardfehler rSE
	BH01 / BH02	BH01 / BH02
Niederfrequent	0,68 / 0,45	16% / 8%
Hochfrequent	0,34 / 0,32	25% / 10%

Tabelle 63: Übergreifende Modellparameter der nieder- und hochfrequenten PM_{10-2,5}-Erklärungsmodelle.

Die graphische Gegenüberstellung von gemessenen und modellierten Werten (Abbildung 117) im niederfrequenten Modell zeigt, dass der Tagesgang an den meisten Tagen nur ansatzweise wiedergegeben wird. Einzelne gemessene Maxima und Minima werden vom Modell generell nicht oder nur rudimentär abgebildet.

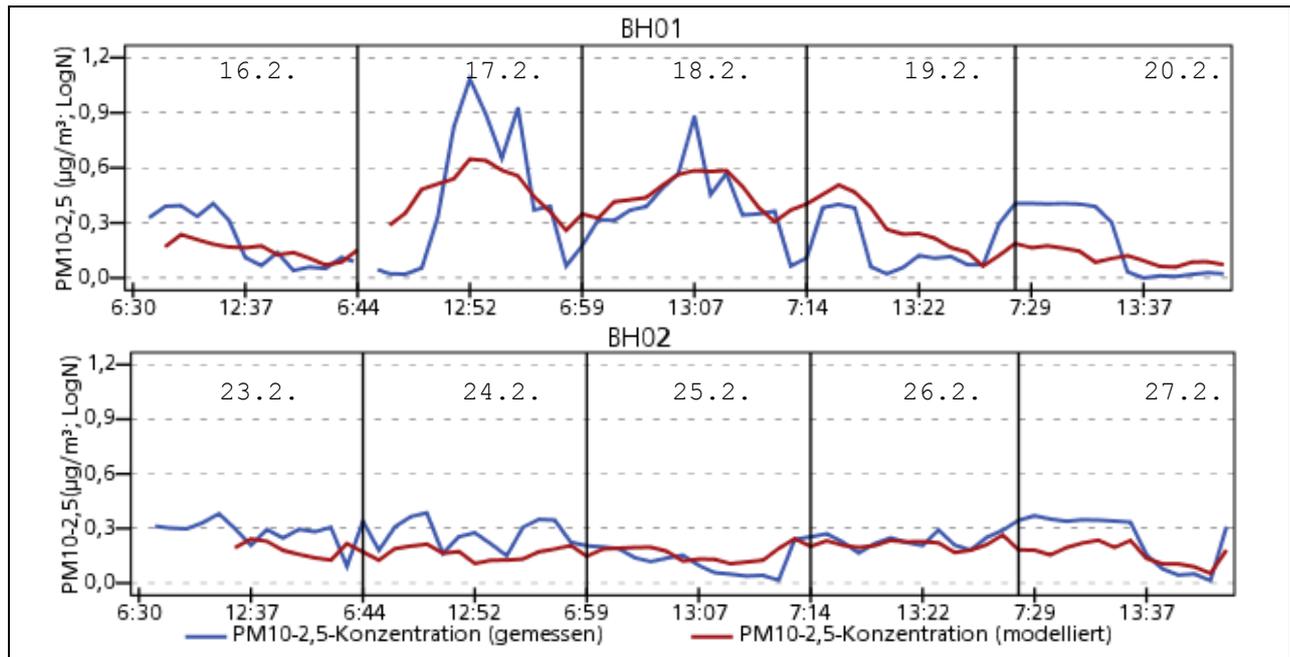


Abbildung 117: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der niederfrequenten PM_{10-2,5}-Konzentration im Testfeld Bremerhaven (getrennt nach Messwochen BH01 und BH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

Die graphische Gegenüberstellung von gemessenen und modellierten Werten (Abbildung 118) zeigt an fünf Messtagen (17.2., 18.2., 24.2., 26.2., 27.2.) eine hohe relative Ähnlichkeit, an den weiteren Messtagen jedoch eine unbefriedigende Modellierung.

Tabelle 64 zeigt die Prädiktoren in den Erklärungsmodellen und die Vorzeichen ihrer Koeffizienten. Sofern eine Prädiktorengröße in einer Messwoche keinen signifikanten Einfluss besitzt, wird das Vorzeichen nicht angegeben.

Prädiktorengröße	Vorzeichen der Regressionskoeffizienten	
	niederfrequent	hochfrequent
	BH01/BH02	BH01/BH02
Windrichtung-Vektor	/+	+/+
Luftfeuchte	-/-	
Luftdruck	/-	
SV-Anteil	+/	+/

Tabelle 64: Prädiktoren der PM_{10-2,5}-Modelle im Testfeld Bremerhaven (95 %-Signifikanzniveau).

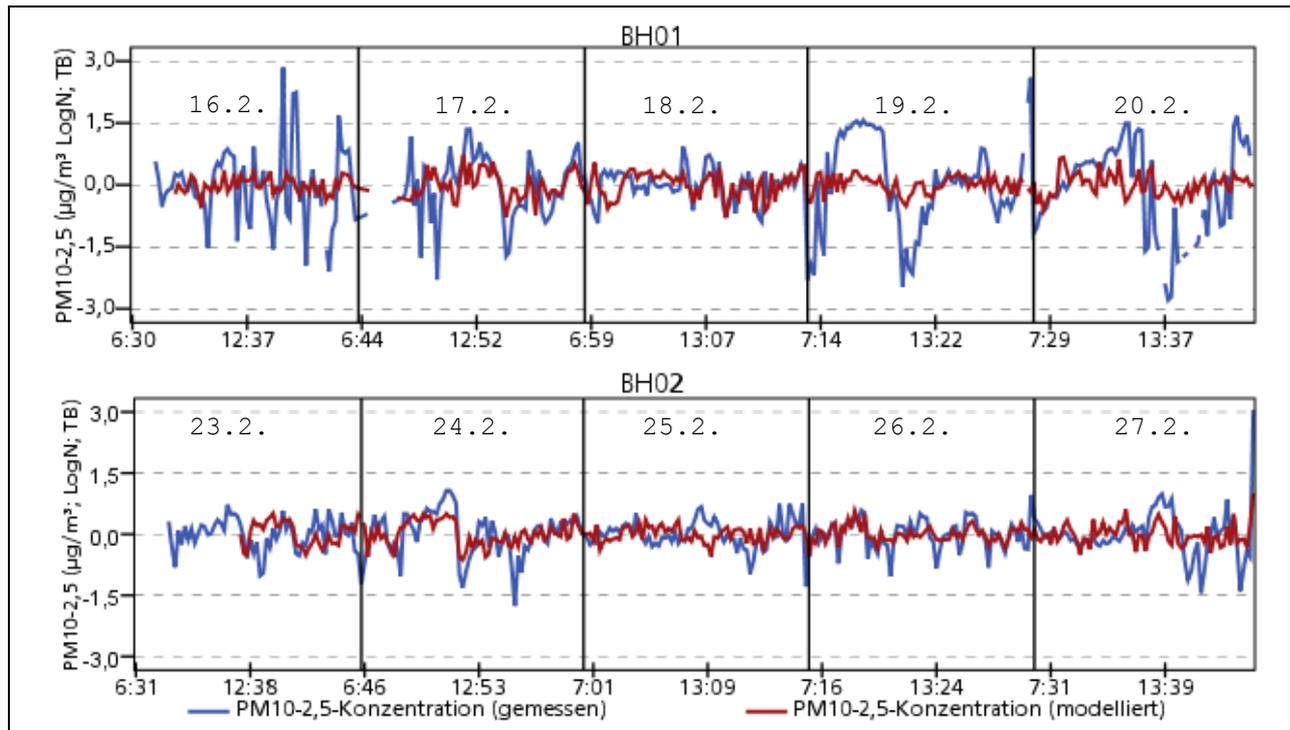


Abbildung 118: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der hochfrequenten $PM_{10-2,5}$ -Konzentration im Testfeld Bremerhaven (getrennt nach Messwochen BH01 und BH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

Die lokale Windrichtung leistet in der ersten Messwoche einen geringen und in der zweiten Messwoche einen wesentlichen Erklärungsbeitrag zum nieder- und hochfrequenten Modell mit einem plausiblen positiven Vorzeichen. Die Luftfeuchte ist in beiden Messwochen des niederfrequenten Modells mit einem negativen Vorzeichen signifikant. Im $PM_{2,5}$ -Modell für Bremerhaven ist das Vorzeichen hingegen positiv. Für die groben Partikel ist dieser antiproportionale Zusammenhang allerdings plausibel, da bei hoher Luftfeuchte von einer verminderten Aufwirbelung ausgegangen werden kann. In der zweiten Messwoche ist der Luftdruck der Prädiktor mit dem größten Beitrag zur Varianzaufklärung, jedoch im Gegensatz zum Erklärungsmodell der PM_{10} -Konzentration mit einem negativen Vorzeichen. Das positive Vorzeichen wird als *nicht plausibel* eingestuft und auf Suppressionseffekte im Regressionsmodell zurückgeführt, da der Toleranzwert des Luftdrucks in diesem Zeitraum niedrig ist (vgl. statistische Kenngrößen zum Regressionsmodell im Anhang).

Der Prädiktor SV-Anteil ist im nieder- und hochfrequenten Modell jeweils in der ersten Messwoche signifikant; in der zweiten Messwoche liegt er unterhalb der Signifikanzgrenze. Aufgrund der meteorologischen Verhältnisse ist dies plausibel.

Festgehalten werden kann, dass die Modellierungsgüte des nieder- und hochfrequenten Modells der $PM_{10-2,5}$ -Konzentration, wie insbesondere die graphischen Gegenüberstellungen von Messung und Modell deutlich machen, nicht ausreichend sind. Die aufgenommenen Prädiktoren sind teilweise fachlich unplausibel. *Aus diesen Gründen werden sowohl das niederfrequente als auch das hochfrequente $PM_{10-2,5}$ -Erklärungsmodell verworfen.*

8.5.3.4 Quantifizieren des Wirkungspotenzials der modellbasierten Netzsteuerung für die Immissionen am Messquerschnitt

Auf Grundlage der Erklärungsanteile der als relevant identifizierten Verkehrskenngrößen lässt sich zunächst das maximale verkehrliche Wirkungspotenzial einer Verkehrssteuerung für den fiktiven Fall einer Reduzierung der Schwerverkehrsstärke bzw. des Schwerverkehrsanteils nahe null quantifizieren. Für die NO_x-Immissionen ergibt sich für den Messzeitraum ein maximales Reduktionspotenzial in einer Größenordnung von 15 bis 20 % und für die PM₁₀ bzw. PM_{2,5}-Immissionen ein Potenzial von 0 bis 5 % der mittleren Gesamtbelastung.

Eine Beeinflussung der Schwerverkehrsstärke durch die Netzsteuerung ist allerdings nur durch Pfortnerung (aller Verkehrsteilnehmer) bzw. durch die Einbindung von weiteren Steuerungseinrichtungen wie dynamischen Zufahrtsbeschränkungen für den Schwerverkehr und/oder einer dynamischen Wegweisung möglich.

Da auf Grundlage der Messungen keine immissionsrelevante Kenngröße zum Verkehrsfluss identifiziert werden konnte, liegt das Wirkungspotenzial einer durch die modellbasierte Netzsteuerung verbesserten Koordinierung zumindest für die Randbedingungen im Messzeitraum in einer vernachlässigbaren Größenordnung.

8.5.3.5 Quantifizieren des Wirkungspotenzials der adaptiven Netzsteuerung für das gesamte Netz

Da die Simulationen mit MOTION nicht durchführbar waren (siehe auch Kapitel 11.1), könnte dieser Punkt nicht untersucht werden.

9 Testfeld Hamburg

9.1 Verkehrsangebot

9.1.1 Merkmale des Verkehrsnetzes

Das Hamburger Testfeld liegt nordöstlich der Innenstadt im Stadtteil Barmbek und besteht aus drei Straßenzügen von zusammen ca. 6 km Streckenlänge, die ein Dreieck bilden (siehe Abbildung 119). Die Hauptrelationen verlaufen dabei entlang der Bramfelder Straße (gelb) und der Habichtstraße (Ring 2, braun), die durchweg zweistreifig sind. In dem Untersuchungsgebiet, das ein Teil der Hamburger adaptiven Netzsteuerung (HANS) ist, befinden sich 13 Lichtsignalanlagen. Der Knotenpunkt Bramfelder Straße / Habichtstraße ist mit einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke von 90.000 Kfz / Tag stark ausgelastet bzw. zu den Spitzenstunden überlastet.

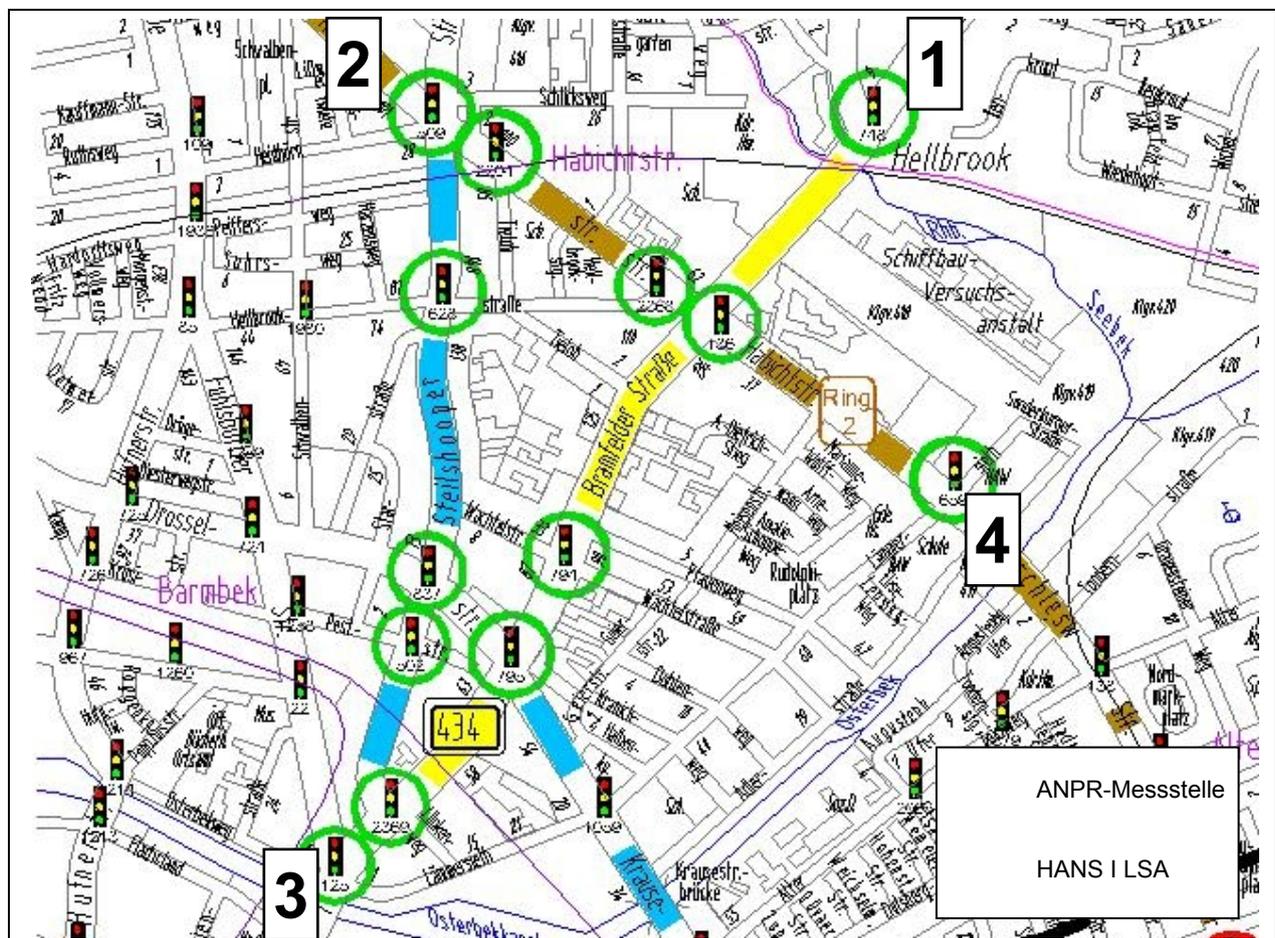


Abbildung 119: Netzplan Hamburg, Steuerungsgebiet HANS I.

9.1.2 Verkehrssteuerung

In Hamburg wird das adaptive modellbasierte Netzsteuerungsverfahren BALANCE verwendet. Das Netz, in dem dieses Verfahren zum Einsatz kommt, umfasst 41 Lichtsignalanlagen in den Stadtteilen Barmbek-Nord und Duisberg. Im Rahmen des Projekts AMONES wird das Gebiet HANS I untersucht, das sich im Stadtteil Barmbek-Nord befindet und dessen Netzsteuerung 13 Lichtsignalanlagen umfasst. Entlang der Bramfelder Straße und der Habichtstraße sind die Lichtsignalanlagen in eine Koordinierung eingebunden, deren Ausrichtung tageszeitabhängig den Verkehrsströmen angepasst ist. Die Steuerung erlaubt es, verschiedene Verfahren und Abstufungen, wie zum Beispiel eine Festzeitsteuerung, eine lokal regelbasierte Steuerung, eine Signalplanauswahl oder eine Netzsteuerung (BALANCE) zu schalten. Die LSA-Schaltungen werden vom Verkehrsrechner mitgeschrieben und können ausgelesen werden.

Im Netz befinden sich ausreichend viele Detektoren und Induktionsschleifen, die mittlere Verkehrsstärken in Kfz/h und Belegungswerte in % sekundlich aufzeichnen. Die Messdaten der Detektoren werden einer Plausibilitätsprüfung unterzogen.

9.2 Verkehrsnachfrage

9.2.1 Merkmale der Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage in Hamburg unterliegt während der beiden untersuchten Wochen im Juni und Oktober 2008 deutlichen zeitlichen und räumlichen Schwankungen. Folgende Merkmale sind zu beobachten (Struktur und Variabilität der Verkehrsnachfrage werden außerdem im Rahmen der Clusterung in Kapitel 9.5.2.2 beschrieben):

1. Tageszeitabhängige Variabilität

Die Nachfrage im gesamten Netz hat zwischen 1:00 Uhr und 4:00 Uhr ihren Tiefpunkt. Zwischen 7:00 Uhr und 10:00 Uhr ist eine ausgeprägte Morgenspitze vorhanden. Während der Mittagszeit ist die Nachfrage etwas niedriger und zwischen 15:00 Uhr und 19:00 Uhr ist eine langgezogene Nachmittagsspitze zu beobachten.

Die stadteinwärts führenden Bramfelder Straße zeigt eine typische Morgenspitze (mit fehlender Nachmittagsspitze), wobei sich dies auf der stadtauswärts führenden Richtung umgekehrt verhält. Entlang des senkrecht verlaufenden Rings (Habichtstraße) sind die Unterschiede zwischen Morgen- und Nachmittagsspitze weniger deutlich.

In Hamburg ist während der beiden Erhebungswochen eine deutliche tageszeitabhängige Variabilität der Nachfrage zu beobachten (in der Struktur und in der Stärke).

2. Räumliche Variabilität:

Während des Untersuchungszeitraums sind im gesamten Netz morgens und nachmittags Überstauungen vorhanden. Entlang der Bramfelder Straße sind diese im Allgemeinen bis vor den zentralen Knotenpunkt Bramfelder Straße / Habichtstraße zu beobachten. Der senkrecht verlaufenden Ring ist zeitweise komplett überstaut. Die Untersuchungen zeigen, dass Ausmaß, Dauer und Lage der Überstauungen von den Steuerungsverfahren

abhängen (siehe Kapitel 9.5.2).

Eine räumliche Variabilität ist, ähnlich wie eine tageszeitabhängige Variabilität, deutlich vorhanden.

9.3 Umweltsituation

9.3.1 Umweltrelevante Merkmale

In der entwickelten Typisierung wurden für eine mögliche Optimierung der Netzsteuerung nach Umweltkriterien die folgenden Randbedingungen bzw. Faktoren als relevant identifiziert:

- Bebauungsstruktur
 - Bebauung
 - Art und Verteilung der Nutzungen
- Externe Faktoren
 - Meteorologie
 - Umweltsituation

Die allgemeine Umweltsituation im Testfeld wird als wichtigste Randbedingung eingestuft: Falls grundsätzlich kein Grenzwertüberschreitungsrisiko für die betrachteten Schadstoffe besteht wird kein Handlungsbedarf im Sinne einer Optimierung nach Umweltkriterien gesehen. Sofern ein Grenzwertüberschreitungsrisiko vorliegt, der Verursacheranteil des Verkehrs jedoch sehr niedrig ist, ergibt sich folglich kein Optimierungspotenzial.

Die für das Testfeld erstellten Luftqualitätspläne weisen für die untersuchten Schadstoffe einen Handlungsbedarf für die Stadt Hamburg und insbesondere für die Habichtstraße aus. Auch der Verursacheranteil des Verkehrs ist hoch (NO₂: 50-60 %; PM₁₀: 22 %), so dass verkehrliche Maßnahmen ein Verbesserungspotenzial zumindest für NO₂ in einer messbaren Größenordnung erwarten lassen.

In Bezug auf die Meteorologie weist der Aktionsplan Feinstaub auf die starke regionale Komponente der Feinstaubbelastung hin. Je nach Hauptwindrichtung kann der Ferneintrag maßgebend für die Partikelbelastung sein. Dies bedeutet zum einen, dass das Wirkungspotenzial lokaler verkehrlicher Maßnahmen in Bezug auf die Feinstaubbelastung begrenzt ist, zum anderen führt dies aber auch zu einer verbesserten Prognose von Situationen mit hohem Grenzwertüberschreitungsrisiko.

Die Bebauung im Bereich der für die Luftqualität kritischen Habichtstraße (nahe dem Messcontainer) ist ein Mischgebiet welches wesentlich aus Wohnbebauung mit einem geringen Anteil an Kleingewerbe und Dienstleistern besteht. Die Breite der Häuserschlucht liegt in einer Größenordnung von 30 m. Die Gebäude haben durchschnittlich 4 bis 5 Stockwerke. In den Messzeiträumen wurden in der Straßenschlucht durchweg niedrige Windgeschwindigkeiten kleiner 2 m/s gemessen.

9.3.2 Umweltmesstechnik

Im Testfeld Hamburg werden derzeit 17 Messstationen betrieben von denen eine im Untersuchungsgebiet liegt (Messstation Habichtstraße) und ergänzend zu den Messgeräten des Projektteams für die Wirkungsuntersuchungen eingesetzt werden kann.

Die Umweltmessstation Habichtstraße ist eine Verkehrsmessstation in der Nähe des Knotenpunktes Habichtstraße/Bramfelder Straße. Die Station erfasst kontinuierlich u. a. die Messkomponenten NO, NO₂, NO_x, PM₁₀ und PM_{2,5}. Zur Messung der Stickstoffoxide wird das Chemolumineszenzverfahren eingesetzt. Zur Messung der Partikelkonzentration werden die Gravimetrie und die Betastrahlenabsorption eingesetzt.

9.4 Messszenarien

Im Rahmen des Projekts AMONES war es möglich in jedem Testfeld Erhebungen an zehn Tagen durchzuführen. Um Erkenntnisse für den stufenweisen Aufbau von modellbasierten Steuerungsverfahren zu gewinnen, wurden die folgenden drei, in der Komplexität aufsteigenden Steuerungsverfahren untersucht (in Klammern die Abkürzung, die in nachfolgenden Abbildungen verwendet wird):

- Festzeitsteuerung (FZS)
- Lokal regelbasierte Steuerung (LRS)
- BALANCE (BAL PS1 / BAL PS2)
BALANCE wurde an den fünf Erhebungstagen im Juni und im Oktober mit anderen ParameterSätzen betrieben. Deshalb werden im Folgenden die BALANCE-Erhebungstage im Juni (PS1) und im Oktober (PS2) getrennt bezeichnet und bewertet.

Während den Erhebungstagen wurde der öffentliche Verkehr von keinem der Verfahren bevorzugt.

Um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Steuerungsverfahren auf die verschiedenen Wochentage und den zu erwartenden Verkehrsstärken zu erreichen, wurden die Messszenarien entsprechend Tabelle 65 verteilt. Die Erhebungen wurden an jedem Tag von 6:30-18:30 Uhr durchgeführt (siehe auch Kapitel 5.1.12).

Datum	Wochentag	Steuerungsverfahren
2.6.2008	Montag	Festzeitsteuerung
3.6.2008	Dienstag	BALANCE PS1
4.6.2008	Mittwoch	Lokal regelbasierte Steuerung
5.6.2008	Donnerstag	BALANCE PS1
6.6.2008	Freitag	Festzeitsteuerung
6.10.2008	Montag	BALANCE PS2
7.10.2008	Dienstag	Lokal regelbasierte Steuerung
8.10.2008	Mittwoch	Festzeitsteuerung
9.10.2008	Donnerstag	Lokal regelbasierte Steuerung
10.10.2008	Freitag	BALANCE PS2

Tabelle 65: Erhebungstage und Steuerungsverfahren im Testfeld Hamburg.

9.5 Ergebnisse

9.5.1 Bereits durchgeführte Untersuchungen Dritter

9.5.1.1 Untersuchungen zur Verkehrssteuerung

Im Testfeld Hamburg wurde im Jahr 2005, nach der Inbetriebnahme der Netzsteuerung im Gebiet HANS I, eine Wirksamkeitsanalyse mit der Floating-Car-Methode von der Stadt Hamburg durchgeführt [Koch 2006].

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden ca. 1500 Fahrten von Fahrzeugen, die mit einem GPS-Empfänger ausgestattet waren, unter den drei Steuerungsstrategien „zeitabhängige Festzeitsteuerung“, „verkehrsabhängige Steuerung“ und „verkehrsadaptive Netzsteuerung“ (BALANCE) durchgeführt. Die Auswertung der durch die GPS-Empfänger gewonnenen Weg-Zeit-Informationen zeigt, dass die Netzsteuerung BALANCE eine Steigerung der mittleren, nach Fahrzeugmengen gewichteten, Reisegeschwindigkeit um ca. 10 % im Vergleich zu einer zeitabhängigen Festzeitsteuerung und um ca. 6 % im Vergleich zu einer verkehrsabhängigen Steuerung erzielt.

Die Umrechnung der daraus resultierenden Zeitersparnis aller Verkehrsteilnehmer auf den volkswirtschaftlichen Nutzen hat ergeben, dass die adaptive Netzsteuerung einen monetären Nutzen von ca. 1,5 Millionen € pro Jahr erwirtschaftet.

9.5.1.2 Untersuchungen zu Umweltaspekten

An bereits durchgeführten Untersuchungen ist in diesem Zusammenhang die Untersuchung „Innovative Verkehrssteuerung in Hamburg“ zu nennen.

Der Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer der Freien und Hansestadt Hamburg hat im Rahmen eines Pilotprojektes geprüft, ob sich ein verkehrsadaptives Steuerungsverfahren (BALANCE) in die vorhandenen EDV-Strukturen integrieren und auf weitere Netzbereiche übertragen lässt. Dabei wurden 13 Lichtsignalanlagen im Stadtteil Barmbek (inkl. des Streckenabschnitts Habichtstraße) zur Einbindung in die Netzsteuerung umgebaut.

Zur Überprüfung der Steuerungsmaßnahmen wurden in drei Erhebungsperioden mit jeweils ca. 1.500 Fahrten über Floating Car Data durchschnittliche Fahrzeiten, Geschwindigkeiten, Zahl der Halte und Wartezeiten erfasst. Die erhobenen Daten wurden auch in Bezug auf ihre Umweltwirkungen bewertet: Auf der Grundlage mittlerer Verbräuche für Halte und Wartezeiten wurden 560.000 l Kraftstoffeinsparung und 1.300 t CO₂ pro Jahr durch die Netzsteuerung ermittelt. In Bezug auf die Immissionen an der Habichtstraße wurde (ohne statistische Absicherung) folgendes festgestellt [Koch 2006]:

- Rückgang der CO₂ Belastung
- im Gegensatz zu den anderen Messstationen kein Anstieg der NO₂ und der NO-Belastung
- Anstieg der PM₁₀-Belastung, der allerdings auf großräumige meteorologische Effekte zurückgeführt wird.

Darüber hinaus wurden eine Reihe weiterer Umweltuntersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse für die AMONES-Untersuchungen aber nur am Rande eine Rolle spielen. Nachstehend sind die Bezeichnungen der Untersuchungen aufgeführt, eine kurze Zusammenfassung jeder Untersuchung kann dem Anhang entnommen werden.

- Luftreinhalteplan für die Freie und Hansestadt Hamburg (2004)
- Aktionsplan gegen Belastungen durch Feinstaub – Hamburg / Habichtstraße (2005)
- Erhöhte Luftbelastung auch im Umfeld von stark befahrenen Straßen (2006)
- Feinstaub / PM₁₀ - Erste Bilanz nach Inkrafttreten der Grenzwerte (2006)

9.5.2 Auswertung verkehrlicher Kenngrößen

Die Auswertung der verkehrlichen Kenngrößen erfolgt analog zur im Kapitel 5.1.12 beschriebenen methodischen Vorgehensweise. In den folgenden Unterkapiteln werden die testfeldspezifischen Besonderheiten und die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Die eingesetzten Verfahren werden detailliert in Kapitel 5.1.12 beschrieben. Eine vollständige Auflistung aller erhobenen Daten findet sich im Anhang.

9.5.2.1 Messstandorte und GPS-Routen

Die Standorte der ANPR-Systeme (rote Symbole), der Knotenpunkte/LSAs (grüne Sterne) und das Untersuchungsgebiet (schwarz umrandeter Bereich) sind Abbildung 120 zu entnehmen.

An allen vier Standorten wurde der Verkehr in beide Richtungen mit je einem ANPR-System erfasst, so dass die in Tabelle 66 aufgelisteten Relationen beobachtet werden konnten. Die dort enthaltenen Bezeichner und Symboliken werden im Folgenden in den Abbildungen verwendet. Die Längen der Routen auf denen GPS-Daten vorhanden sind, entsprechen den mittleren gemessenen Längen der GPS-Fahrten. Die übrigen Längenangaben stammen aus dem Routenplaner von Googlemaps. Aufgrund der großen Zahl von 12 beobachtbaren Relationen ist es nicht möglich, diese mit einem GPS-Fahrzeug zu erheben und gleichzeitig eine akzeptable Umlaufzeit des Messfahrzeuges zu haben. Deswegen erfasst das Messfahrzeug die Haupttrouten 1-3, 3-1, 2-4 und 4-2, sowie die zum Wechsel zwischen diesen Routen notwendigen Relationen 2-3, 3-2. Die Routen folgen dabei den gelben Hauptstraßen (Bramfelder Straße / Bramfelder Chaussee und Habichtstraße). Dies bedeutet, dass die LSAs 502, 837 und 628 nicht beobachtet werden, wobei der dort entlangführende Streckenzug für den Durchgangsverkehr auch nicht attraktiv ist. An allen Messstellen hat der beobachtete Querschnitt zwei Fahrstreifen je Richtung.

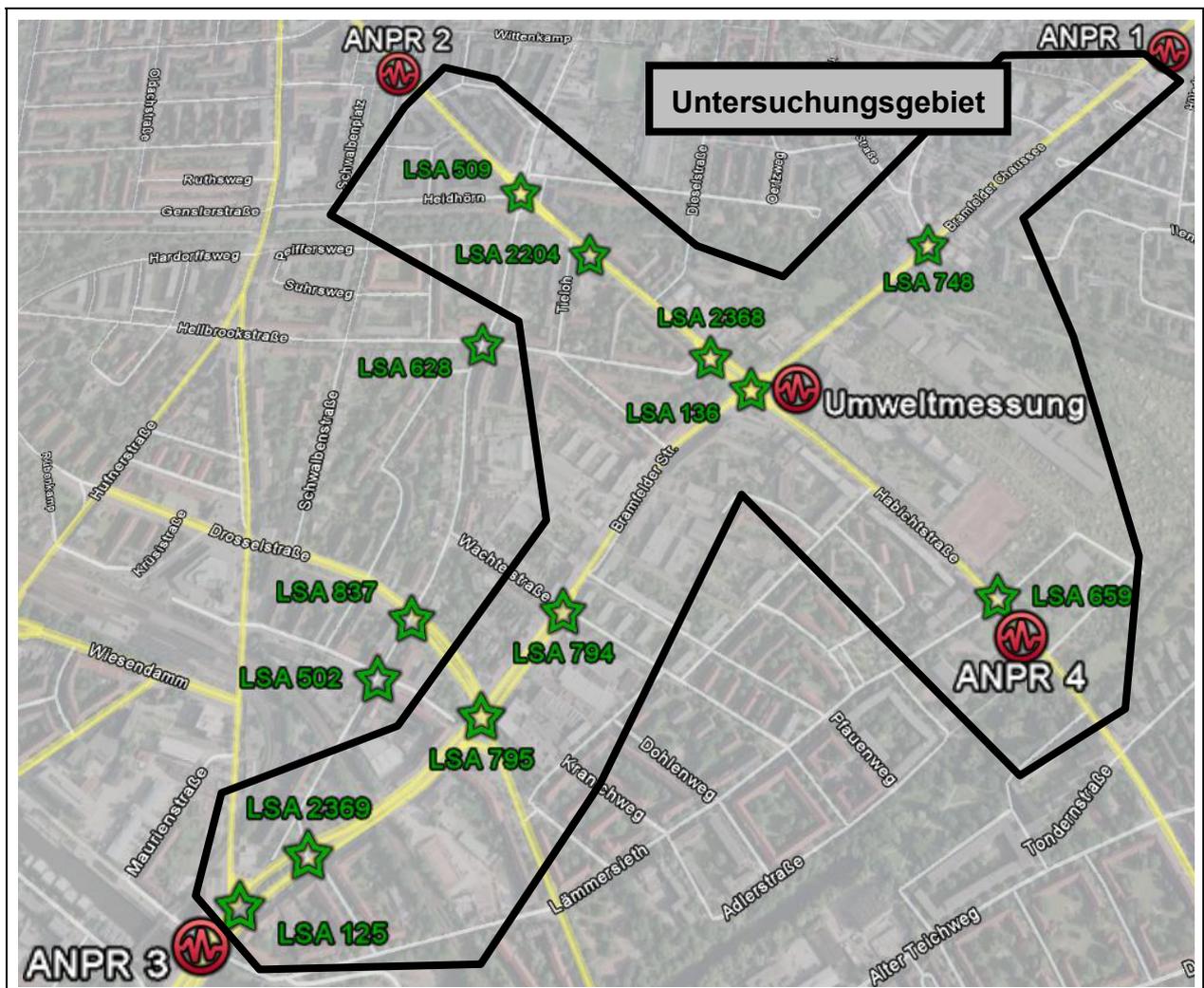


Abbildung 120: Übersicht Messstandorte in Hamburg (Bildquelle: GoogleEarth).

Entlang der Achse von 1 nach 3 tritt klassisches Pendlerverhalten auf. Hier ist der Verkehr stadteinwärts (1-3) morgens hoch und abends niedrig, während sich die Rückrichtung (3-1)

umgekehrt verhält. Dieses Verhalten ist entlang der Achse von 2 nach 4, die dem Stadtring folgt, nicht zu beobachten.

Von-Nach	Symbolik	GPS-Erhebung	Länge [km]
1-2	↩	Nein	1,800
1-3	↓	Ja	1,934
1-4	↳	Nein	1,500
2-1	↑	Nein	1,800
2-3	↘	Ja	1,768
2-4	→	Ja	1,278
3-1	↑	Ja	1,932
3-2	↩	Ja	1,795
3-4	↳	Nein	1,500
4-1	↑	Nein	1,500
4-2	←	Ja	1,300
4-3	↘	Nein	1,300

Tabelle 66: Erfasste Relationen in Hamburg.

9.5.2.2 Clusterung der Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage wird mit dem Verfahren der Entropiemaximierung (siehe Kapitel 5.1.12.3) berechnet. Der von den ANPR-Systemen erfasste Durchgangsverkehr auf den in Tabelle 66 aufgeführten Relationen liefert hierfür die „historische“ Matrix für vier Quellen und vier Ziele und die RMQs an den vier Ein- beziehungsweise Ausgangsquerschnitten die Zählraten. Der Einsatz dieses Verfahrens ist aufgrund der Aufstellplätze der ANPR-Systeme notwendig. Aufgrund der seitlichen Position und des Winkels erfassen die Systeme teilweise den Gegenverkehr, ein Umstand, der für die Berechnung von Fahrzeiten irrelevant ist, aber die einfache Bestimmung der Durchgangsverkehrsanteile über eine Hochrechnung der Erfassungsraten an einem richtungsbezogenen Querschnitt unmöglich macht.

Tabelle 67 listet die acht Ein- und Ausgangsquerschnitte und deren Zusammensetzung auf. Zur Verwendung als Eingang der Entropiemaximierung werden die Zählraten entsprechend Kapitel 5.1.12.3 normiert.

Eine Korrektur der Zählraten ist, wie die in Abbildung 121 dargestellten Verläufe von manueller Zählung und Induktionsschleifen am Eingangsquerschnitt 4 zeigen, nicht notwendig (die Kurve der manuellen Zählung besteht aus interpolierten und hochgerechneten 15-Minuten-Intervallen zu Beginn jeder Stunde).

Name	Beschreibung
1 einfahrend	Verkehrsstrom nach Süden an der Messstelle 1. Setzt sich aus den von Gevas benannten Induktionsschleifen D2.1 und D2.2 an der LSA 748 zusammen.
1 ausfahrend	Verkehrsstrom nach Norden an der Messstelle 1. Setzt sich aus den von Gevas benannten Induktionsschleifen D1.1, D1.2, D4.1 und D5.1 an der LSA 748 zusammen.
2 einfahrend	Verkehrsstrom nach Osten an der Messstelle 2. Setzt sich aus den von Gevas benannten Induktionsschleifen D1.1 und D1.2 an der LSA 509 zusammen.
2 ausfahrend	Verkehrsstrom nach Westen an der Messstelle 2. Setzt sich aus den von Gevas benannten Induktionsschleifen D-B-509-4 und D-B-509-5 an der LSA 509 zusammen.
3 einfahrend	Verkehrsstrom nach Norden an der Messstelle 3. Setzt sich aus den von Gevas benannten Induktionsschleifen D1.1 und D1.2 an der LSA 125 zusammen.
3 ausfahrend	Verkehrsstrom nach Süden an der Messstelle 3. Setzt sich aus den von Gevas benannten Induktionsschleifen D2.1, D2.2 und D2.3 an der LSA 125 zusammen.
4 einfahrend	Verkehrsstrom nach Westen an der Messstelle 4. Setzt sich aus den von Gevas benannten Induktionsschleifen D2.1 und D2.2 an der LSA 659 zusammen.
4 ausfahrend	Verkehrsstrom nach Osten an der Messstelle 4. Setzt sich aus den von Gevas benannten Induktionsschleifen D1.1 und D1.2 an der LSA 659 zusammen.

Tabelle 67: RMQs zur Berechnung der Ein- und Ausgangsquerschnitte.

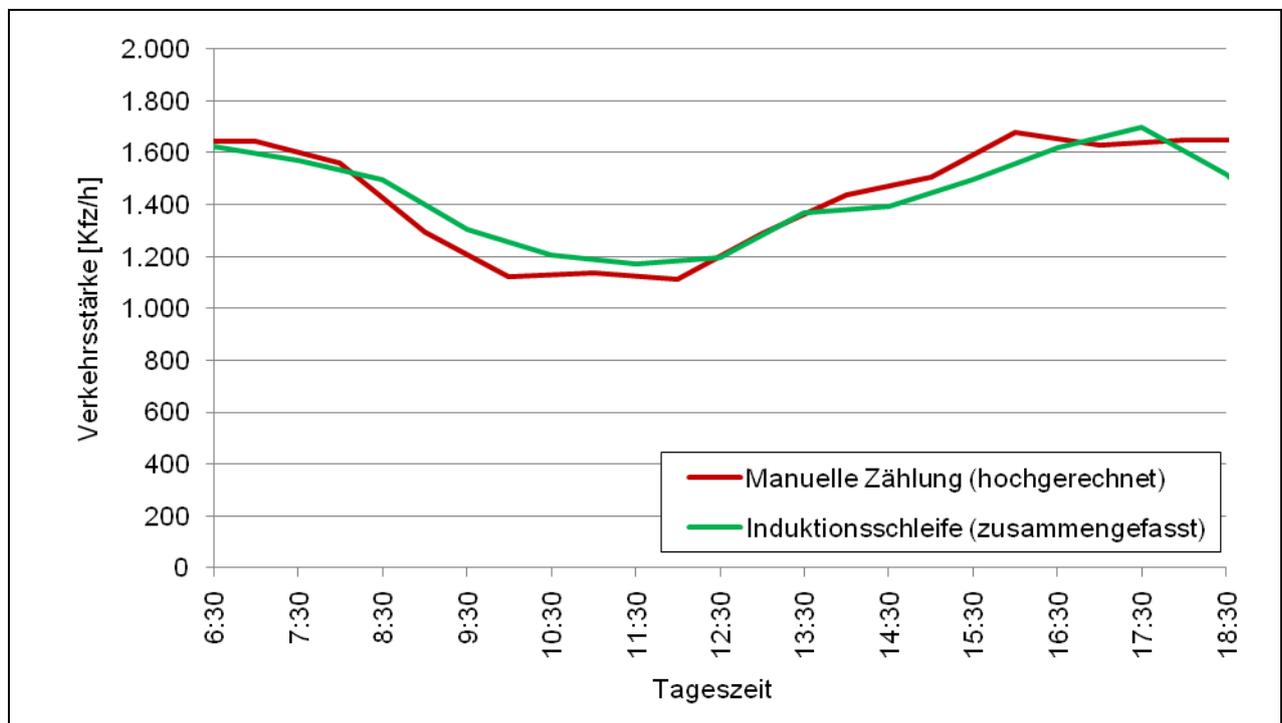


Abbildung 121: Vergleich von manueller Zählung und Induktionsschleife am 9.10.2008 für den Einfahrtsquerschnitt 4.

Das Ergebnis der Entropiemaximierung sind 118 Stundenmatrizen mit vier Quellen und Zielen, deren 12 belegte Werte (ohne die Diagonale) klassifizieren die Verkehrsnachfrage und bilden damit den Eingang für die Distanzberechnung der Clusterung. Aufgrund von Störungen sind die Stunden am 3.6.2008 17:30-18:30 Uhr (starkes Sommergewitter) und 10.10.2008 11:30-12:30 Uhr (Feuerwehreinsatz mit Sperrung der Bramfelder Straße) aus der Bewertung ausgenommen.

Mit einem Grenzwert der Distanz (siehe Kapitel 5.1.12.3) für die Zusammenführung von Clustern von 4 ergeben sich sieben Cluster, die in Abbildung 122 visualisiert sind und die Grundlage für die Bewertung bilden. Aufgrund der eher steilen Ganglinien der Verkehrsstärken ist dieser Wert im Vergleich zu Bremerhaven höher (siehe Kapitel 8.5.2.2) und hat damit eine weniger strenge Trennung zur Folge (wobei die Zahl der Cluster aufgrund der unterschiedlicheren Verkehrsstärken trotzdem größer ist).

In Abbildung 122 werden alle 120 Stunden durch ein Dreieck repräsentiert. Die Position entlang der X- und Y-Achse gibt Aufschluss über den Wochentag beziehungsweise die Stunde des Tages. Das jeweils obere linke Dreieck steht dabei für die erste Messwoche im Juni und das untere rechte Dreieck für die zweite Messwoche im Oktober. Die Einfärbung erfolgt abhängig von dem Cluster in den die jeweilige Stunde gehört, wobei die Stunden, die aufgrund von Störungen nicht in die Bewertung (und die Clusterung) einfließen, in der Farbe Weiß hervorgehoben sind. Die sieben entstandenen Cluster, die Anzahl darin enthaltener Stunden und der Mittelwert der Summe der Nachfrageverkehrsstärken sind in Tabelle 68 aufgeführt. Im Folgenden soll analysiert werden, warum die jeweiligen Cluster entstanden und ob die Resultate plausibel sind.

Abbildung 123 zeigt die „Kurve“ (die Verbindung der einzelnen Punkte hat dabei nur den Sinn, der visuellen Hervorhebung) der 12 Nachfrageverkehrsstärken und deren Summe für alle 118 geclusterten Stunden und vermittelt einen groben Überblick über die Ähnlichkeit der Stunden, die in denselben Clustern gelandet sind. Abbildung 124 wiederum enthält Kurven der mittleren Werte der Stunden, die einen Cluster bilden, wobei aus Gründen der Übersicht nur die Verkehrsstärken der Hauptrelationen (1-3, 2-4, 3-1 und 4-2) dargestellt sind.

Cluster Id	1	2	3	4	5	6	7
Anzahl Stunden	21	10	18	26	16	26	1
Mittlere Summe der Nachfrageverkehrsstärken	5.032	5.355	4.541	4.167	5.105	5.617	6.418

Tabelle 68: Cluster für Hamburg.

Die Cluster und deren Eigenschaften lassen sich wie folgt klassifizieren und beschreiben (die Begriffe „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ beziehen sich hier stets auf die Vergleiche innerhalb von Hamburg):

- Cluster 1: Vormittagscluster mit mittlerer Verkehrsstärke
Cluster 1 bildet zusammen mit Cluster 2 (siehe nachfolgende Erläuterungen) den Vormittagsverkehr mit hohen Belastungen stadteinwärts ab, der von 6:30 bis 9:30 Uhr

auftritt. Am 2.6.2008 montags sogar bis 10:30 Uhr. In Cluster 1 finden sich dabei die Stunden mit den mittleren Verkehrsstärken, die Beginn und Ende der Morgenspitze umfassen.

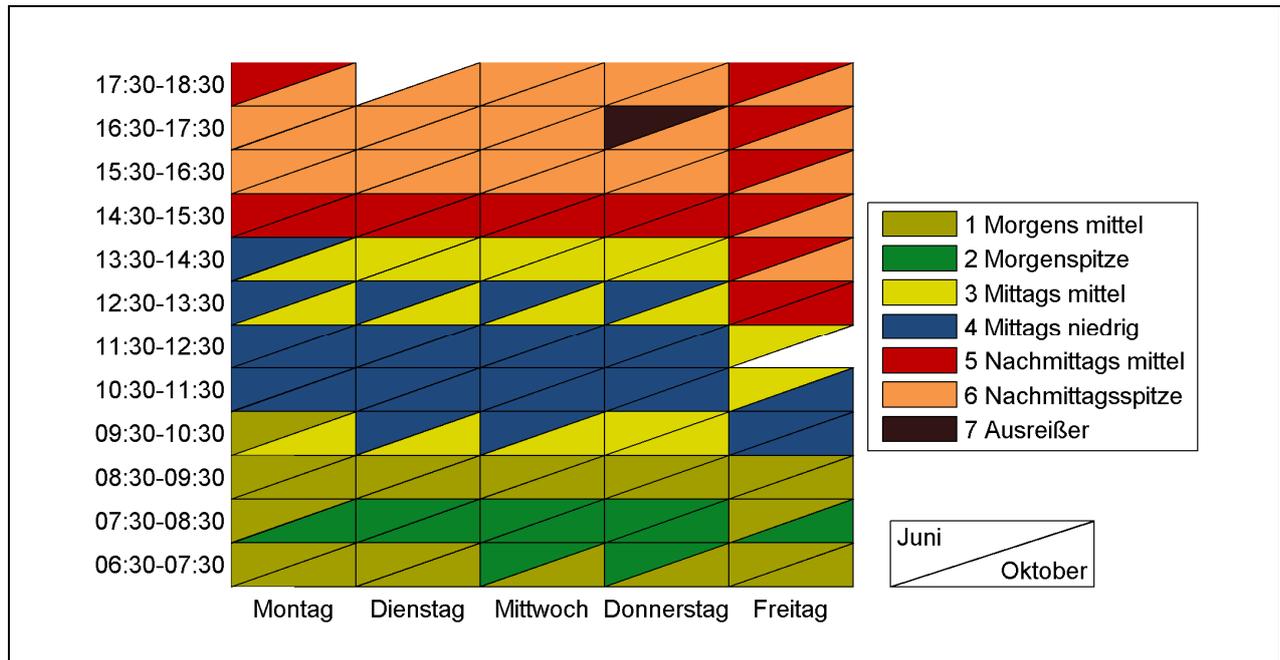


Abbildung 122: Übersicht der Clusterung für Hamburg.

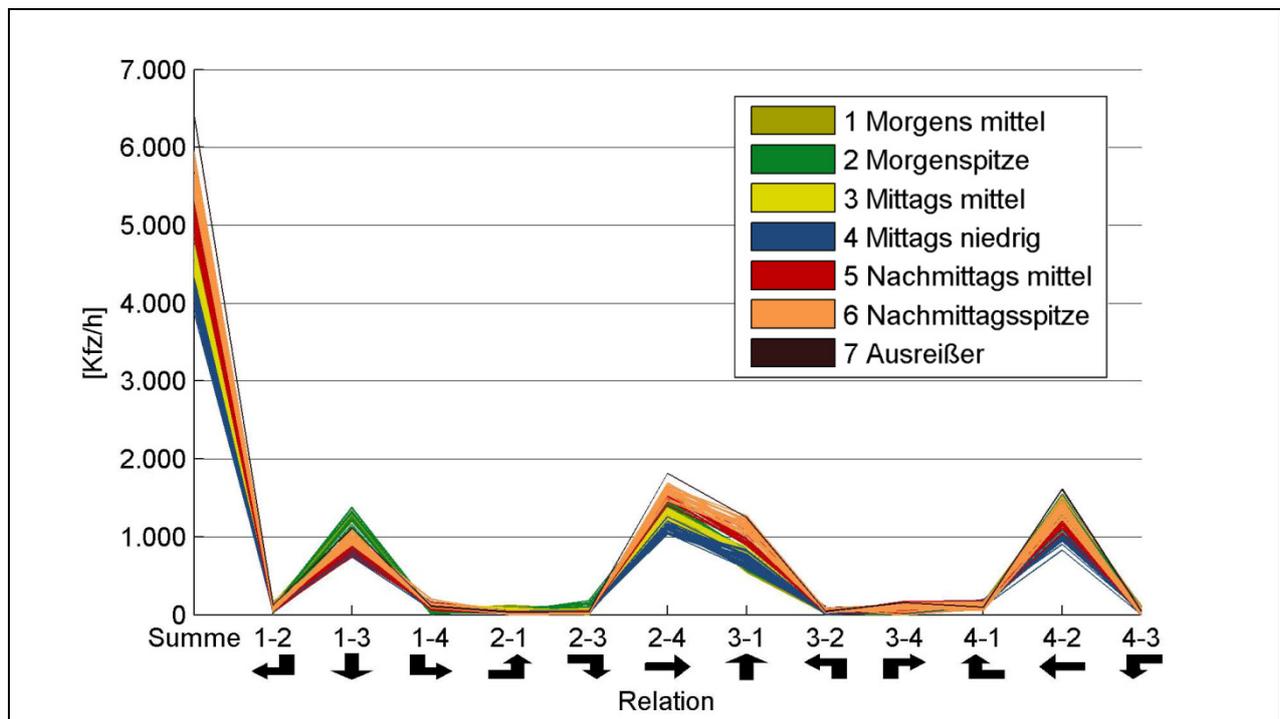


Abbildung 123: Geclusterte Nachfrageverkehrsstärken für Hamburg.

- Cluster 2: Vormittagscluster mit hoher Verkehrsstärke - Morgenspitze
 Wie Abbildung 122 zu entnehmen ist, befinden sich die Stunden von 6:30 bis 9:30 Uhr in den Clustern 2 und 1. Die Zuordnung bestätigt sich über die Struktur (Abbildung 124) in der sich der höhere Stadteinwärtsverkehr entlang der Relation 1-3 findet. Die Trennung zu Cluster 1

begründet sich wiederum durch unterschiedliche Belastungen, die für Cluster 2 durchweg höher sind.

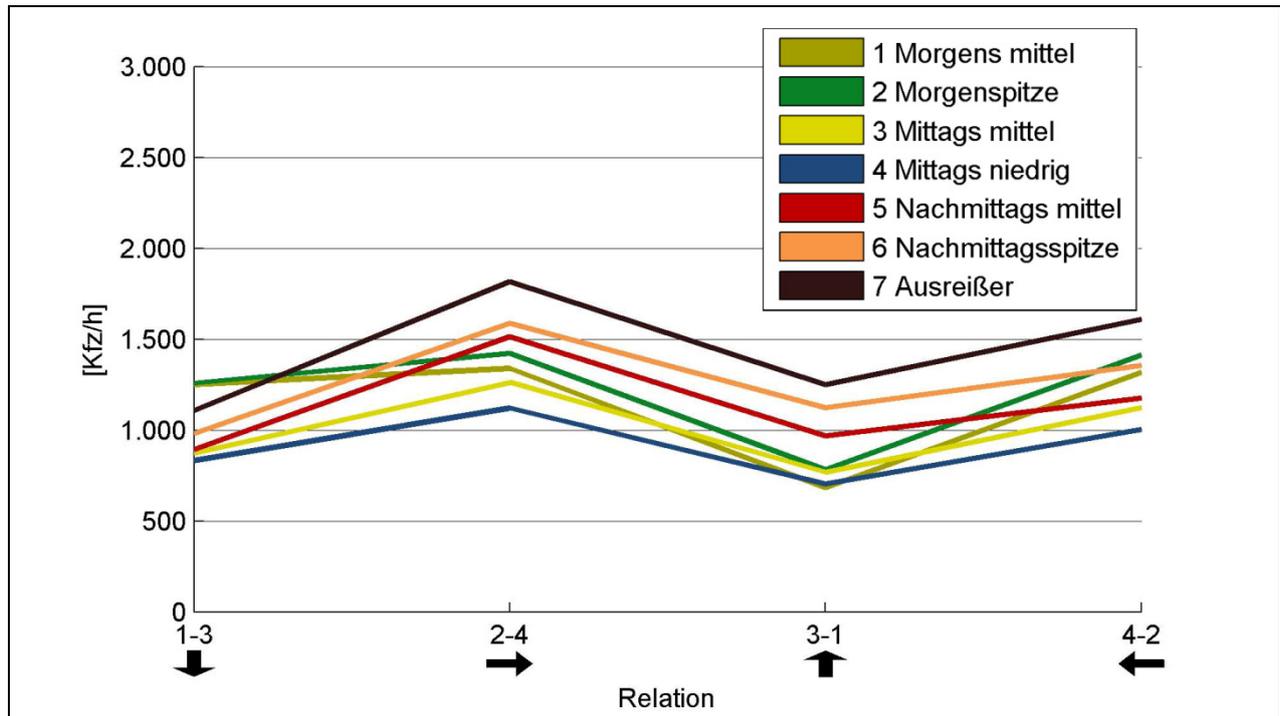


Abbildung 124: Geclusterte mittlere Nachfrageverkehrsstärken der Hauptrelationen für Hamburg.

- Cluster 3: Mittagscluster mit mittlerer Verkehrsstärke
Cluster 3 und Cluster 4 sind strukturell ähnlich. In beiden Clustern ist der Unterschied der Belastungen entlang der Relation 1-3 stadtauswärts und 3-1 stadteinwärts nur sehr gering und die Belastungen entlang der Achse von 2 nach 4 sind in beide Richtungen eher niedrig (Abbildung 124). Die Differenzierung zwischen den Clustern resultiert aus dem unterschiedlich hohen Niveau (Tabelle 68). Cluster 3 repräsentiert Ende und Beginn des typischen Mittagsverkehrs, der sich selbst in Cluster 4 findet (Abbildung 122).
- Cluster 4: Mittagscluster mit niedriger Verkehrsstärke
Cluster 4 bildet zusammen mit Cluster 3 (siehe vorangegangene Erläuterungen) den Mittagsverkehr mit eher ausgeglichenen, niedrigen Belastungen ab, der von Montag bis Donnerstag zwischen 9:30 bis 14:30 Uhr auftritt. An den beiden Freitagen endet der Zeitraum der Mittagsbelastungen erwartungsgemäß etwas früher. Während Cluster 3 tendenziell Beginn und Ende der Mittagszeit umfasst, repräsentiert Cluster 4 die tatsächliche Mittagszeit mit den allgemein niedrigsten Verkehrsstärken (siehe auch Tabelle 68).
- Cluster 5: Nachmittagscluster mit mittlerer Verkehrsstärke
Dieser Cluster weist eine ähnliche Struktur wie Cluster 6 auf. Die Belastungen auf der stadtauswärts führenden Relation 3-1 sind eher hoch und auf der stadteinwärts führenden Relation 1-3 eher niedrig. Der Unterschied zwischen diesen beiden Clustern besteht in den unterschiedlich hohen Verkehrsstärken, die bei Cluster 5 durchweg niedriger sind (siehe Abbildung 124 und Tabelle 68). Die enthaltenen Stunden sind größtenteils die Stunden von

14:30 bis 15:30 Uhr (Abbildung 122), wobei an den Freitagen bereits die Stunden ab 12:30 Uhr in diesem Cluster liegen und die Verkehrsstärke im Sommer den kompletten Freitagnachmittag nicht hoch genug ist, um in Cluster 6 zu landen.

- **Cluster 6: Nachmittagscluster mit hoher Verkehrsstärke - Nachmittagsspitze**
Cluster 6 bildet zusammen mit Cluster 5 (siehe vorangegangene Erläuterungen) den Nachmittagsverkehr mit hohen Belastungen stadtauswärts ab, der von Montag bis Donnerstag ab 14:30 Uhr und freitags ab 12:30 Uhr auftritt. In Cluster 6 finden sich dabei die Stunden mit den höchsten Verkehrsstärken, die am Freitagnachmittag in dem Sommermonat Juni überhaupt nicht auftreten.
- **Cluster 7: Ausreißer**
Die einzelne in diesem Cluster enthaltene Stunde (5.6.2008 Donnerstag 16:30-17:30 Uhr) ist in ihrer Struktur den Nachmittagsclustern 5 und 6 ähnlich (Abbildung 124), weist aber außerordentlich hohe Belastungen auf (es ist die einzige einzeln erkennbare Kurve in Abbildung 123) und verbleibt deshalb alleine in einem Cluster.

Insgesamt ist das Ergebnis der Clusterung plausibel und nachvollziehbar. Im Vergleich zu einer rein tageszeitbasierten Zusammenfassung werden Ausreißer erkannt und können umbeziehungsweise aussortiert werden.

9.5.2.3 Bewertung und Analyse

Grundlagen

Im Testfeld Hamburg wurden die in Tabelle 69 aufgeführten Daten gemessen.

Relation	ANPR-Fahrzeiten		GPS-Fahrten	
	Gesamt	Je Stunde	Gesamt	Je Stunde
1-2	4.478	37	-	-
1-3	31.817	265	150	1,3
1-4	4.256	35	-	-
2-1	4.536	38	-	-
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	-	-
4-1	6.015	50	-	-
4-2	47.241	394	147	1,2
4-3	682	6	-	-

Tabelle 69: Erhobene Daten in Hamburg.

Die Tabelle zeigt, dass auf den Relationen 2-3, 3-2, 3-4 und 4-3 eigentlich zu wenige Fahrzeiten für eine Bewertung vorhanden sind. Wie auf den schwach befahrenen Relationen in Bremerhaven gilt, dass diese Relationen nur für sehr wenige Quellen und Ziele eine sinnvolle Route darstellen. Im Gegensatz zu Bremerhaven sind die in Hamburg auf diesen Relationen gemessenen Fahrzeiten zu einem sehr viel größeren Teil tatsächlich Durchgangsverkehr und plausibel. Hinzu kommt, dass die Bewertungsverkehrsstärken (siehe nachfolgende Erläuterungen) über die Entropiemaximierung mit dem gemessenen Durchgangsverkehr zusammenhängen. Das heißt, dass schwach befahrene Relationen, denen eine potentiell unsicherere Fahrzeit zugrunde liegt, aufgrund der niedrigeren Verkehrsstärke auch nur geringen Einfluss auf die Bewertung haben.

Die Bewertungsverkehrsstärken (siehe Kapitel 5.1.12) entsprechen den Verkehrsstärken der Durchgangsverkehrsmatrizen aus der Entropiemaximierung, die als Eingang der Clusterung verwendet werden (siehe auch Abbildung 123). Das heißt die auf den jeweiligen Relationen erhobenen Fahrzeiten werden zur Berechnung von mittleren Fahr- und Verlustzeiten mit den Verkehrsströmen der jeweiligen Stundenmatrix quantifiziert. Dabei wird die Annahme getroffen, dass alle Fahrzeuge, die das Untersuchungsgebiet an einem bestimmten Querschnitt befahren, gemäß der dortigen Aufteilung, von der vollen Fahrzeit einer Relation durch das Untersuchungsgebiet betroffen sind. Diese Pauschalisierung stützt sich darauf, dass zwar nicht alle Fahrzeuge das Untersuchungsgebiet komplett durchfahren, aber

1. jedes Fahrzeug das Untersuchungsgebiet wieder verlassen muss und dadurch die Strecke zweimal zurücklegt und
2. im Mittel die Fahrziele im Untersuchungsgebiet in etwa gleich weit von den Einfahrtsquerschnitten entfernt sind.

Demzufolge kann pauschal jedes Fahrzeug, welches in das Untersuchungsgebiet hineinfährt mit einer vollen Durchgangsfahrzeit in die Bewertung einfließen.

Tabelle 70 stellt beispielhaft eine Nachfragematrix und damit die Bewertungsverkehrsstärken dar. Die Diagonale ist, im Gegensatz zu der Relation von 4 nach 3 immer 0. Die Bezeichnung der RMQs entspricht Tabelle 67. Die Terminologie „einfahrend“ und „ausfahrend“ bezieht sich auf das Untersuchungsgebiet und nicht auf die Richtungen in beziehungsweise aus der Stadt.

Von \ Nach	1	2	3	4	Zählwert/ Zeilensumme	RMQ
1	0	28	1.251	28	1.307	1 einfahrend
2	34	0	88	1.402	1.524	2 einfahrend
3	804	22	0	39	865	3 einfahrend
4	56	1.299	0	0	1.355	4 einfahrend
Zählwert/ Spaltensumme	894	1.349	1.339	1.469	[Kfz/h]	
RMQ	1 ausfahrend	2 ausfahrend	3 ausfahrend	4 ausfahrend		

Tabelle 70: Nachfragematrix und Bewertungsverkehrsstärken in Hamburg für den 2.6.2008 7:30-8:30 Uhr (Zählraten der RMQs nach Kapitel 5.1.12.3 normiert).

Die Auswertung der Freigabezeitanteile ist, bedingt durch die Verfügbarkeit der Protokolle der Signalgruppen, nur für die Erhebungswoche im Oktober (BALANCE PS2) möglich. Ferner wird im Folgenden aufgrund unterschiedlicher Parametersätze von BALANCE zwischen vier Steuerungsverfahren unterschieden (siehe auch Kapitel 9.4).

Bewertung

Vergleich zweier Tage

Im Testfeld Hamburg konnten deutlich unterschiedliche Verkehrsnachfragesituationen und deren Auswirkungen auf die Verkehrslage, die ebenfalls abhängig von den Steuerungsverfahren deutliche Unterschiede aufweisen, beobachtet werden.

Abbildung 125 zeigt das extremste Beispiel der unterschiedlichen Verläufe von Fahrzeiten entlang der stadteinwärts führenden Relation 1-3. Die am 4.6.2008 (Mittwoch mit LRS, oben) in der Morgenspitze um nahezu Faktor 4 ansteigende Fahrzeiterhöhung ist am 5.6.2008 (Donnerstag mit BALANCE PS1, unten) nicht vorhanden. Wobei hier kein signifikanter Unterschied in der Verkehrsnachfrage festgestellt werden kann. Wohl aber für die Fahrzeit entlang der querenden Relation 2-4, hier schneidet der Donnerstag im Gegenzug deutlich schlechter ab.

Die in Abbildung 126 und Abbildung 127 dargestellten GPS-Fahrten auf der stärker belasteten, querenden Relation 2-4 dieser beiden Tage veranschaulichen dies. Am 4.6.2008 ist morgens keine Fahrt über drei Minuten aufgezeichnet (was sich durch die hier nicht dargestellten ANPR-Fahrzeiten bestätigt). Die GPS-Fahrten zeigen außerdem, dass sich der Rückstaubereich (morgens und nachmittags) entlang dieser Relation vom Messstandort 2 bis zur LSA 136 erstreckt. Nach Überqueren dieses zentralen Knotenpunkts des Untersuchungsgebiets ist die Geschwindigkeit deutlich höher. Dies gilt ebenfalls für die Relationen 1-3, 2-3 und 3-1. Für die Relationen 4-2 und 3-2 ist dieser Effekt deutlich schwächer.

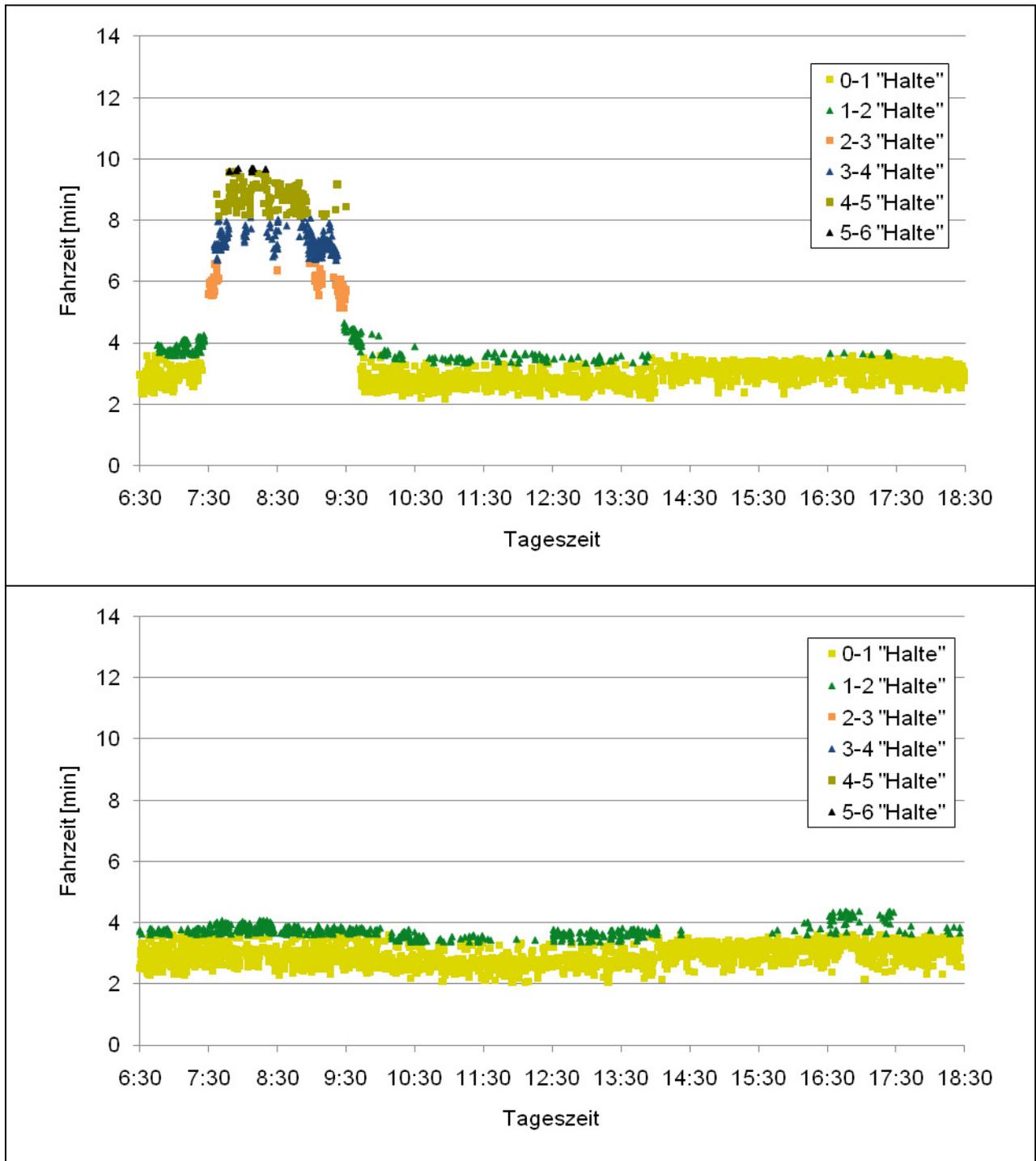


Abbildung 125: Fahrzeiten entlang der Relation 1-3 am 4.6.2008 (LRS, oben) und am 5.6.2008 (BALANCE PS1, unten).

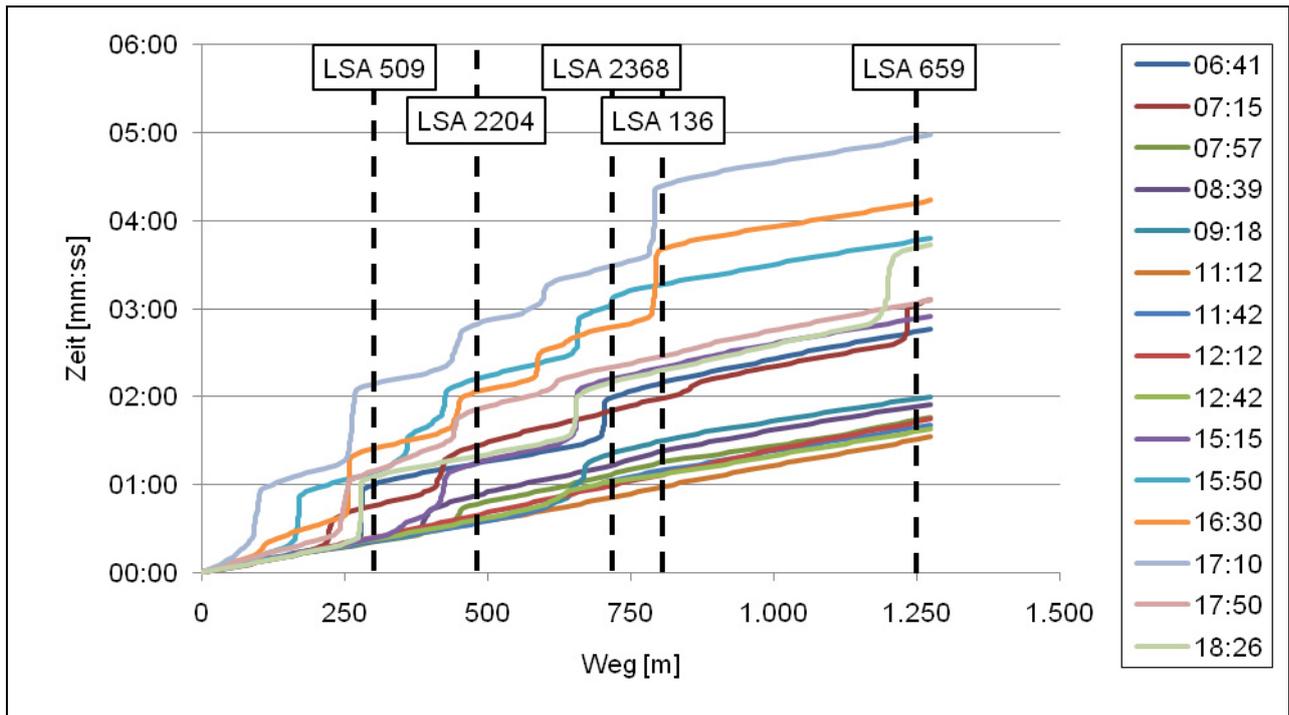


Abbildung 126: GPS-Fahrten entlang der Relation 2-4 am 4.6.2008 (LRS).

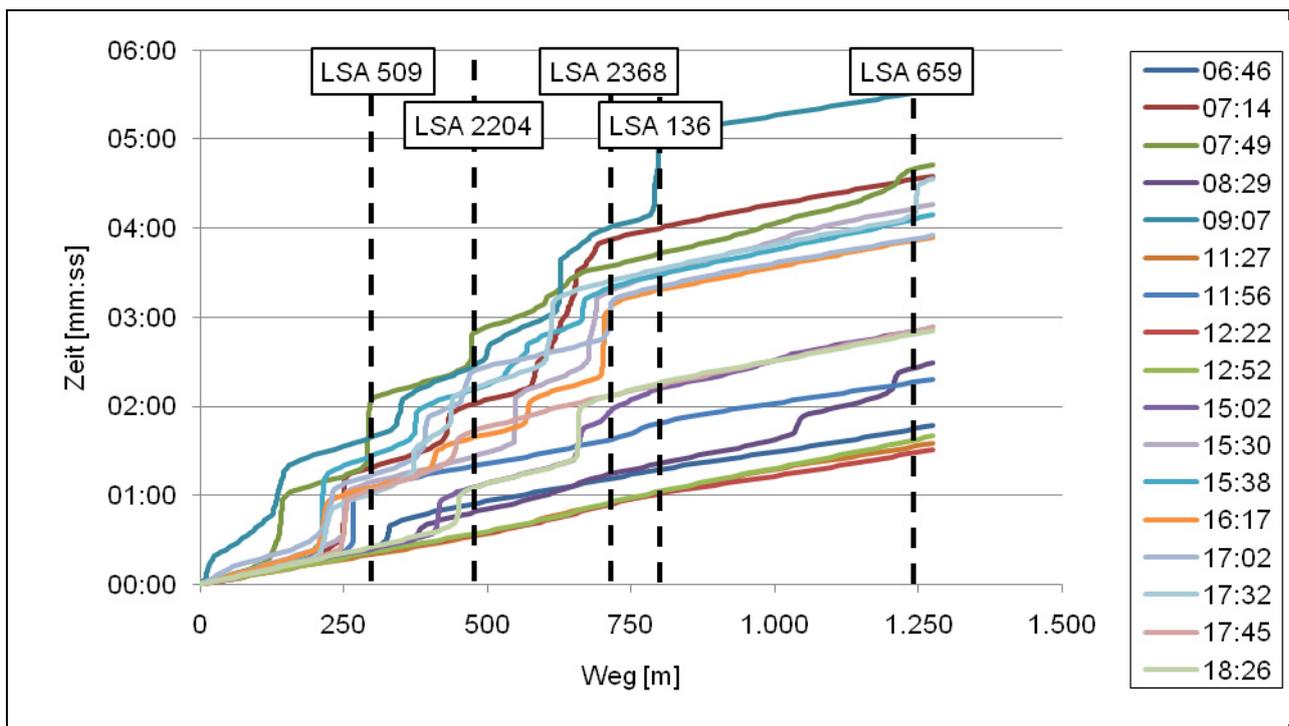


Abbildung 127: GPS-Fahrten entlang der Relation 2-4 am 5.6.2008 (BALANCE PS1).

Analyse eines Clusters

Dieser Trade-off der Fahrzeiten auf den verschiedenen Relationen resultiert aus der Tatsache, dass zu den Spitzenzeiten morgens und nachmittags eine Überlastsituation vorhanden ist, die nicht ohne eine Erhöhung der Verlustzeiten zu bewältigen ist. Im Folgenden wird der Cluster 2 (Morgenspitze, siehe Kapitel 9.5.2.2) detailliert analysiert und anschließend eine

Gesamtbetrachtung durchgeführt. Cluster 2 weist die interessantesten Unterschiede auf und soll deswegen, obwohl dieser nicht die meisten Stunden enthält, Grundlage für die Detailanalyse sein.

Dieser Cluster enthält 10 Stunden, die sich entsprechend der Legende in Abbildung 128 auf die vier Steuerungsverfahren verteilen. Diese Abbildung zeigt die mittleren Fahr- und Wunschfahrzeiten (nach Steuerungsverfahren eingefärbte Balken und schwarze horizontale Linie) der vier Hauptrelationen aller Stunden der jeweiligen Steuerungsverfahren. Nach den Verkehrsstärken gewichtet, ergeben sich daraus, zusammen mit den Abbiegerelationen, die mittlere Fahrzeit und die mittlere Verlustzeit aller Relationen beziehungsweise aller Verkehrsteilnehmer. Die ebenfalls in der Legende enthaltene mittlere Summe der Eingangsverkehrsstärken (siehe Tabelle 67 Zeilen 1, 3, 5 und 7 beziehungsweise alle Einfahrtsquerschnitte oder die Summe der Nachfragematrix) je Steuerungsverfahren bestätigt, dass für alle Steuerungsverfahren ähnliche Verkehrsmengen zu bewältigen waren.

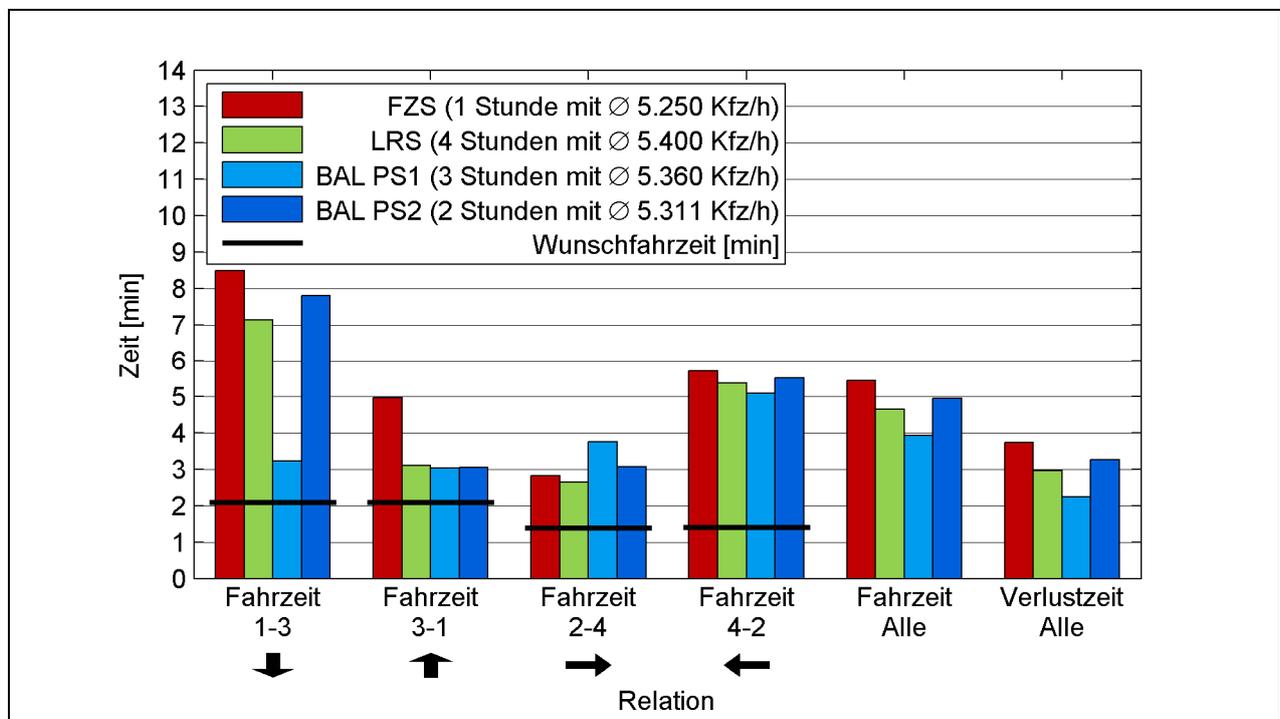


Abbildung 128: Cluster 2 - Morgenspitze - mittlere Fahr- und Verlustzeiten.

Für die Fahrzeiten von 1-3 fällt auf, dass diese für die Stunden in denen BALANCE mit dem Parametersatz 1 betrieben wurde, deutlich niedriger ist. Wie bereits angedeutet, wird die niedrige Fahrzeit entlang der Relation 1-3 (und auch 3-1, wobei hier die Belastungen geringer sind) mit einer etwas höheren Fahrzeit entlang der querenden Relation 2-4 erkauft. Eine Analyse der Freigabezeitanteile, die zu dieser drastisch anderen Verteilung führt, ist leider nicht möglich, da für die Erhebungstage im Juni keine Protokolle der Signalgruppen vorhanden sind. Insgesamt schneidet BALANCE PS1 für diesen Cluster mit einer mittleren Verlustzeit von 2,24 Minuten trotz der höheren Fahrzeit auf der etwas höher belasteten Relation 2-4 am besten ab (siehe auch Tabelle 71).

Für die Festzeitsteuerung ist die Fahrzeit von 3-1 mit Abstand am größten. Der Grund dafür findet sich bei Betrachtung der Freigabezeitanteile der Signalgruppen an der LSA 136, die den zentralen Knotenpunkt des Untersuchungsgebietes steuert (siehe Abbildung 129, wobei Legende und Positionen der Balken der Darstellung aller vier Steuerungsverfahren entsprechen, obwohl hier für BALANCE PS1 keine Daten vorliegen).

Festzeitsteuerung	Lokal regelbasierte Steuerung	BALANCE PS1	BALANCE PS2
3,72 min	2,97 min	2,24 min	3,26 min
223 s	178 s	134 s	196 s

Tabelle 71: Cluster 2 - Morgenspitze - Verlustzeiten.

Hier wird deutlich, dass die Festzeitsteuerung für die Relation 3-1 den geringsten Freigabezeitanteil vergibt. Umgekehrt hat der entgegenkommende Linksabbieger der Relation 1-4 die höchsten Freigabezeitanteile aller Steuerungsverfahren. Die verkehrsabhängigen Steuerungen (LRS und BALANCE) haben hier die Möglichkeit die zusätzliche Freigabezeit dieses bedingt verträglich geführten Linksabbiegers zu verkürzen beziehungsweise zu überspringen. Die dadurch auf der Relation 3-1 zusätzlich verfügbare Freigabezeit von 7 s wirkt sich dabei deutlich auf die Fahrzeit aus. Da die verkehrsabhängigen Steuerungen diese Variante meistens nutzen, bedeutet dies, dass dieser Linksabbiegerstrom lediglich durch Kapazität im Phasenübergang abgefertigt wird. Die dadurch vorhandene Kapazität ist für diesen Linksabbieger, der sich in den Spitzenzeiten um die 150 Kfz/h bewegt (Auswertung der Induktionsschleife) ausreichend. Die Freigabezeitanteile für die Relation 4-2 folgen demselben Schema - hier entspricht der entgegenkommende Linksabbieger der Relation 2-1.

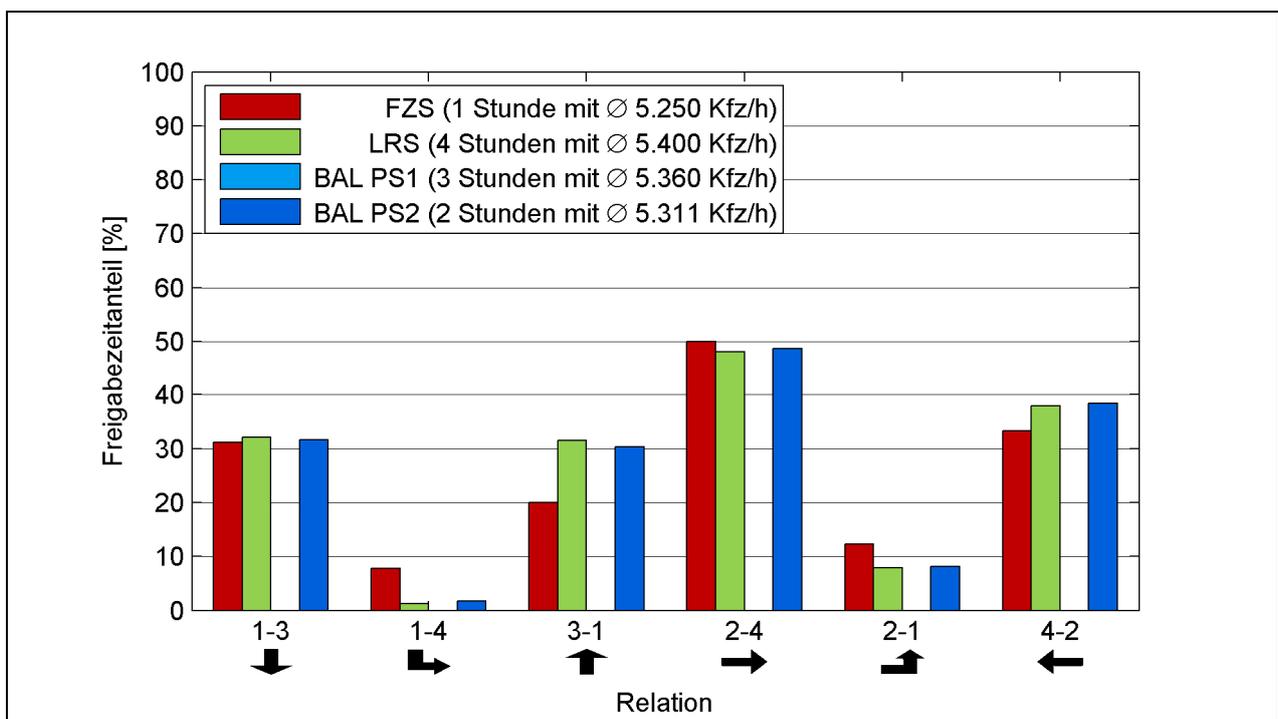


Abbildung 129: Cluster 2 - Morgenspitze - mittlere Freigabezeitanteile der Relationen an der LSA 136 (Bramfelder Straße / Habichtstraße).

Abbildung 130 (oben) zeigt die Summenverteilungen für die mittlere Anzahl Halte jedes Steuerungsverfahrens. Diese entsprechen den Ergebnissen der Fahr- beziehungsweise Verlustzeiten insofern, dass BALANCE PS1 den niedrigsten Wert aufweist, die lokal regelbasierte Steuerung etwas besser abschneidet als BALANCE PS2 und die Festzeitsteuerung den höchsten und damit schlechtesten Wert hat. Die in Abbildung 130 (unten) dargestellten Bufferindizes der Hauptrelationen bewegen sich zwischen 9 und 37 %, wobei im Durchschnitt kein bedeutender Unterschied zwischen den Steuerungsverfahren in den Bufferindizes und damit auch in der Zuverlässigkeit der zu erwartenden Fahrzeiten festgestellt werden kann. Dieser Trend bestätigt sich bis auf wenige Ausreißer auch für die übrigen Cluster (siehe Tabelle 73).

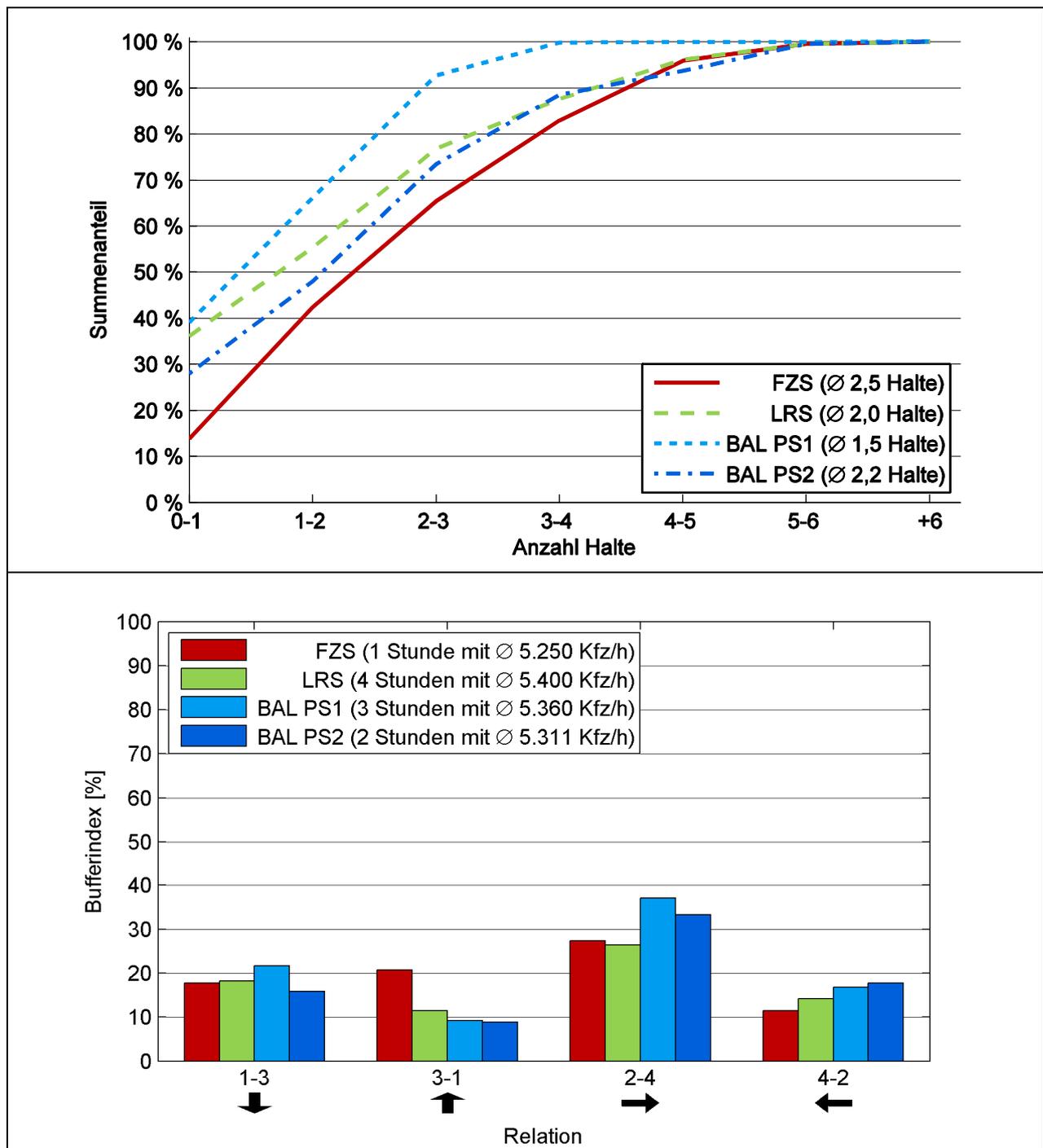


Abbildung 130: Cluster 2 - Morgenspitze - mittl. Anzahl Halte (oben) und Bufferindizes (unten).

Gesamtbewertung

Der Verlauf der mittleren Fahrzeit und der mittleren Anzahl Halte für einen durchschnittlichen Tag (siehe Kapitel 5.1.12.3 Erzeugung eines durchschnittlichen Tages) ist in Abbildung 131 und Abbildung 132 dargestellt, wobei diese beiden Kenngrößen aufgrund der für alle Steuerungsverfahren nur von der Tageszeit abhängigen Umlaufzeit stark korrelieren.

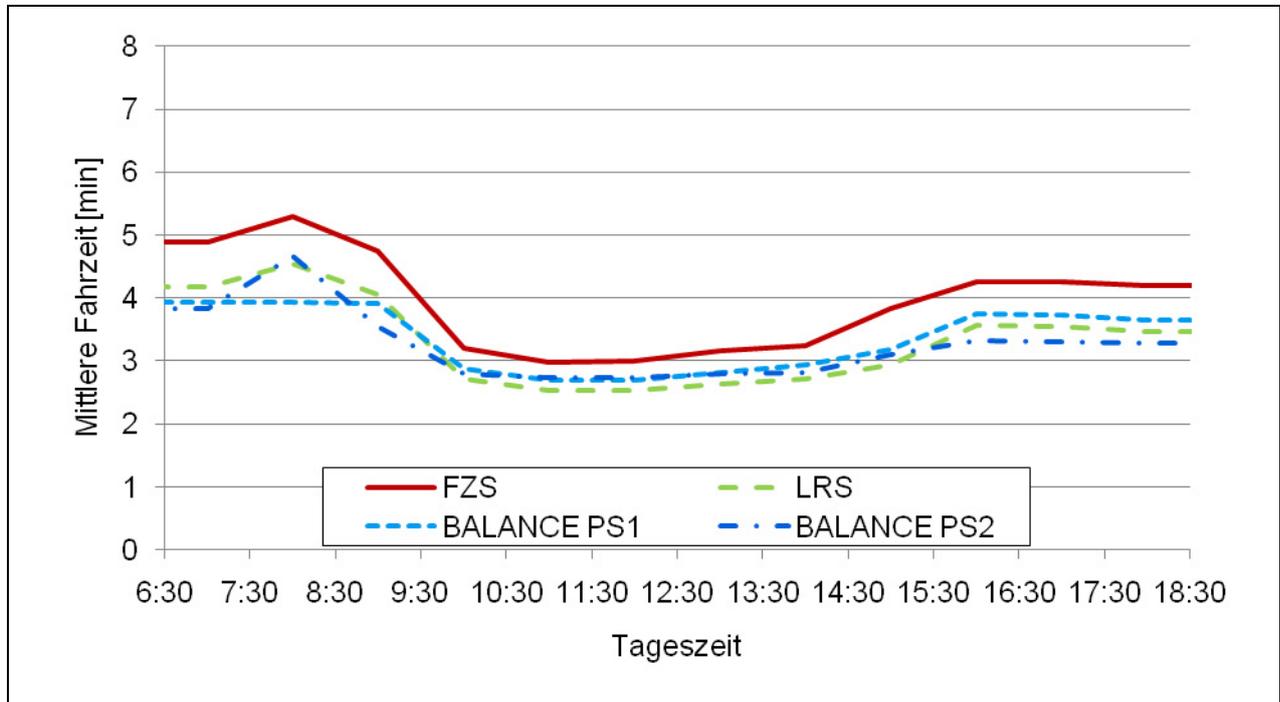


Abbildung 131: Durchschnittliche mittlere Fahrzeiten nach Steuerungsverfahren über alle Relationen (durchschnittliche betroffene Nachfrage pro Stunde 4.930 Kfz/h).

Tabelle 72 enthält die über den durchschnittlichen Tag gemittelten und auf die lokal regelbasierte Steuerung normierten Kenngrößen als hoch aggregierte Vergleichswerte. Hier zeigt sich, den vorangegangenen Abbildungen wie auch der nachfolgenden Betrachtung über alle Cluster entsprechend, dass BALANCE und die lokal regelbasierte Steuerung eine ähnliche Qualität erreichen und die Festzeitsteuerung deutlich mehr mittlere Halte und eine höhere mittlere Fahrzeit aufweist.

Steuerungsverfahren	Anteil an der lokal regelbasierten Steuerung [%]	
	Mittlere Fahrzeit	Mittlere Anzahl Halte
Festzeitsteuerung	120	137
Lokal regelbasierte Steuerung	100	100
BALANCE PS1	103	103
BALANCE PS2	100	97

Tabelle 72: Aggregierte auf die lokal regelbasierte Steuerung normierte Kenngrößen für einen durchschnittlichen Tag.

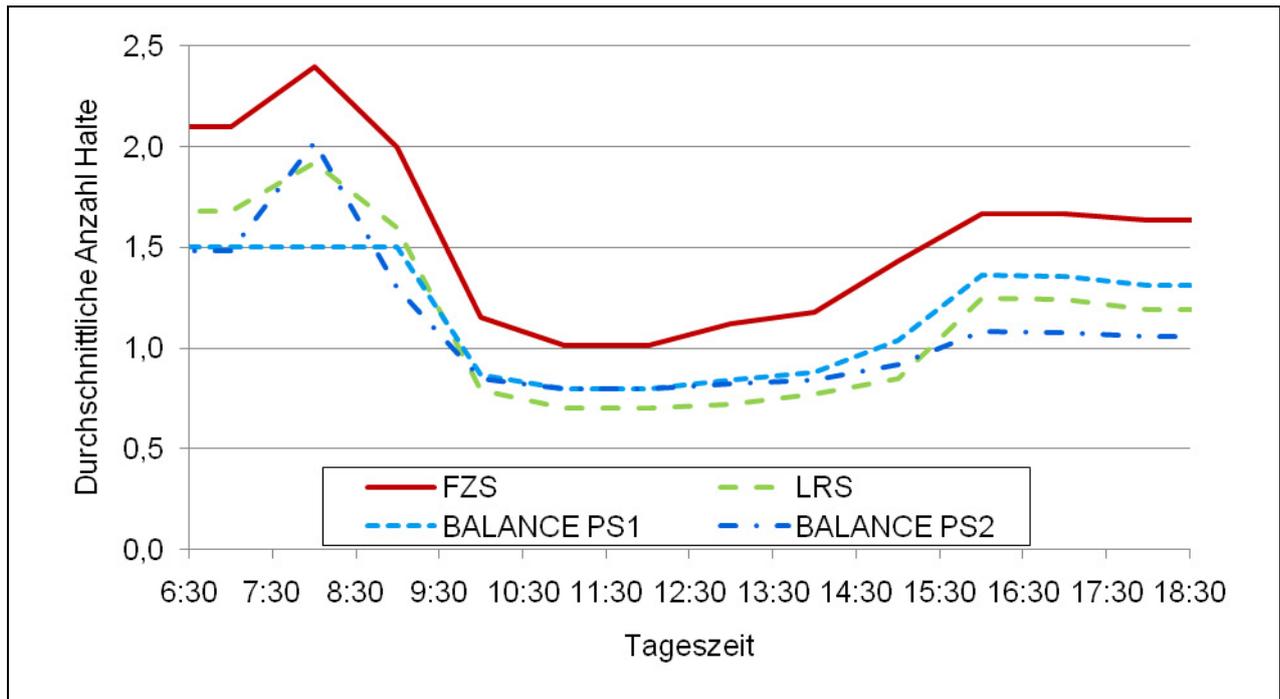


Abbildung 132: Durchschnittliche Anzahl Halte nach Steuerungsverfahren über alle Relationen (durchschnittliche betroffene Nachfrage pro Stunde 4.930 Kfz/h).

Tabelle 73 enthält die Zusammenfassung der Bewertungskenngrößen aller Cluster. Die letzten beiden Blöcke beinhalten die Resultate ohne Clusterung, wobei im oberen Block die Nachfragematrizen der Entropiemaximierung als Bewertungsverkehrsstärken dienen und für den unteren Block die erfassten Durchgangsverkehrsstärken zu Grunde gelegt werden (das heißt die „historische Matrix“ beziehungsweise der Eingang der Entropiemaximierung, weshalb die Eingangsverkehrsstärken in Spalte 5 niedriger sind). Die beiden Blöcke bestätigen, dass diese Prozesse die Bewertung beeinflussen, was gewollt ist, aber nicht verzerren, was untersucht werden müsste.

Insgesamt schneidet die Festzeitsteuerung am schlechtesten ab. Der Grund dafür ist, dass dieses Steuerungsverfahren keine Verkehrsströme oder Anforderungen von Fußgänger abrechnen oder überspringen kann. Da sich die Verkehrsnachfrage vormittags und nachmittags über der Kapazität befindet, ist das Ausnutzen dieser Eingriffsmöglichkeit mit messbaren Ergebnissen verbunden.

Die verkehrsabhängigen Steuerungen (LRS und BALANCE) können genau diesen Vorteil nutzen und erzielen damit ähnlich gute Resultate. Hier kann in der erreichten Qualität kein eindeutiger Unterschied festgestellt werden. Insgesamt scheint die Kapazität zu den Spitzenzeiten von diesen Steuerungen voll ausgenutzt zu werden. Die Art und Weise, wie eine bestimmte Qualität (in Form einer mittleren Verlustzeit) erreicht wird, unterscheidet sich allerdings deutlich. Das heißt, die verschiedenen Parametersätze von BALANCE PS1 und PS2 sind in der Lage ganz unterschiedliche Relationen zu priorisieren wodurch sich gegebenenfalls andere Zielsetzungen verfolgen lassen (politische oder Verlagern von Rückstau aufgrund umwelttechnischer Aspekte). Detailliertere Erkenntnisse über das Zusammenspiel von Steuerung und Wirkung sollen dabei mit Hilfe der Simulationen gewonnen werden.

	Anzahl Stunden im Cluster	Fahrzeit [min]	Verlustzeit [min]	Eingangs- verkehrs- stärken [Kfz/h]	Anzahl Halte	Bufferindex[%] auf Relation			
						1-3	3-1	2-4	4-2
Cluster 1 - vormittags mittlere Verkehrsstärke									
FZS	9	4,74	3,04	4.941	2,0	35	22	27	16
LRS	5	4,05	2,35	5.161	1,6	53	10	26	25
BAL PS1	3	3,92	2,22	5.090	1,5	26	10	26	17
BAL Okt	4	3,55	1,87	5.031	1,3	76	10	28	25
Cluster 2 - vormittags hohe Verkehrsstärke - Morgenspitze									
FZS	1	5,43	3,73	5.250	2,5	18	21	27	11
LRS	4	4,66	2,97	5.400	2,0	18	11	26	14
BAL PS1	3	3,94	2,24	5.360	1,5	22	9	37	17
BAL Okt	2	4,95	3,26	5.311	2,2	16	9	33	18
Cluster 3 - mittags mittlere Verkehrsstärke									
FZS	5	3,06	1,37	4.507	1,1	21	44	31	31
LRS	7	2,60	0,92	4.557	0,7	17	24	33	23
BAL PS1	3	2,82	1,14	4.574	0,8	22	24	40	20
BAL Okt	3	2,71	1,03	4.526	0,8	21	22	33	27
Cluster 4 - mittags niedrige Verkehrsstärke									
FZS	7	2,98	1,29	4.157	1,0	27	30	29	25
LRS	8	2,53	0,84	4.134	0,7	21	26	32	22
BAL PS1	7	2,68	1,00	4.148	0,8	24	23	27	28
BAL Okt	4	2,73	1,05	4.285	0,8	24	24	30	29
Cluster 5 - nachmittags mittlere Verkehrsstärke									
FZS	9	3,77	2,09	5.066	1,4	16	28	22	18
LRS	3	2,87	1,20	5.098	0,8	9	30	23	24
BAL PS1	2	3,11	1,43	5.208	1,0	8	23	28	21
BAL Okt	2	3,08	1,39	5.184	0,9	15	27	30	25
Cluster 6 - nachmittags hohe Verkehrsstärke - Nachmittagsspitze									
FZS	5	4,32	2,62	5.516	1,7	23	27	13	13
LRS	9	3,64	1,95	5.710	1,3	11	25	26	20
BAL PS1	4	3,81	2,13	5.668	1,4	17	24	17	19
BAL Okt	8	3,34	1,66	5.549	1,1	9	24	26	28
Cluster 7 - Ausreißer									
FZS	0	-	-	-	-	-	-	-	-
LRS	0	-	-	-	-	-	-	-	-
BAL PS1	1	4,18	2,5	6.418	1,6	26	38	12	20
BAL Okt	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Alle Stunden									
FZS	36	3,93	2,24	4.848	1,6	25	29	25	20
LRS	36	3,36	1,68	4.974	1,2	21	22	29	22
BAL PS1	23	3,39	1,71	4.940	1,2	21	21	28	22
BAL Okt	23	3,34	1,66	5.053	1,1	26	20	29	26

	Anzahl Stunden im Cluster	Fahrzeit [min]	Verlustzeit [min]	Eingangsverkehrsstärken [Kfz/h]	Anzahl Halte	Bufferindex[%] auf Relation			
						1-3	3-1	2-4	4-2
Alle Stunden (ohne Entropiemaximierung)									
FZS	36	3,63	1,97	1.298	1,4	25	29	25	20
LRS	36	3,28	1,63	1.455	1,1	21	22	29	22
BAL PS1	23	3,33	1,66	1.405	1,2	21	21	28	22
BAL Okt	23	3,32	1,68	1.586	1,2	26	20	29	26

Tabelle 73: Bewertungsübersicht nach Clustern und insgesamt in Hamburg.

9.5.2.4 Simulationsergebnisse

Der wesentliche Mehrwert der Simulation gegenüber der Messung liegt darin, dass in der Simulation nicht nur die Fahrzeuge auf den mittels Messtechnik erfassten Relationen sondern alle Fahrzeuge im Netz in die Auswertung einbezogen werden können. Zudem bietet die Simulationsumgebung die Möglichkeit zur Untersuchung zusätzlicher Szenarien. Die Verlustzeiten können aufgrund unterschiedlicher Definitionen jedoch nicht direkt zwischen Messung und Simulation verglichen werden.

In einem ersten Schritt wurde zunächst die Simulationsumgebung gemäß der in „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ [FGSV 2006b] beschriebenen Vorgehensweise kalibriert (vgl. Abschnitt 5.1.13.3). Als Zielkenngrößen wurden dabei die Verkehrsstärken und Fahrzeiten aus den Feldmessungen verwendet. Anschließend wurden die verschiedenen Szenarien simuliert, wobei zur Schaffung einer hinreichenden statistischen Aussagekraft in der Regel 20 Simulationsläufe pro Szenario und Steuerungsvariante durchgeführt wurden.

Auf den zur Simulation eingesetzten Rechnern konnten die Simulationen dabei (je nach LSA-Steuerungsverfahren) in ein- bis fünffacher Realgeschwindigkeit ablaufen. Da durch Verzögerungen bei der Implementierung der Schnittstelle zwischen VISSIM und BALANCE und die aufwändige Kalibrierungsphase im Projekt erst deutlich später als geplant mit der Durchführung der Simulationsszenarien begonnen werden konnte, wurde in den meisten Szenarien nur der Zeitbereich zwischen 6:30 Uhr und 9:30 Uhr simuliert. Dieser ist besonders interessant, da er die morgendliche Spitzenstunde mitsamt ihren Nachwirkungen abbildet und in den Messungen hier die größten Unterschiede zwischen den einzelnen Steuerungsverfahren auftraten.

Aus Aufwandsgründen wurden aus einer Vorauswahl von fünf Nachfrageszenarien nach ersten Simulationsläufen zwei ausgewählt, für die vertiefte Betrachtungen unter Einsatz unterschiedlicher Steuerungsszenarien durchgeführt wurden. Im *Szenario A* ist vor allem die Habichtstraße (Relationen 2-4 und 4-2) um 7% bzw. 18% stärker belastet als im Feldtest (Mittel aus den 10 Erhebungstagen). Die Gesamtverkehrsmenge in der Spitzenstunde wird dadurch gegenüber den Messungen um ca. 5% erhöht. Beim *Szenario B* werden die Zuflüsse an den Zufahrten 1 (Bramfelder Chaussee aus Richtung Nordost) und 4 (Habichtstraße aus Richtung

Südost) um 13% bzw. 15% erhöht. Gleichzeitig werden die Zuflussmengen an den anderen Zufahrten verringert, so dass die Gesamtmenge in etwa konstant bleibt. Nachstehende Tabelle stellt die Verkehrsmengen der beiden Szenarien dem Mittelwert aus der Messung gegenüber.

Zuflüsse in der Spitzenstunde (7:00 – 8:00 Uhr)						
Zufahrt	Absolut [Kfz/h]			Relativ [%]		
	Mittelwert Messungen	Szenario A	Szenario B	Mittelwert Messungen	Szenario A	Szenario B
1 – Nordost	1.308	1.310	1.473	100	100	113
2 – Nordwest	1.516	1.623	1.378	100	107	91
3 – Südwest	735	766	725	100	104	99
4 – Südost	1.456	1.724	1.674	100	118	115
Gesamt (inkl. Nebenzufahrten)	8.712	9.161	8.691	100	105	100

Tabelle 74: Übersicht der Zuflussmengen für die Simulationsszenarien.

Wie bereits in Abschnitt 5.1.13.4 ausgeführt, wirkt sich im Testfeld Hamburg insbesondere die Anzahl der bedarfsweise geschalteten Linksabbiegerphasen am Knoten Habichtstraße / Bramfelder Straße auf die erzielbaren Fahrzeiten aus. Dies führt dazu, dass die Ergebnisse zwischen den Simulationsläufen bei den verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren deutlich stärker schwanken als bei Festzeitsteuerung. Die nachstehenden Abbildungen verdeutlichen diesen Effekt am Beispiel der Relation 2 – 4 im Szenario A und den Steuerungsverfahren Festzeitsteuerung und BALANCE.

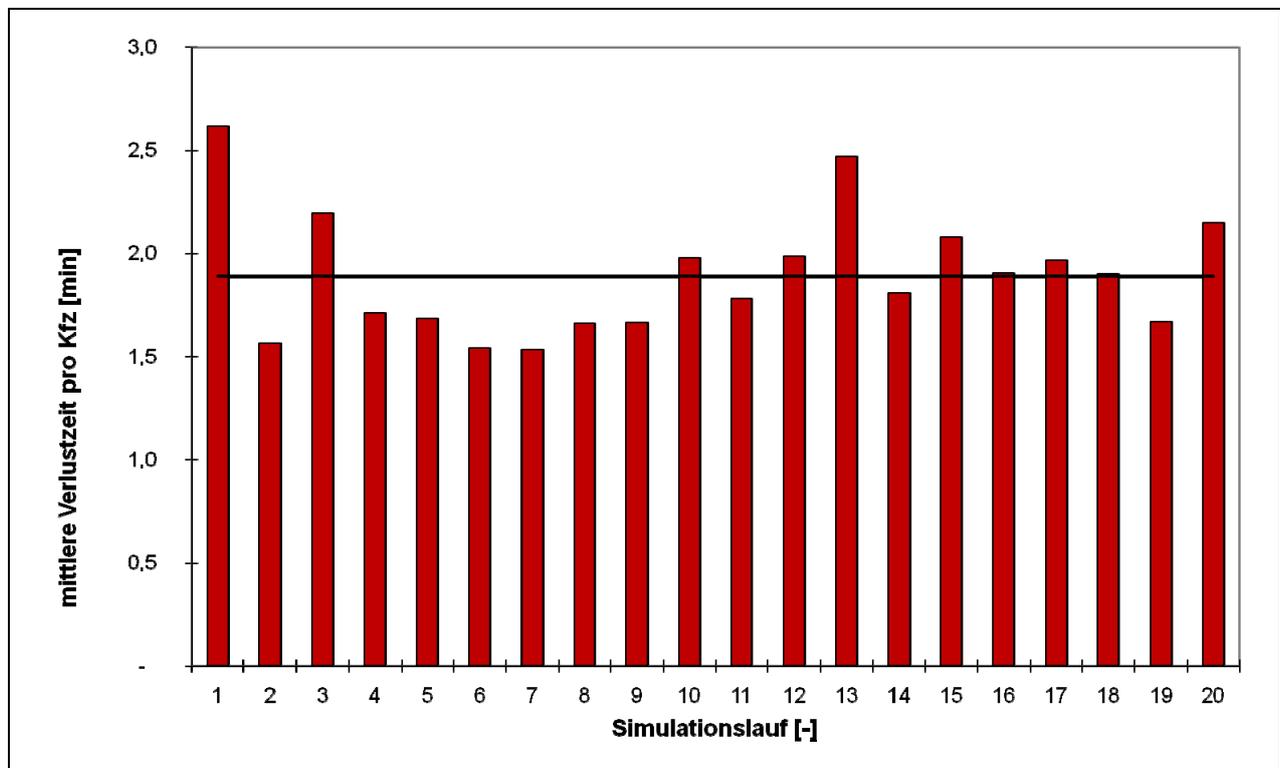


Abbildung 133: Vergleich der mittleren Verlustzeit pro Kfz auf der Relation 2 – 4 über 20 Simulationsläufe mit Festzeitsteuerung.

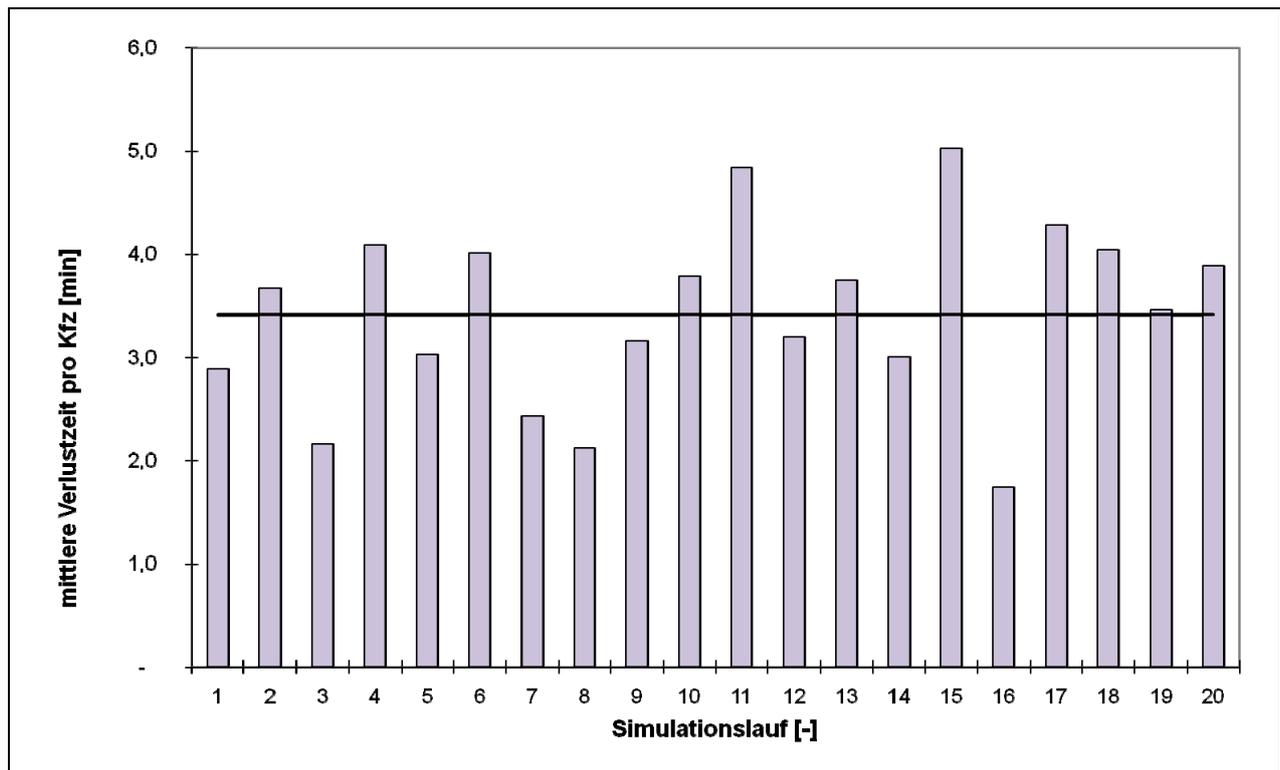


Abbildung 134: Vergleich der mittleren Verlustzeit pro Kfz auf der Relation 2 – 4 über 20 Simulationsläufe mit BALANCE PS1 – Genetischer Algorithmus.

Für die beiden betrachteten Nachfrageszenarien wurden jeweils fünf Steuerungsszenarien untersucht:

- Festzeitsteuerung (FZS)
- Lokal regelbasierte Steuerung (LRS)
- Modellbasierte Netzsteuerung BALANCE
 - mit Parametersatz 1 (PS1) und Optimierung mittels Hill-Climbing-Algorithmus
 - mit Parametersatz 1 (PS1) und Optimierung mittels Genetischem Algorithmus
 - mit Parametersatz 2 (PS2) und Optimierung mittels Genetischem Algorithmus

Ergebnisse Szenario A

Im Szenario A können mittels der Simulationen die grundsätzlichen Aussagen aus den Messungen auch für eine veränderte Verkehrsnachfrage bestätigt werden.

Bei Verwendung des aktuell in Hamburg zur Optimierung innerhalb von BALANCE eingesetzten Gradientenverfahrens (Hill-Climbing-Algorithmus) liegen die Verlustzeiten in der Gesamtbetrachtung der vier Hauptrelationen etwa gleichauf mit denen der LRS. Wie auch in der Realität konnte BALANCE den Rückstau in der Zufahrt 1 und damit die Verlustzeiten auf der Relation 1 – 3 stark reduzieren. Aufgrund der im Szenario erhöhten Verkehrsmengen auf der Habichtstraße wirken sich die dabei auftretenden Verschlechterungen auf den Relationen

2 – 4 und 4 – 2 stärker aus als im Feldtest, so dass sich in der Gesamtbetrachtung kein Vorteil für BALANCE (mit Hill-Climbing-Algorithmus) ergibt (Abbildung 135).

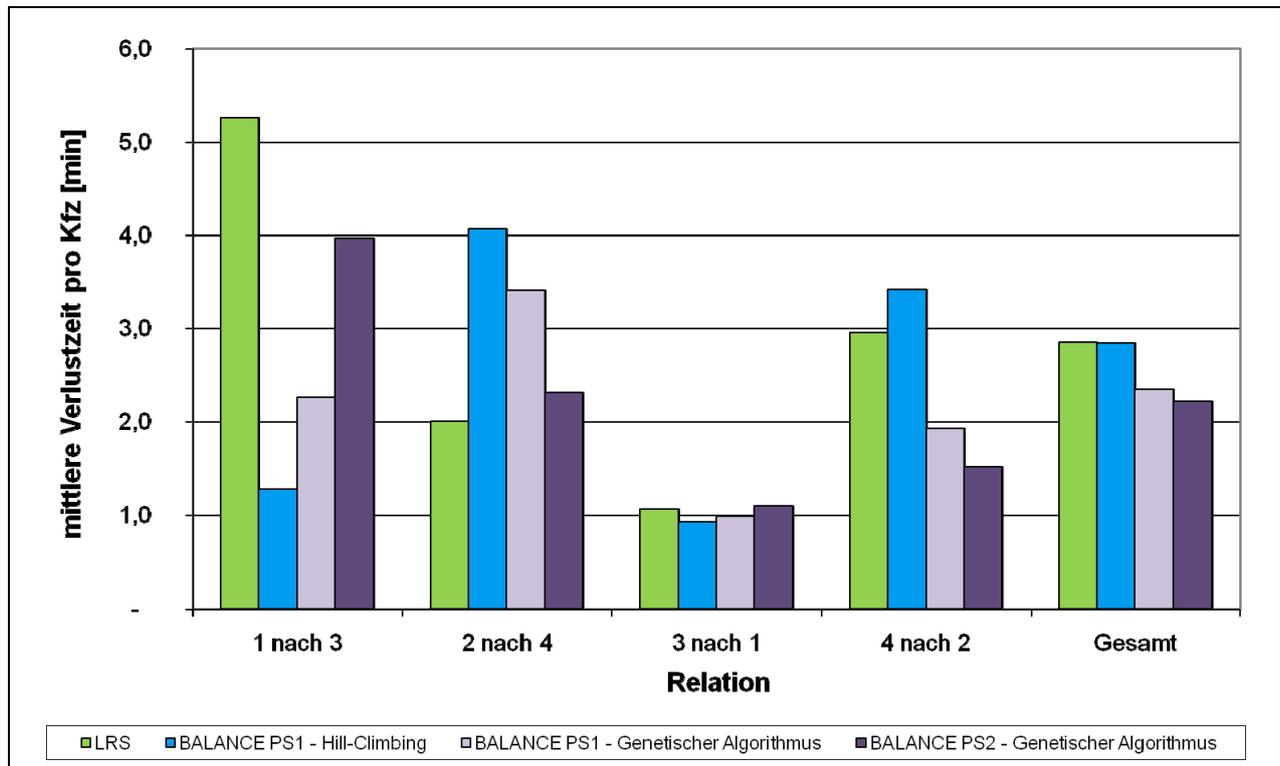


Abbildung 135: Vergleich der mittleren Verlustzeiten pro Kfz auf den vier Hauptrelationen im Szenario A.

Der im Projekt TRAVOLUTION erstmals zur Optimierung in BALANCE eingesetzte genetische Algorithmus [Braun et al. 2009] kann dagegen bei geeigneter Parametrierung auch in dem stark ausgelasteten Szenario A noch eine deutliche Verringerungen der Verlustzeiten bewirken.

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

Tabelle 75: Vergleich der mittleren normierten Verlustzeit pro Kfz im Simulationsszenario A (LRS=100).

Tabelle 75 und Abbildung 136 zeigen zudem, dass das Verhältnis der Verlustzeiten und der Anzahl der Halte zwischen den einzelnen Verfahren abhängig von der Betrachtungsebene deutlich variieren kann. Während BALANCE mit genetischem Algorithmus und Parametersatz 2 auf den vier Hauptrelationen die geringsten Verlustzeiten aufweist, schneidet es in der

netzweiten Betrachtung schlechter ab als die LRS. Vor dem Hintergrund, dass etwa 40% der Fahrzeuge nicht über die vier Hauptzufahrten ins System gelangen (vgl. Tabelle 74), ist dies durchaus nicht unerwartet. Offensichtlich werden hier die geringeren Verlustzeiten auf den Hauptströmen durch Verschlechterungen in den Nebenströmen erkauft.

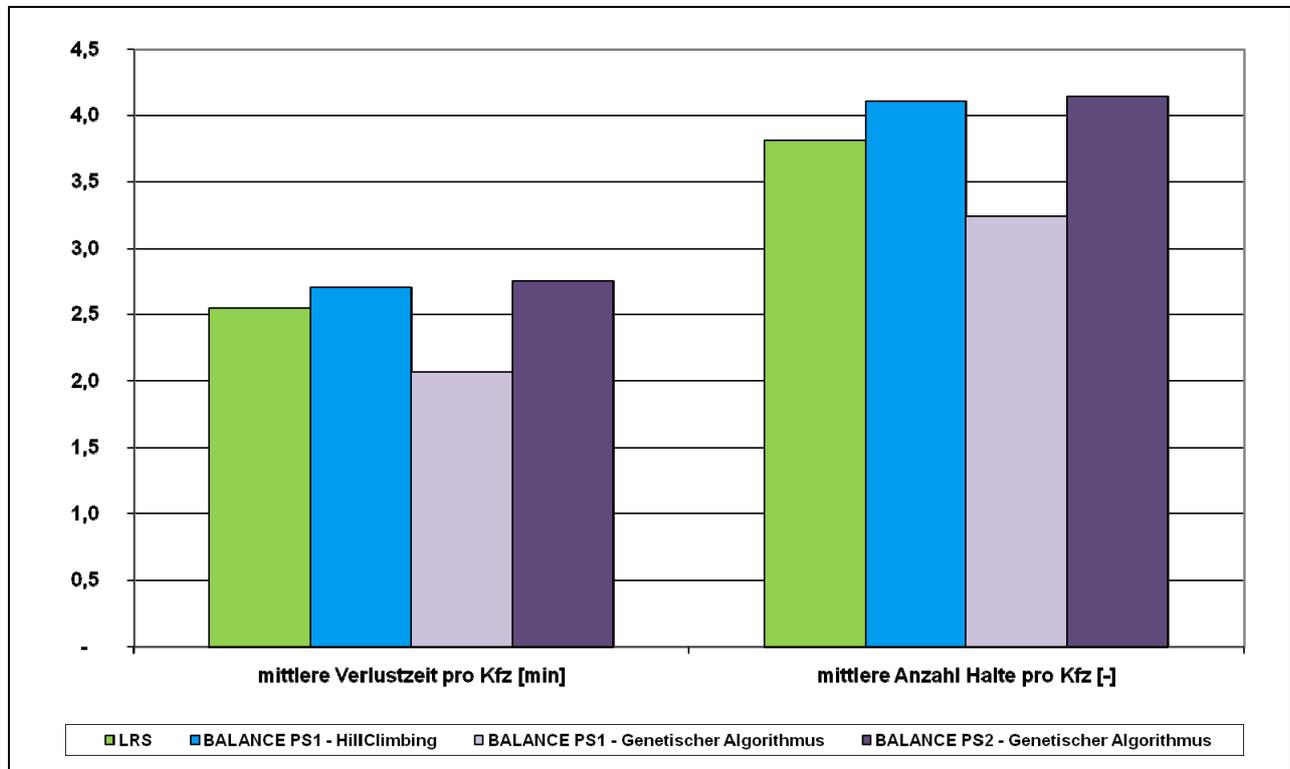


Abbildung 136: Vergleich der mittleren Verlustzeiten pro Kfz sowie der Anzahl Halte im gesamten Simulationsnetz im Szenario A.

Ergebnisse Szenario B

Im Szenario B wird die Verkehrsmenge auf den bereits stark belasteten Relationen 1 – 3 und 4 – 2 gegenüber dem Mittelwert aus den Messungen nochmals um 13% bzw. 15% erhöht, die Gesamtverkehrsmenge jedoch durch Abminderungen an anderen Zuflüssen gleich gehalten.

Im Vergleich zu Szenario A und zu den Messungen scheidet die Festzeitsteuerung in Szenario B nochmals deutlich schlechter ab als die verkehrsabhängigen Verfahren. Die in jedem Umlauf unabhängig vom Bedarf geschalteten Linksabbiegerphasen bewirken hier, dass die für die Hauptphasen zur Verfügung stehende Freigabezeit nicht mehr ausreichen, um die erhöhten Verkehrsstärken an den Zufahrten 1 und 4 in vertretbarer Qualität zu bewältigen (Tabelle 76).

Zwischen der LRS und den verschiedenen BALANCE-Varianten fallen die Unterschiede dagegen geringer aus als bei Szenario A und sind in der Größenordnung eher mit den Ergebnissen aus den Messungen zu vergleichen.

Steuerungsverfahren	Mittlere normierte Verlustzeit (LRS=100) im Szenario B, Zeitraum 6:30 Uhr - 9:30 Uhr	
	auf den vier Hauptrelationen	netzweit
Festzeitsteuerung (FZS)	161	203
Lokal regelbasierte Steuerung (LRS)	100	100
BALANCE PS1 – Hill-Climbing-Algorithmus	98	93
BALANCE PS1 – Genetischer Algorithmus	103	96
BALANCE PS2 – Genetischer Algorithmus	102	100

Tabelle 76: Vergleich der mittleren normierten Verlustzeit pro Kfz im Simulationsszenario B (LRS=100).

Die geringere Gesamtbelastung führt im Vergleich zu Szenario A zu deutlich geringeren Verlustzeiten und zu einer geringeren Anzahl Halte bei allen verkehrsabhängigen Verfahren (Abbildung 137). Die besten Ergebnisse liefert auch in diesem Szenario BALANCE mit dem Parametersatz 1. Allerdings liegt dieses Mal der Hill-Climbing-Algorithmus vor dem Genetischen Algorithmus.

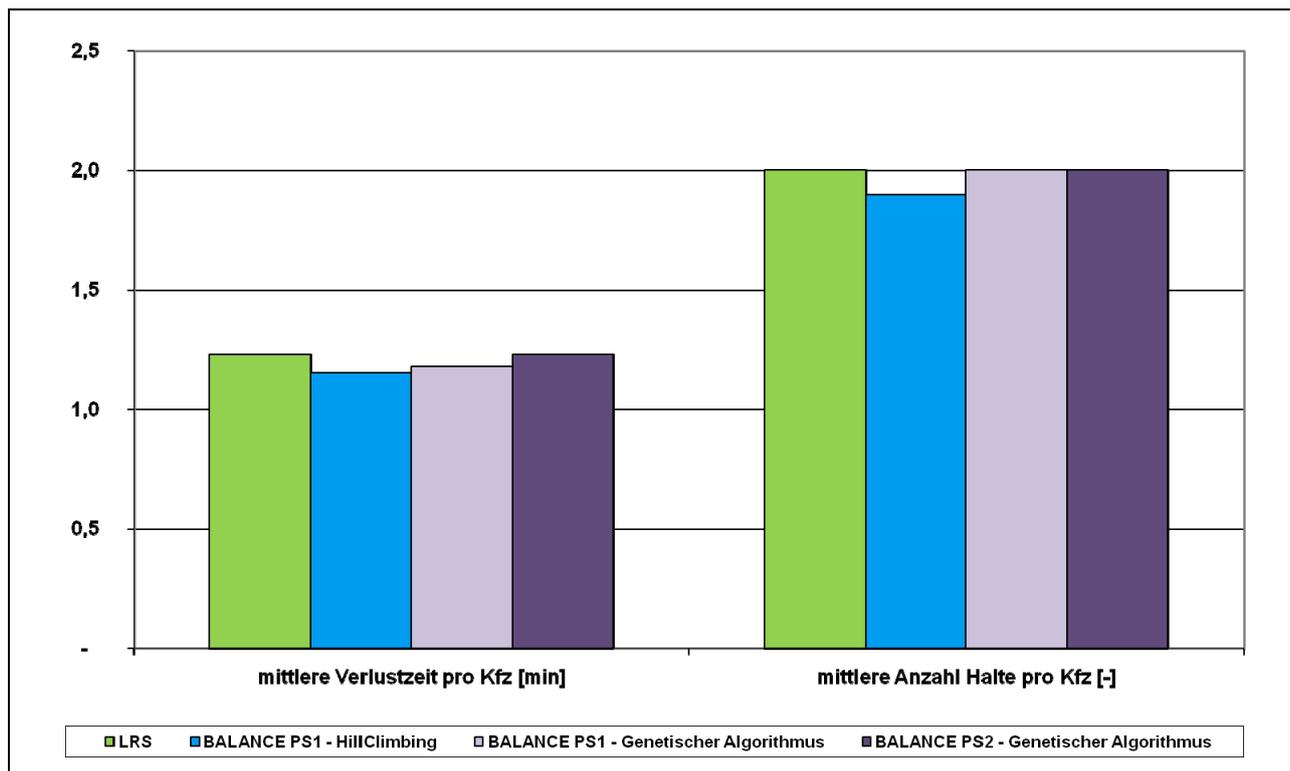


Abbildung 137: Vergleich der mittleren Verlustzeiten pro Kfz sowie der Anzahl Halte im gesamten Simulationsnetz im Szenario B.

Zusammenfassung

In beiden betrachteten Szenarien kann BALANCE gegenüber der LRS eine deutliche Verringerung der Verlustzeiten (netzweit um 7% bis 19%) sowie der Anzahl Halte (netzweit um

5% bis 16%) bewirken. Die dazu erforderliche Parametrierung ist jedoch nicht transparent und daher nicht einfach durchzuführen.

Je nach Optimierungsverfahren und Parametereinstellung verlagert BALANCE die auftretenden Verlustzeiten unterschiedlich stark auf die einzelnen Relationen (Abbildung 135), so dass hier durchaus steuernd eingegriffen werden kann. Leider sind die Auswirkungen der Parametrierung und des Optimierungsverfahrens nicht direkt vorhersehbar, so dass der Bearbeiter sich an eine geeignete Lösung herantasten muss. Da sich bei ungeeigneten Parametern auch extreme Verschlechterungen für einzelne Verkehrsströme ergeben können (hier nicht dargestellt), ist dazu die Nutzung einer Simulation unbedingt zu empfehlen.

Die Ergebnisse aus Szenario A belegen außerdem, dass es für eine umfassende Bewertung nicht ausreicht, lediglich die Hauptrelationen zu betrachten (Tabelle 75). Während man aufgrund der Daten für die vier Hauptrelationen wohl den Parametersatz 2 favorisieren würde, zeigt die netzweite Betrachtung auf, dass PS 1 die bessere Wahl wäre. Wirkungsbetrachtungen für das Gesamtnetz lassen sich ebenfalls nur in Simulationsstudien durchführen.

9.5.3 Auswertung umweltbezogener Kenngrößen

Die Auswertung der umweltbezogenen Kenngrößen erfolgt analog zur im Kapitel 5.2.6 beschriebenen methodischen Vorgehensweise. In den folgenden Unterkapiteln werden die testfeldspezifischen Besonderheiten und die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Die eingesetzten Verfahren werden detailliert in Kapitel 5.2.6 beschrieben.

9.5.3.1 Datenerhebung und Datenaufbereitung

Messstandort und Messaufbau

Die Umweltmessungen im *Testfeld Hamburg* wurden am Knotenpunkt Habichtstraße/Bramfelder Straße durchgeführt. Die Messungen haben im Zeitraum vom 2.6.2008 bis zum 6.6.2008 (Messwoche 1) sowie im Zeitraum vom 6.10.2008 bis zum 10.10.2008 (Messwoche 2), jeweils zwischen 6:30 Uhr und 18:30 Uhr stattgefunden.

Die PM_x - und NO_x -Konzentration sowie die lokalen meteorologischen Kenngrößen wurden in Messwoche 1 in einem Abstand von 65 m von der Haltlinie und in Messwoche 2 als Parallelmessung in 60 m sowie 70 m Abstand von der Haltlinie gemessen (Abbildung 138). Die Probenahme befand sich in 1 m Abstand vom Fahrbahnrand und in etwa 1,5 m Höhe. In Messwoche 1 wurde anstelle der zweiten verkehrsbezogenen Immissionsmessstelle eine zusätzliche Hintergrundmessung im Hinterhof des Gebäudes der Techniker Krankenkasse durchgeführt, welches direkt am Knotenpunkt liegt.

Zur Messung der PM_{10} und $PM_{2,5}$ -Konzentration werden optische Partikelzähler der Firma Grimm, Typ Grimm OPC 107, eingesetzt. Die Geräte leiten anhand der gemessenen

Partikelanzahl und -durchmesser sowie anhand empirischer Dichtefaktoren die Massenkonzentration von PM_{10} , $PM_{2,5}$ und PM_1 ab. Diese Abschätzung erfüllt die in der 39. BImSchV geforderte Genauigkeit, so dass sie als Alternative zum Referenzverfahren zugelassen sind. Nach Herstellerangaben wird eine Reproduzierbarkeit der Messwerte von $\pm 3\%$ im gesamten Messbereich erreicht [Grimm Aerosol Technik 2008]. Die Datenerfassung ist mit einer zeitlichen Auflösung von 6 Sekunden möglich. Die untere Grenze des Erfassungsbereichs liegt bei einem Partikeldurchmesser von $0,25\ \mu\text{m}$. Die Geräte werden in wetterfesten Grimm-Gehäusen betrieben. Ein Impaktor mit eingebauter Lufttrocknung dient der Probenahme. Die Lufttrocknung schaltet sich in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte ein- und aus (der Schwellenwert liegt nach Auskunft der Firma Grimm bei 65%). Die Wetterschutzgehäuse werden auf Kisten gestellt, so dass die Probenahme in ca. $1,5\ \text{m}$ Höhe erfolgt.

Zur Messung der NO_x , NO und NO_2 -Konzentration werden Stickoxidmonitore vom Typ Horiba APNA370 eingesetzt, die nach dem Chemolumineszenzprinzip arbeiten. Vom Hersteller wird eine Reproduzierbarkeit von $\pm 1\%$ angegeben [HORIBA Europe GmbH 2010]. Die Messung ist mit dem verwendeten Gerät in einer zeitlichen Auflösung von fünf Sekunden möglich. Zur Probenahme wird ein Teflonschlauch mit einer Ansaugende in $1,5\ \text{m}$ Höhe verwendet. Die Messgeräte werden vor jedem Messzeitraum von der Firma Horiba kalibriert.

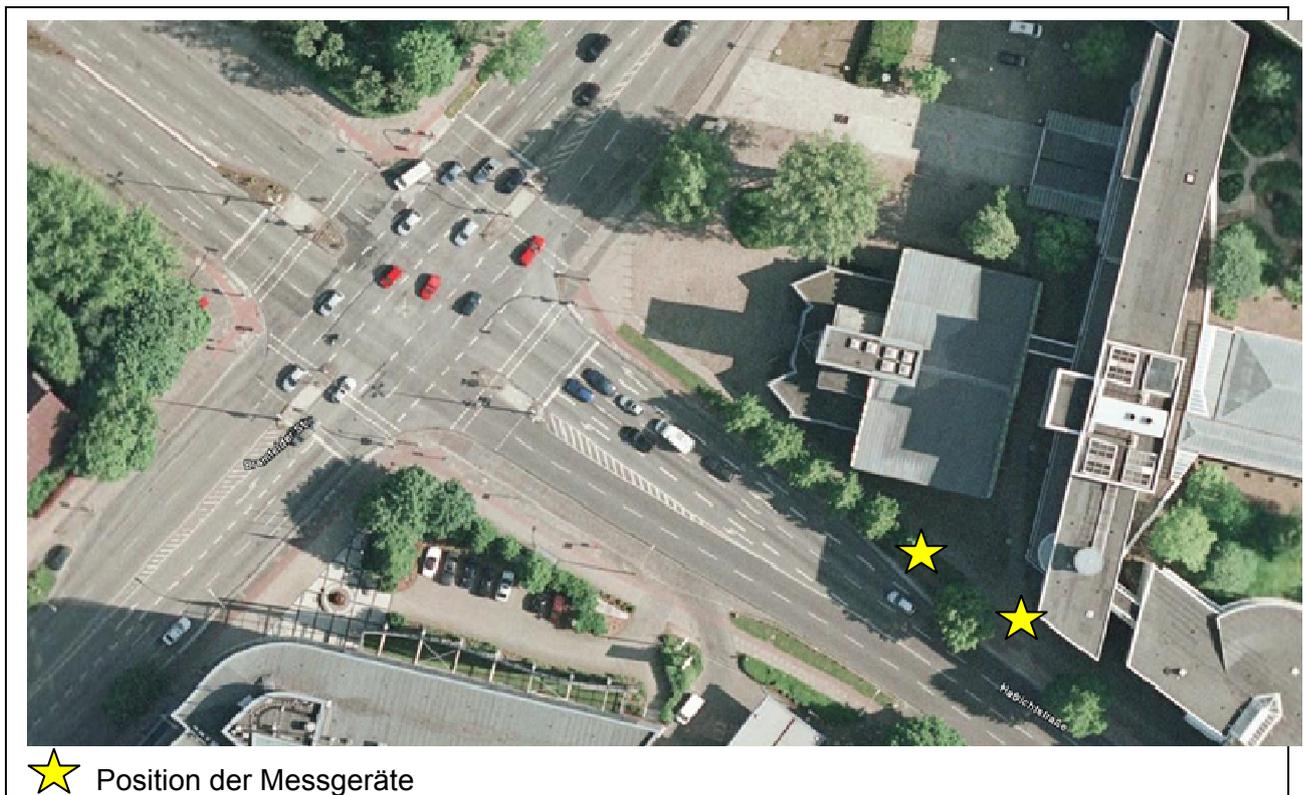


Abbildung 138: Standort der Umweltmessung im Testfeld Hamburg (nicht maßstäblich; Bildquelle: Google Earth).

Zur Messung der lokalen meteorologischen Kenngrößen werden die Wettersensoren des Grimm-Wetterschutzgehäuses eingesetzt. Damit ist die Messung der Lufttemperatur, der

relativen Luftfeuchte, des Luftdrucks sowie der Windgeschwindigkeit und Windrichtung in der gleichen zeitlichen Auflösung wie die Messung der Partikelkonzentration möglich.

Die lokalen verkehrlichen Kenngrößen werden manuell via Notebook und Microsoft-Excel erfasst. Jede Ausprägung einer Verkehrskenngröße und der zugehörige Zeitstempel werden unter Nutzung eines Excel-Makros mit einem Tastendruck erfasst.

Erhobene Kenngrößen im Testfeld

Nachstehend sind die im Testfeld vom Partner TUD-FVV erhobenen sowie zusätzlich in den Auswertungen berücksichtigten Kenngrößen mit dem genauen Messstandort und dem Messzeitraum aufgeführt. Die Messungen haben im Zeitraum vom 16.2.2009 bis zum 27.2.2009 stattgefunden.

Erfasste Kenngrößen	Messort	Messung in Messwoche	Zeitliche Auflösung der Erfassung
NO _x / NO / NO ₂	Straßenmessstelle TUD	1+2	5 s
	Hintergrundmessstelle TUD	1	3 min
	Umweltmesscontainer Habichtstr.	1+2	1 min
	Städtischer Hintergrund Hamburg (wechselnde Stationen in Abh. der Windrichtung)	1+2	1 h
PM ₁₀	Straßenmessstelle TUD	1+2	6 s
	Hintergrundmessstelle TUD	1	3 min
	Umweltmesscontainer Habichtstr.	1+2	3 h
	Städtischer Hintergrund Hamburg (wechselnde Stationen in Abh. der Windrichtung)	1+2	1 d
PM _{2,5}	Straßenmessstelle TUD	1+2	6 s
	Hintergrundmessstelle TUD	1	3 min
	Umweltmesscontainer Habichtstr.	1+2	3 h
Windrichtung	Straßenmessstelle TUD	1	2 min ¹⁴
	Umweltmesscontainer Habichtstr.	2 1+2	6 s 1 min
Windgeschwindigkeit	Straßenmessstelle TUD	1	2 min
	Umweltmesscontainer Habichtstr.	2 1+2	6 s 1 min
Temperatur	Straßenmessstelle TUD	1	2 min
	Umweltmesscontainer Habichtstr.	2 1+2	6 s 1 min
Luftfeuchte	Straßenmessstelle TUD	1	2 min
	Umweltmesscontainer Habichtstr.	2 1+2	6 s 1 min
Luftdruck	Straßenmessstelle TUD	1	2 min
	Umweltmesscontainer Habichtstr.	2 1+2	6 s 1 min
Verkehrsstärke	Straßenmessstelle TUD		5 s
	Verkehrsdetektoren Habichtstraße	1+2	1 min

¹⁴ Die zeitliche Auflösung der erhobenen meteorologischen Kenngrößen der ersten Messwoche im Testfeld liegt bei nur zwei Minuten, da aufgrund technischer Probleme mit der zum Partikelmessgerät zugehörigen Wetterstation auf eine alternative Wetterstation zurückgegriffen werden musste.

Erfasste Kenngrößen	Messort	Messung in Messwoche	Zeitliche Auflösung der Erfassung
Fahrsituation	Straßenmessstelle TUD	1+2	5 s
Fahrzeugart	Straßenmessstelle TUD	1+2	5 s
Fahrestreifen (zur erfassten Fahrsituation)	Straßenmessstelle TUD	1+2	5 s

Tabelle 77: Erfasste Kenngrößen im Testfeld Hamburg.

9.5.3.2 Datenfusion und Datenaufbereitung

Die Datenzusammenführung, die Qualitätssicherung der erhobenen Zeitreihen und die Ableitung weiterer Kenngrößen werden analog zur in 5.2.6.2 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Die im Detail durchgeführten Plausibilitätsprüfungen und die vorgenommenen Korrekturen können dem Anhang entnommen werden.

Im *Testfeld Hamburg* werden die erhobenen und abgeleiteten Kenngrößen zu einem 450-Sekunden-Mittel als kleinstes gemeinsames Vielfaches der Umlaufzeiten von 75 Sekunden und 90 Sekunden für den hochfrequenten Ansatz, sowie zu Stundenmittelwerten für den niederfrequenten Ansatz aggregiert. Die trendbereinigte hochfrequente Komponente wird aus der Differenz zwischen den hochfrequenten Messwerten und der niederfrequenten kubischen Regression über die Zeit ermittelt. Zur Untersuchung der niederfrequenten Komponente werden die Zeitreihen mit der Auflösung von einer Stunde herangezogen.

9.5.3.3 Datenanalyse

Qualitative Interpretation der erhobenen Zeitreihen

Eine Auswahl der im *Testfeld Hamburg* erfassten Zeitreihen ist als Sequenzdiagramm in Abbildung 139 (1. Messwoche) und in Abbildung 140 (2. Messwoche) dargestellt. Die große Datenlücke am 3.6.2008 ergibt sich aus einer Sturmwarnung in Verbindung mit Starkregen, so dass die Messungen zur Mittagszeit abgebrochen wurden. Die mittäglichen Datenlücken in der ersten Messwoche sind in einer geplanten Messunterbrechung begründet, die vor allem zur Datensicherung genutzt wurde, da die an die Immissionsmessgeräte angeschlossenen Rechner mehrfach ausfielen.

Die NO_x-Ganglinie weist in beiden Messwochen einen charakteristischen Verlauf mit einer Morgenspitze, einem Mittagstief und zum Nachmittag/Abend hin ansteigenden Werten auf. Bedingt ist dies primär durch die photochemischen Prozesse. Die Partikelkenngrößen weisen keinen ausgeprägten Tagesgang auf. Eine Ähnlichkeit der NO_x- und der PM_x-Ganglinien ist in Bezug auf lokale Maxima und Minima erkennbar, darüber hinaus unterscheiden sich die Tagesgänge deutlich. Beim Vergleich zwischen den Messwochen fällt zunächst der deutliche Unterschied der Absolutwerte der Immissionen, insbesondere NO_x und PM₁₀ auf. In der zweiten

Messwoche wurden wesentlich höhere Immissionskonzentrationen als in der ersten Messwoche gemessen (bei teilweise niedrigeren Hintergrundkonzentrationen).

Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Immissionen ist bei einem Anstieg der lokalen Windgeschwindigkeit auf Werte größer 1 m/s erkennbar. Der entgegengesetzte Verlauf von Temperatur und Luftfeuchte tritt deutlich zutage. Erkennbar ist ein entgegengesetzter Tagesgang der NO_x-Belastung zur Temperatur (bzw. ein ähnlicher Verlauf zur Luftfeuchte). Die regionalen meteorologischen Daten weisen für beide Zeiträume auf nächtliche Inversionen hin; in der zweiten Messwoche hat eine die Immissionskonzentrationen begünstigende Strahlungswetterlage vorgeherrscht.

Die Verkehrsstärke im Testfeld Hamburg zeigt eine deutlich erkennbare Morgen- und Abendspitze, liegt jedoch auch in den Schwachverkehrszeit auf einem Niveau von etwa 1.000 Fahrzeugen pro Stunde und damit deutlich höher als im Testfeld Bremerhaven.

Im *Testfeld Hamburg* liegen die Mittelwerte und auch die Varianz der Immissionskenngrößen der zweiten Messwoche deutlich höher als in der ersten Messwoche. Auch hat der Luftdruck in der zweiten Messwoche eine deutlich höhere Varianz. Aufgrund der sich deutlich voneinander unterscheidenden Tagesganglinien der Luftschadstoffe und der meteorologischen Kenngrößen werden auch die beiden Messwochen des Testfelds Hamburg als zwei unterschiedliche Grundgesamtheiten angesehen und in den weiteren Auswertungen getrennt voneinander untersucht.

Analog zum Testfeld Bremerhaven sind die Änderungsraten der Immissions- und windbezogenen sowie verkehrlichen Kenngrößen deutlich höher als die der meteorologischen Kenngrößen Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck. Alle Kenngrößen besitzen im ersten Lag eine Autokorrelation von 0,5 oder höher. Ein K-S-Test zeigt lediglich für die Kenngrößen Windgeschwindigkeit und Verkehrsstärke eine Normalverteilung in beiden Messwochen an. Die Histogramme der Temperatur, der SV-Verkehrsstärke und der Durchfahrten zeigen eingipflige, symmetrische Verteilungen mit grundsätzlicher Ähnlichkeit zur Normalverteilung. Die Histogramme lassen für die Immissionskenngrößen ebenso wie für die Luftfeuchte linkssteile Verteilungen erkennen, die sich durch einfache Logarithmierung an die Normalverteilung annähern lassen. Der Luftdruck, die Windrichtung und die Anfahrvorgänge haben asymmetrische und teils zweigipflige Verteilungen. Der K-S-Test ist im Anhang dargestellt.

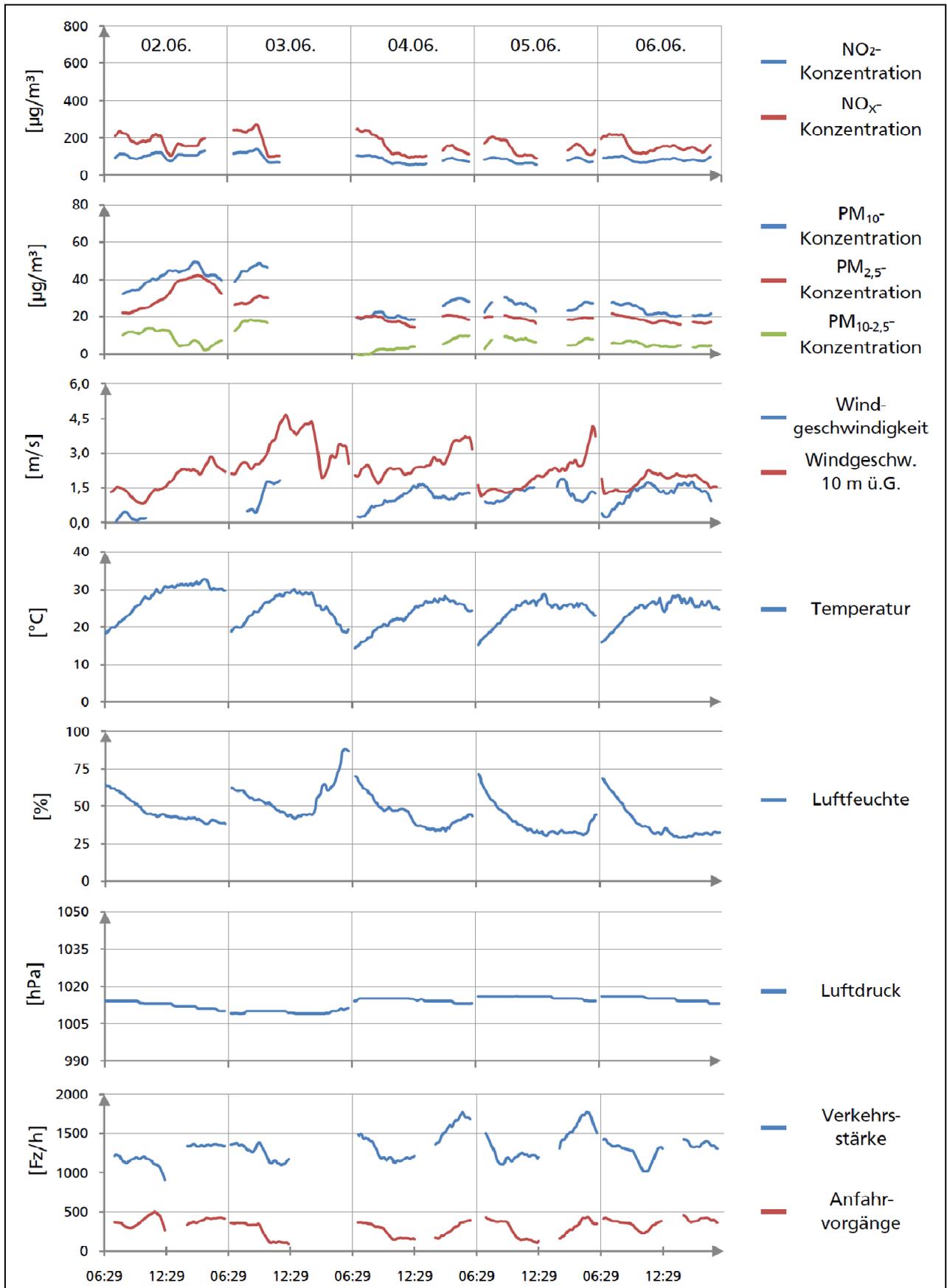


Abbildung 139: Ausgewählte Zeitreihen der ersten Messwoche im Testfeld Hamburg (gleitende 1h Mittelwerte).

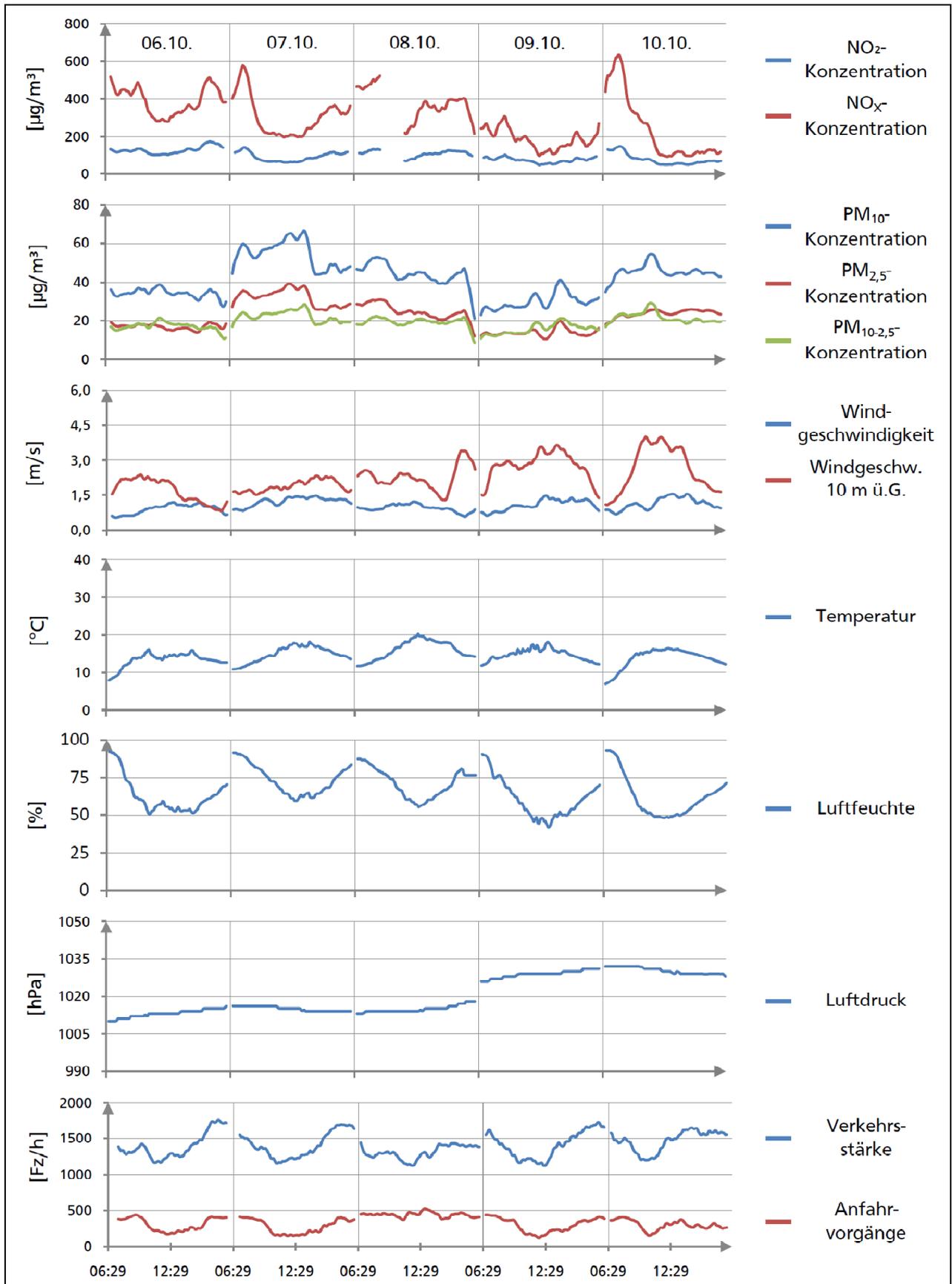


Abbildung 140: Ausgewählte Zeitreihen der zweiten Messwoche im Testfeld Hamburg (gleitende 1h Mittelwerte).

Feststellen von Zusammenhängen zwischen Verkehrskenngrößen und Immissionskenngrößen

Verfahrensbedingt lassen sich die Methoden der Frequenzanalyse nur auf lückenlose Zeitreihen anwenden. Diese Voraussetzung ist bei den Daten aus dem Testfeld Hamburg nicht erfüllt. Die Kreuzspektrumsanalyse wird daher für die einzelnen lückenlosen Zeitreihenabschnitte gesondert durchgeführt (siehe Anhang) und als quadratische Kohärenz $Ch(h)$ dargestellt. Die quadratische Kohärenz kann als spektrales Bestimmtheitsmaß mit dem Wertebereich $0 \leq CH \leq 1$ verstanden werden. Sie wird für die trendbereinigten NO_x -, PM_{10} -, $\text{PM}_{2,5}$ und $\text{PM}_{10-2,5}$ -Zeitreihen, jeweils kombiniert mit der Zeitreihe der trendbereinigten Verkehrsstärke, auf Grundlage der 5-Sekunden-Daten ermittelt. In Tabelle 54 sind die Zeiträume dargestellt, für die eine signifikante quadratische Kohärenz vorliegt.

Geschaltete Umlaufzeit	Untersuchter Zeitraum	Davon signifikante Kohärenz für einen Zeitraum von	bei Periode
90 s	84 h	60 h für NO_x	86,2 s
		60 h für PM_{10}	
		60 h für $\text{PM}_{2,5}$	
		55 h für $\text{PM}_{10-2,5}$	
75 s	84 h	57 h für NO_x	74,6 s
		60 h für PM_{10}	
		36 h für $\text{PM}_{2,5}$	
		22 h für $\text{PM}_{10-2,5}$	
45 s	84 h	30 h für NO_x	45,5 s
		11 h für PM_{10}	
		22 h für $\text{PM}_{2,5}$	
		11 h für $\text{PM}_{10-2,5}$	

Tabelle 78: Zeiträume aus den Feldmessungen, für die ein signifikanter spektraler Zusammenhang zwischen gemessener Immissionskonzentration und Verkehrsstärke vorliegt.

Für einen großen Anteil der untersuchten Zeiträume werden signifikante spektrale Zusammenhänge nachgewiesen. So weist die Varianz NO_x -Belastung zu nahezu allen Zeiträumen eine signifikante periodische Übereinstimmung mit der Verkehrsstärke auf. Für die PM_x -Konzentration ist dieser Anteil etwas geringer als bei der NO_x -Konzentration. Deutlich reduziert ist der erkannte Zusammenhang hingegen für die Umlaufzeiten, die zu Schwachverkehrszeiten geschaltet wurden (75 Sekunden). Sämtliche erkannten Periodizitäten entsprechen unter Berücksichtigung von Messungenauigkeiten den geschalteten Umlaufzeiten in den beiden Testfeldern.

Es kann festgehalten werden, dass die untersuchten Immissionskenngrößen (als trendbereinigte Kenngrößen) eine Periodizität aufweisen, die der Umlaufzeit der Lichtsignalsteuerung und damit der Periodizität des Verkehrs in der Knotenpunktzufahrt entspricht. Die Annahme, dass die hochfrequenten Immissionszeitreihen maßgeblich von den hochfrequenten Verkehrszeitreihen bestimmt werden, wird damit bestätigt. Ferner kann davon

ausgegangen werden, dass das angewendete Verfahren zur Trendbereinigung grundsätzlich für den vorgesehenen Zweck geeignet ist.

Identifikation der wesentlichen Einflussgrößen auf die Immissionskenngrößen

Für die Kreuzkorrelationsanalyse werden die 450-Sekunden-Daten verwendet. Die Daten werden auf Phasenverschiebungen bis ca. eine Stunde untersucht. Darüber hinaus gehende Phasenverschiebungen würden die für die weiteren Untersuchungen verfügbare Datenmenge zu stark reduzieren. Weiterhin werden nur solche Phasenverschiebungen näher betrachtet, die für beide Messwochen eine ähnliche Größenordnung aufweisen und die Ursache zeitlich vor der Wirkung anzeigen.

Die partielle Korrelation wird ebenfalls auf Grundlage der genannten Aggregationsebenen untersucht. Die Untersuchung wird getrennt für meteorologische und verkehrliche Einflussfaktoren durchgeführt. Als Kontrollvariablen werden bis zu zwei Einflussfaktoren aus der jeweils nicht untersuchten Gruppe ausgewählt. Dabei werden nur Einflussfaktoren ausgewählt, die inhaltlich deutlich voneinander abgrenzbar sind (zum Beispiel Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte) und die in einer bivariaten Korrelationsuntersuchung eine signifikante Korrelation zur untersuchten Luftschadstoffkenngröße aufweisen.

Für den niederfrequenten Ansatz werden die erhobenen Kenngrößen in ihrer originalen Skala und in der logarithmierten Skala auf Kreuzkorrelation und partielle Korrelation untersucht. Für den hochfrequenten Ansatz werden die trendbereinigten Kenngrößen in ihrer originalen Skala und in der logarithmierten Skala untersucht.

Die Kreuzkorrelationsanalyse zeigt für die NO_x-Konzentration signifikante negative Phasenverschiebungen der Verkehrsstärke um etwa zweieinhalb Stunden an. Demnach würde die potenzielle Wirkung auf die NO_x-Konzentration vor der Ursache gemessen werden. Eine Verschiebung der Zeitreihe ist nicht sinnvoll. Für die weiteren Kenngrößen ergeben sich nach Phasenverschiebungen unter den o.g. Bedingungen keine signifikanten Korrelationen.

Tabelle 56 zeigt die wesentlichen Ergebnisse der partiellen Korrelationsanalyse für den niederfrequenten Ansatz. Tabelle 55 zeigt die Ergebnisse für die hochfrequenten Kenngrößen. Dargestellt sind sämtliche Kenngrößen mit signifikanter Korrelation sowie die Richtung des Zusammenhangs, getrennt nach den untersuchten Luftschadstoffen. Die Kürzel HH01/HH02 stehen dabei für die unterschiedlichen Messwochen in den Testfeldern. Sofern eine Prädiktorkenngröße in einer Messwoche keinen signifikanten Einfluss besitzt, wird das Vorzeichen nicht angegeben.

Die Detailtabellen zur partiellen Korrelation können dem Anhang entnommen werden.

Kenngröße	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM _{10-2,5}
	HH01 / HH02	HH01 / HH02	HH01 / HH02	HH01 / HH02
Windgeschwindigkeit	- / -	+ / -	- / +	- / +
Windrichtung-Vektor		+ / +	/ +	+ /
Windvektor		/ -		
Windgeschwindigkeit (Messcontainer)	- / -	/ +	/ -	
Windrichtung (Messcontainer)			/ +	+ / +
Temperatur	- / -	/ +		+ /
Temperatur-Steigung	/ +	+ /		
Luftfeuchte	+ / +	+ / +	+ / +	+ /
Luftfeuchte-Steigung	+ / +			
Luftdruck	- / -	- / -	- / -	- /
Luftdruck-Steigung		+ / -	+ / -	/ -
Globalstrahlung	- / -	- /	- /	
Ozon-Hintergrund	- / -	- /	- / -	- /
Wasserdampf-Verhältnis	+ / +	+ / +	+ / +	+ / +
NO _x -Hintergrund	+ / -	+ / +	+ / +	/ +
PM ₁₀ -Hintergrund	+ /	+ / +	+ / +	+ / +
Verkehrsstärke	+ /	+ / -	+ /	+ / +
Verkehrsstärke SV	+ / +	+ /	+ /	/ +
Verkehrsstärke auf 1. FS		+ / -	+ /	+ / -
Verkehrsstärke SV auf 1. FS	/ +		+ /	/ +
Verkehrsstärke SV / Verkehrsstärke	/ +	/ +		/ +
Anfahrvorgänge	+ / +	/ -	/ -	/ -
Anfahrvorgänge / Verkehrsstärke	+ / +	/ -	/ -	- / -
Anfahrvorgänge SV	+ / +	/ -	/ -	- /
Durchfahrten	/ -	+ /	+ /	+ /
Durchfahrten SV	/ +	+ / +	+ / +	/ +
NO _x -Emissionen	+ / +	+ /	+ /	
PM _{2,5} -Emissionen	+ / +	+ / -	+ / -	

Tabelle 79: Festgestellte signifikante Korrelationen (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %) zwischen logarithmierten Einflussfaktoren und logarithmierten Immissionskenngrößen für den niederfrequenten Ansatz. +/- steht für die Richtung des Zusammenhangs.

Kenngröße	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM _{10-2,5}
	HH01 / HH02	HH01 / HH02	HH01 / HH02	HH01 / HH02
Windgeschwindigkeit	- / -	- / -	- / -	/ -
Windrichtung-Vektor	/ -	/ -	/ -	/ -
Windvektor	- / -	- / -	- / -	/ -
Verkehrsstärke	+ / +		+ /	
Verkehrsstärke SV	+ / +		+ /	
Verkehrsstärke SV auf 1. FS	+ / +		+ /	
Verkehrsstärke SV / Verkehrsstärke	+ / +		+ /	
Anfahrvorgänge	+ / +	+ /	+ /	
Anfahrvorgänge (Lag-Variable)	+ / +	+ /	+ /	+ /
Anfahrvorgänge / Verkehrsstärke	+ / +		+ /	
Anfahrvorgänge SV / Verkehrsstärke	+ /			
Durchfahrten				- /
Durchfahrten SV	+ / +		+ /	
NO _x -Emissionen	+ / +	+ /	+ /	
PM _{2,5} -Emissionen	+ / +	+ /	+ /	

Tabelle 80: Festgestellte signifikante Korrelationen (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %) zwischen logarithmierten trendbereinigten Einflussfaktoren und logarithmierten, trendbereinigten Immissionskenngrößen für den hochfrequenten Ansatz. +/- steht für die Richtung des Zusammenhangs.

Quantifizieren der Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und den Immissionskenngrößen (Modellentwicklung)

Die Ergebnisse der verschiedenen Merkmalselektionsverfahren sind im Anhang dargestellt. Auch nach Anwendung dieser Verfahren ist allerdings nicht sichergestellt, dass eine optimale Merkmalsmenge mit maximaler Varianzaufklärung und mit minimaler inhaltlicher Überschneidung gefunden wird. Daher wird die resultierende Merkmalsmenge kritisch auf inhaltliche Überschneidungen geprüft und weitere Kenngrößen aus der Menge potenzieller Prädiktoren entfernt und mögliche alternative Prädiktoren (sofern sie in den Korrelationsuntersuchungen als relevant identifiziert wurden) hinzugefügt. Im Zuge dieses qualitativen Auswahlprozesses wird zudem auf möglichst einheitliche Prädiktoren in den beiden Messwochen sowie für die nieder- und hochfrequenten Modelle geachtet.

Die Modellentwicklung wird getrennt nach niederfrequentem und nach hochfrequentem Ansatz, für die zu untersuchenden Immissionskenngrößen NO_x, PM₁₀, PM_{2,5} und PM_{10-2,5} sowie die für die einzelnen Messwochen durchgeführt.

Sämtliche Prädiktorkenngrößen in den niederfrequenten Modellen sind logarithmierte Kenngrößen. Die Prädiktorkenngrößen in den hochfrequenten Modellen sind logarithmierte und anschließend trendbereinigte Kenngrößen.

Im Folgenden werden die verschiedenen Erklärungsmodelle differenziert nach den betrachteten Immissionskenngrößen anhand statistischer Kenngrößen zur Modellgüte sowie anhand einer graphischen Gegenüberstellung von Messung und Modell dargestellt. Im Sequenzdiagramm werden die modellierten Werte ohne Berücksichtigung der Lag-Variable dargestellt. Eine Einbeziehung der Lag-Variable als Modellfehler zum Zeitpunkt t-1 würde voraussetzen, dass das Modell kontinuierlich anhand einer Messung geeicht wird. Das Ziel des Erklärungsmodells ist es jedoch, den Anteil der identifizierten Prädiktoren an den gemessenen Immissionen festzustellen. Die Differenz zwischen den modellierten Werten (*ohne* Berücksichtigung der Lag-Variable) und den gemessenen Werten vermittelt daher einen guten Eindruck der tatsächlich ungeklärten Varianz.

Das entwickelte Erklärungsmodell wird anhand der beschriebenen Kriterien bewertet und fachlich interpretiert. Die Kürzel HH01/HH02 stehen dabei für die zwei Messwochen. Die Prüfung der erforderlichen statistischen Voraussetzungen für die weitere Verwendung der Modelle ist ebenso wie detaillierte Angaben zu den einzelnen Prädiktorkenngrößen im Anhang dargestellt.

Erklärungsmodell für die gemessene NO_x-Konzentration:

Das *niederfrequente Modell* erklärt in beiden Messwochen mehr als 80 % der Varianz der NO_x-Konzentration bei einem relativen Standardfehler von 5 % bis etwa 20 % erklärt (Tabelle 57). Das *hochfrequente Modell* erklärt in beiden Messwochen etwa 40 % der Varianz der NO_x-Konzentration bei einem relativen Standardfehler von etwa 40 % (Tabelle 57).

Modell	Bestimmtheitsmaß R ²	Relativer Standardfehler rSE
	HH01 / HH02	HH01 / HH02
Niederfrequent	0,85 / 0,84	5% / 21%
Hochfrequent	0,40 / 0,38	37% / 40%

Tabelle 81: Übergreifende Modellparameter der nieder- und hochfrequenten NO_x-Erklärungsmodelle.

Die graphische Gegenüberstellung zeigt, dass das Modell den Tagesgang an jedem Messtag gut wiedergibt. Lediglich vereinzelte Maxima (7.10.2008) oder Minima (8.10.2008) werden vom Modell unterschätzt.

Das hochfrequente Modell (Abbildung 142) bildet die gemessenen Maxima und Minima an allen Tagen korrekt ab. Der hohe Standardfehler rührt daher, dass die Amplituden häufig unterschätzt werden. Ein Grund dafür könnten nichtlineare Zusammenhänge, nicht berücksichtigte Einflüsse oder auch der gewählte Ansatz der Trendbereinigung sein.

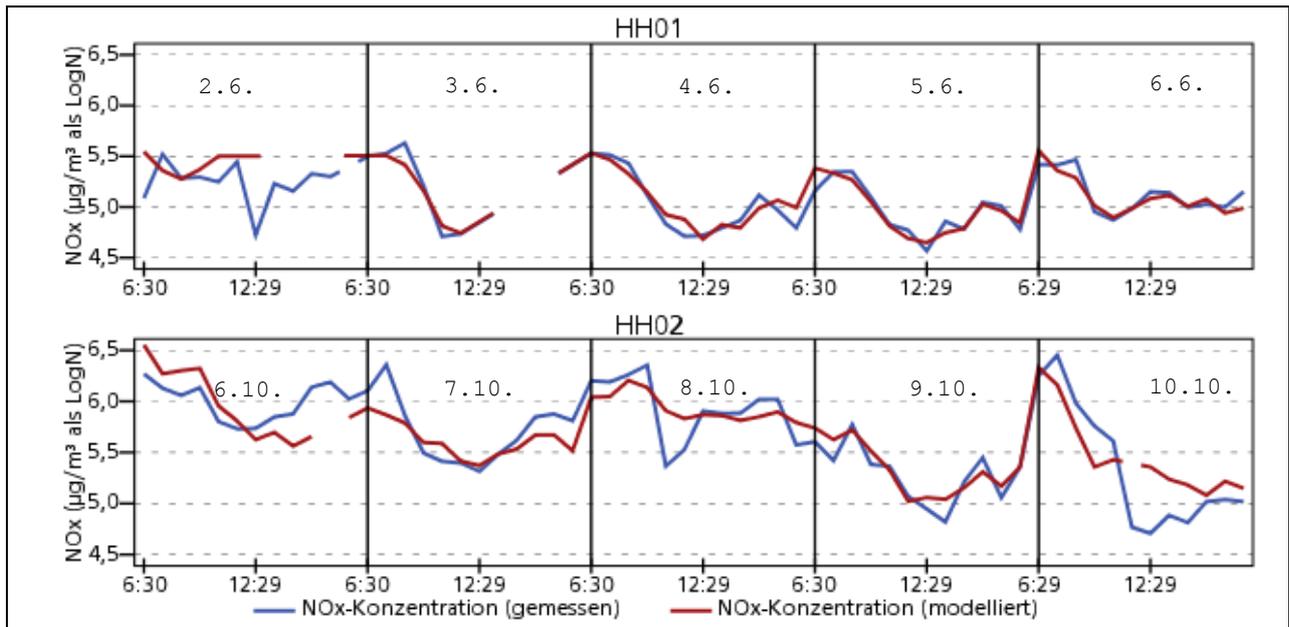


Abbildung 141: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der niederfrequenten NO_x-Konzentration im Testfeld Hamburg (getrennt nach Messwochen HH01 und HH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

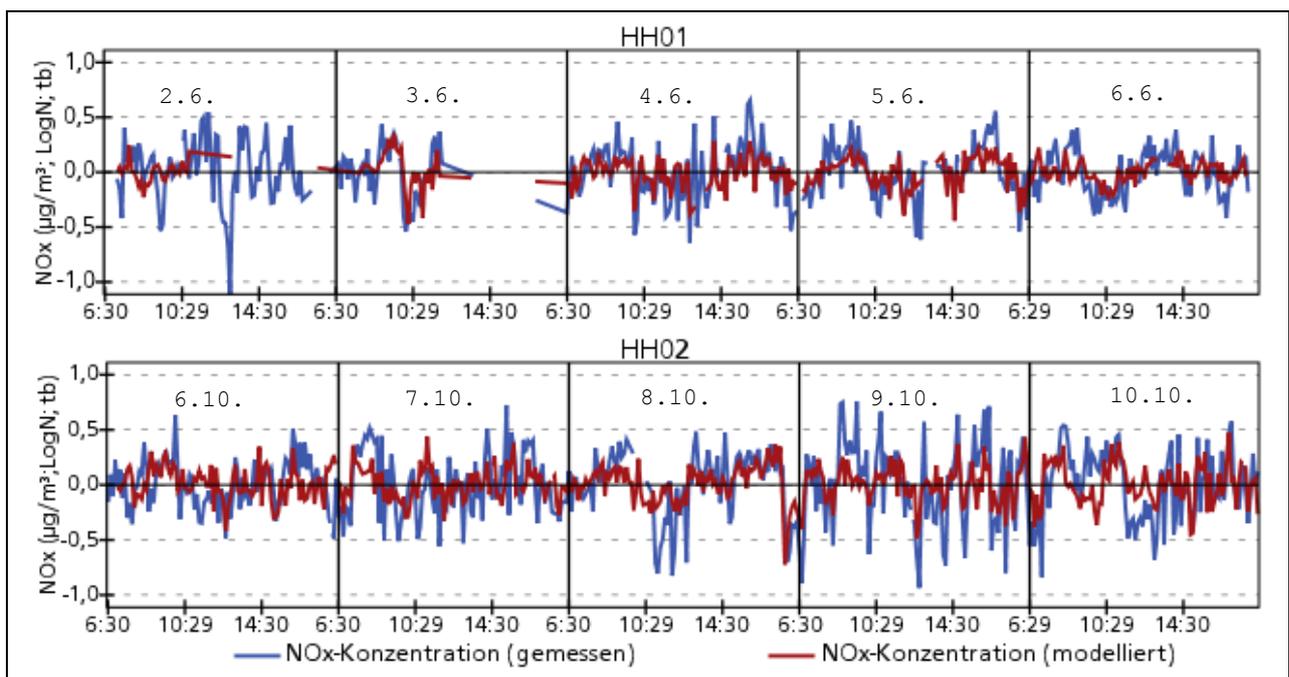


Abbildung 142: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der hochfrequenten NO_x-Konzentration im Testfeld Hamburg (getrennt nach Messwochen HH01 und HH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

Tabelle 58 zeigt die Prädiktoren im Erklärungsmodell und die Vorzeichen ihrer Koeffizienten. Sofern eine Prädiktorengröße in einer Messwoche keinen signifikanten Einfluss besitzt, wird das Vorzeichen nicht angegeben.

Prädiktorengröße	Vorzeichen des Regressionskoeffizienten	
	niederfrequent	hochfrequent
	HH01/HH02	HH01/HH02
Windgeschwindigkeit	-/-	-/-
Windrichtung Vektor		/-
Temperatur	/-	
Luftdruck	-/-	
Globalstrahlung	/+	
Ozon-Hintergrund	/-	
Verkehrsstärke SV	+/+	+/+
Anfahrten	+/+	+/+

Tabelle 82: Prädiktoren der NO_x-Modelle (95 %-Signifikanzniveau).

Die Windgeschwindigkeit zeigt in beiden NO_x-Modellen signifikante Wirkungen – höhere Windgeschwindigkeiten führen demnach zu niedrigeren Immissionen. Für das hochfrequente Modell zeigt sich allerdings in Bezug auf die Windrichtung ein auf den ersten Blick nicht plausibler Zusammenhang. Vermutlich führt jedoch die Gebäudegeometrie am Messort zu einer Wirbelbildung und trägt Schadstoffe „von hinten“ an das Messgerät heran.

Der Luftdruck und das Wasserdampf-Mischungsverhältnis, das neben der Luftfeuchte und der Temperatur auch vom Luftdruck abhängt, haben im niederfrequenten Modell einen erheblichen Erklärungsanteil. Die Kennzeichen der Regressionskoeffizienten dieser Kenngrößen weisen jedoch auf andere Wirkungszusammenhänge als in Bremerhaven hin. Grundsätzlich muss bei beiden Kenngrößen von indirekten Einflüssen auf die Immissionen ausgegangen werden. Sowohl der Luftdruck als auch das Wasserdampf-Mischungsverhältnis sind dabei als Indikatoren für die Gesamtwetterlage oder für den Luftmassenaustausch zu verstehen. Der Prädiktor Ozon-Hintergrundkonzentration hat ebenfalls einen signifikanten antiproportionalen Einfluss auf die modellierten NO_x-Werte. Gemäß den in 5.2.1.4 dargestellten Zusammenhängen ist dies plausibel. Im niederfrequenten Modell haben die Prädiktoren Temperatur und Globalstrahlung nur in der zweiten Messwoche einen signifikanten Erklärungsanteil. Eine möglicher Grund dafür ist, dass in der ersten Messwoche im Hochsommer die Wirkungen dieser Einflussfaktoren zu den Messzeiten zwischen 6:30 Uhr und 18:30 Uhr nicht oder nur eingeschränkt erkennbar sind: Die Temperatur ist bereits in den Morgenstunden höher als 10°C, so dass höhere Emissionen, beispielsweise durch Kaltstarts, deutlich reduziert sind. Der Sonnenaufgang fand im Juni 2008 gegen 5:00 Uhr statt, im Oktober erst gegen 7:30 Uhr [Gerding 2010]. Daher ist davon auszugehen, dass die Effekte der veränderten photochemischen Reaktionen infolge des Tag-Nacht-Wechsels in der ersten Messwoche nicht erfasst wurden.

Als verkehrsbezogene Kenngrößen haben die Schwerverkehrsstärke und die Anfahrvorgänge sowohl für das nieder- als auch für das hochfrequente Modell hohe Erklärungsanteile mit plausiblen positiven Vorzeichen der Regressionskoeffizienten.

Festgehalten werden kann, dass das niederfrequente NO_x-Erklärungsmodell wesentliche Anteile der Varianz der NO_x-Konzentration mit verhältnismäßig geringem Standardfehler

aufklärt. Die in den Modellen enthaltenen meteorologischen Prädiktoren und die Vorzeichen der Regressionskoeffizienten sind zum Großteil fachlich plausibel. Anhand der statistischen Kenngrößen und der graphischen Gegenüberstellung wird das Hamburger Modell als „gut“ bewertet.

Das hochfrequente Modell wird als „gut“ bewertet. Die Prädiktoren und die Vorzeichen ihrer Regressionskoeffizienten sind fachlich plausibel.

Erklärungsmodell für die gemessene PM₁₀-Konzentration

Tabelle 59 zeigt die übergreifenden Modellparameter des PM₁₀-Erklärungsmodells. Das niederfrequente Modell erklärt 80 % der Varianz der PM₁₀-Konzentration. Der relative Standardfehler, bezogen auf die mittlere gemessene Immissionskonzentration, liegt bei etwa 10 bis 20 % (Tabelle 59).

Das hochfrequente Modell erklärt in der zweiten Messwoche etwa 50 % der Varianz der hochfrequenten Komponente der PM₁₀-Konzentration. Der relative Standardfehler, bezogen auf die doppelte Standardabweichung der trendbereinigten Immissionskonzentration, liegt hier unter 20 %. Die erste Messwoche hat mit einer Varianzaufklärung von nur 20 % und einem Standardfehler von knapp 50 % eine deutlich schlechtere Modellgüte (Tabelle 59).

Modell	Bestimmtheitsmaß R ²	Relativer Standardfehler rSE
	HH01 / HH02	HH01 / HH02
Niederfrequent	0,80 / 0,80	10% / 12%
Hochfrequent	0,22 / 0,52	46% / 14%

Tabelle 83: Übergreifende Modellparameter der nieder- und hochfrequenten NO_x-Erklärungsmodelle.

Die graphische Gegenüberstellung (Abbildung 143) zeigt, dass zwar der Tagesmittelwert (verfahrensbedingt) vom Modell wiedergegeben wird, dass der Tagesgang und auch Maxima und Minima innerhalb eines Messtages jedoch nur selten korrekt abgebildet werden.

Die graphische Gegenüberstellung des hochfrequenten Modells (Abbildung 143) bestätigt die schlechten statistischen Kennwerte zur Modellgüte der ersten Messwoche. Weder die absoluten Werte noch die relativen Verläufe der Ganglinien zeigen erkennbare Übereinstimmungen. Für die zweite Messwoche hingegen ist hingegen an allen Tagen eine hohe Übereinstimmung der relativen Verläufe erkennbar, jedoch mit einer teils deutlichen Unterschätzung der absoluten Werte.

Tabelle 60 zeigt die Prädiktoren in den Erklärungsmodellen und die Vorzeichen ihrer Regressionskoeffizienten. Sofern eine Prädiktorkenngröße in einer Messwoche keinen signifikanten Einfluss besitzt, wird das Vorzeichen nicht angegeben.

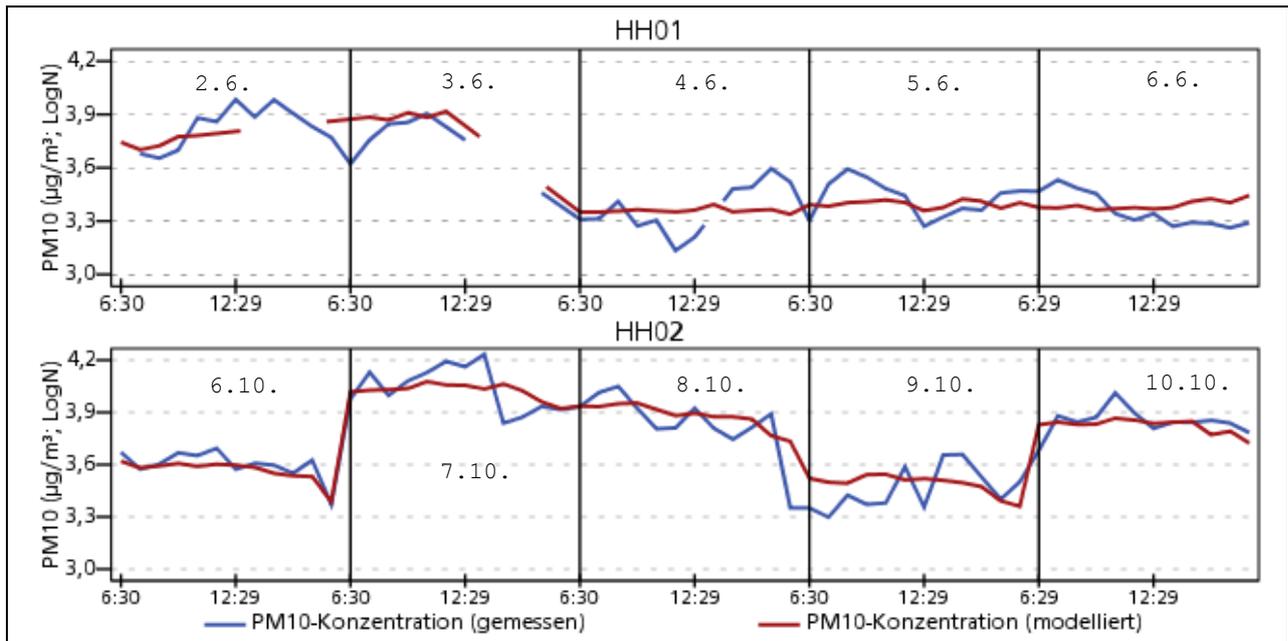


Abbildung 143: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der niederfrequenten PM_{10} -Konzentration im Testfeld Hamburg (getrennt nach Messwochen HH01 und HH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

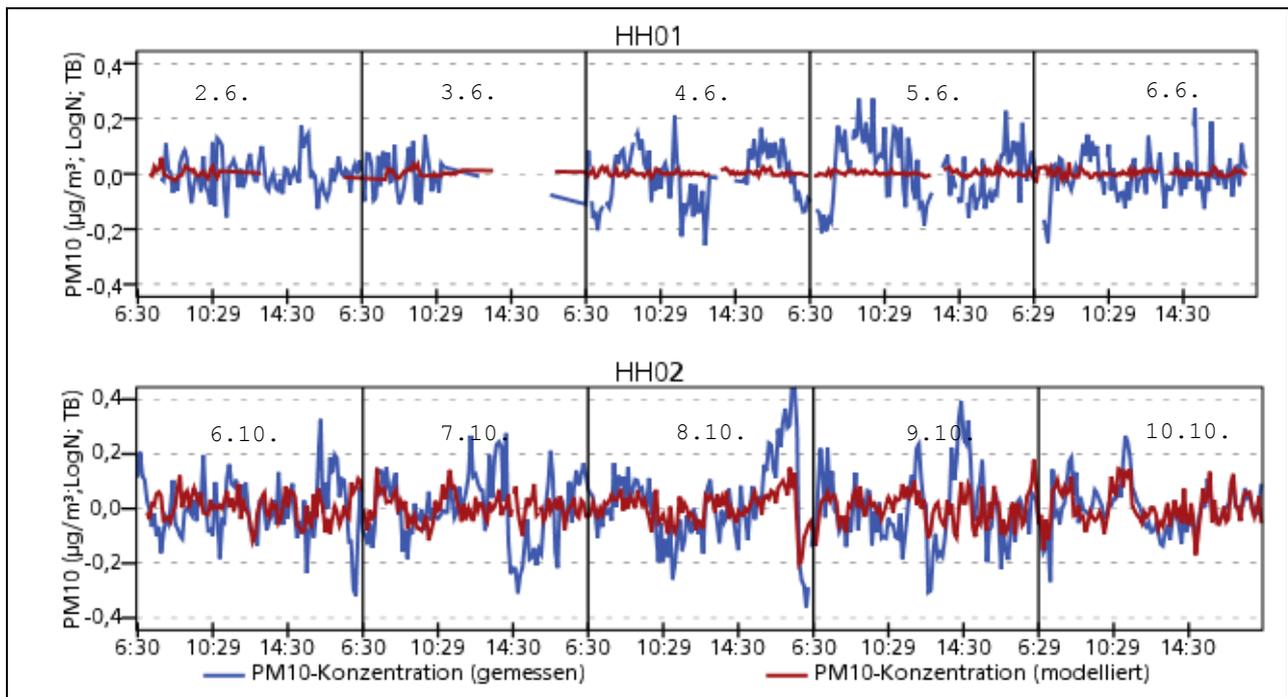


Abbildung 144: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der hochfrequenten PM_{10} -Konzentration im Testfeld Hamburg (getrennt nach Messwochen HH01 und HH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

Die lokalen windbezogenen Kenngrößen haben eine hohe Relevanz für die Modellierung der PM_{10} -Konzentration. Die Windgeschwindigkeit geht signifikant in das hochfrequente Modell und die Windrichtung in die zweite Messwoche des hoch- und niederfrequenten Modells ein. Der Grund hierfür ist vermutlich die aufgrund technischer Probleme reduzierte Datenqualität

windbezogener Kenngrößen in der ersten Messwoche. Das negative Vorzeichen der Windrichtung wird wie bei NO_x-Modell auf mikroskalige, durch die Straßenschlucht bedingte Wirbel zurückgeführt.

Prädiktorkenngröße	Vorzeichen der Regressionskoeffizienten	
	niederfrequent	hochfrequent
	HH01/HH02	HH01/HH02
Windgeschwindigkeit		-/-
Windrichtung Vektor	/-	/-
Luftdruck	-/-	
PM10-Hintergrund	+/+	
Durchfahrten SV	/+	
Durchfahrten		/+

Tabelle 84: Prädiktoren der PM₁₀-Modelle (95 %-Signifikanzniveau).

Der Luftdruck leistet einen signifikanten Beitrag zur Varianzaufklärung. Das negative Vorzeichen im Hamburger Modell wird auf die im Rahmen der Bewertung der NO_x-Modelle diskutierten indirekten Effekte zurückgeführt. Zudem trägt die PM₁₀-Hintergrundbelastung erheblich zur Aufklärung der PM₁₀-Varianz mit einem plausiblen positiven Vorzeichen bei.

Das niederfrequente PM₁₀-Modell enthält die SV-Durchfahrten als Prädiktor. Dies erscheint insofern plausibel, als dass die Turbulenzen durch vorbeifahrende große Fahrzeuge zur Aufwirbelung vorhandener grober Partikel führen. An dem hochbelasteten Knotenpunkt Habichtstraße mit einer häufig niedrigen Qualität des Verkehrsablaufs kann davon ausgegangen werden, dass ein hohes Potenzial an aufzuwirbelndem Material (Reifen-, Bremsabrieb) vorhanden ist. Der Grund für die niedrige Signifikanz der SV-Durchfahrten in der ersten Messwoche kann allerdings nur vermutet werden: So wurden die Messungen am zweiten Messtag wegen Sturmwarnung und anschließendem Starkregen abgebrochen. Dieses Witterungsereignis hat vermutlich dazu geführt, dass die vorhandene Staubladung der Straße an den darauffolgenden Tagen deutlich reduziert war.

Im hochfrequenten Modell ist die Kenngröße Durchfahrten für den verkehrlichen Erklärungsbeitrag verantwortlich. Die für das niederfrequente Modell geschilderten Zusammenhänge werden auch hier als gültig angesehen und die Aufnahme dieser Kenngröße als plausibel bewertet.

Die Modellierungsgüte des niederfrequenten Erklärungsmodells wird aufgrund der statistischen Kenngrößen und der visuellen Prüfung als „befriedigend“ bewertet.

Die Modellierungsgüte des hochfrequenten Erklärungsmodells der zweiten Messwoche wird anhand der visuellen Prüfung als „gut“ bewertet. Das Modell der ersten Messwoche wird verworfen.

Erklärungsmodell für die gemessene PM_{2,5}-Konzentration

Tabelle 61 zeigt die übergreifenden Modellparameter der PM_{2,5}-Erklärungsmodelle. Das niederfrequente Modell erklärt in beiden Messwochen deutlich über 80 % der Varianz der PM_{2,5}-Konzentration. Der relative Standardfehler, bezogen auf die mittlere gemessene Immissionskonzentration, liegt in einer Größenordnung von 10 %. Analog zu den PM₁₀-Modellen erklärt das hochfrequente Modell in der zweiten Messwoche mehr als 50 % der Varianz der hochfrequenten Komponente der PM_{2,5}-Konzentration bei einem relativen Standardfehler von etwa 30 %. Eine Varianzaufklärung von knapp 20 % und ein Standardfehler von knapp 50 % zeigt für das hochfrequente Modell der ersten Messwoche eine deutlich schlechtere Modellgüte an.

Modell	Bestimmtheitsmaß R ²	Relativer Standardfehler rSE
	HH01 / HH02	HH01 / HH02
Niederfrequent	0,88 / 0,86	7% / 12%
Hochfrequent	0,19 / 0,52	47% / 35%

Tabelle 85: Übergreifende Modellparameter der nieder- und hochfrequenten PM_{2,5}-Erklärungsmodelle.

Die visuelle Prüfung des niederfrequenten PM_{2,5}-Erklärungsmodells (Abbildung 145) zeigt, dass der gemessene Tagesgang meist gut abgebildet wird, einzelne Schwankungen innerhalb eines Messtages analog zum PM₁₀-Modell jedoch nur selten korrekt wiedergegeben werden.

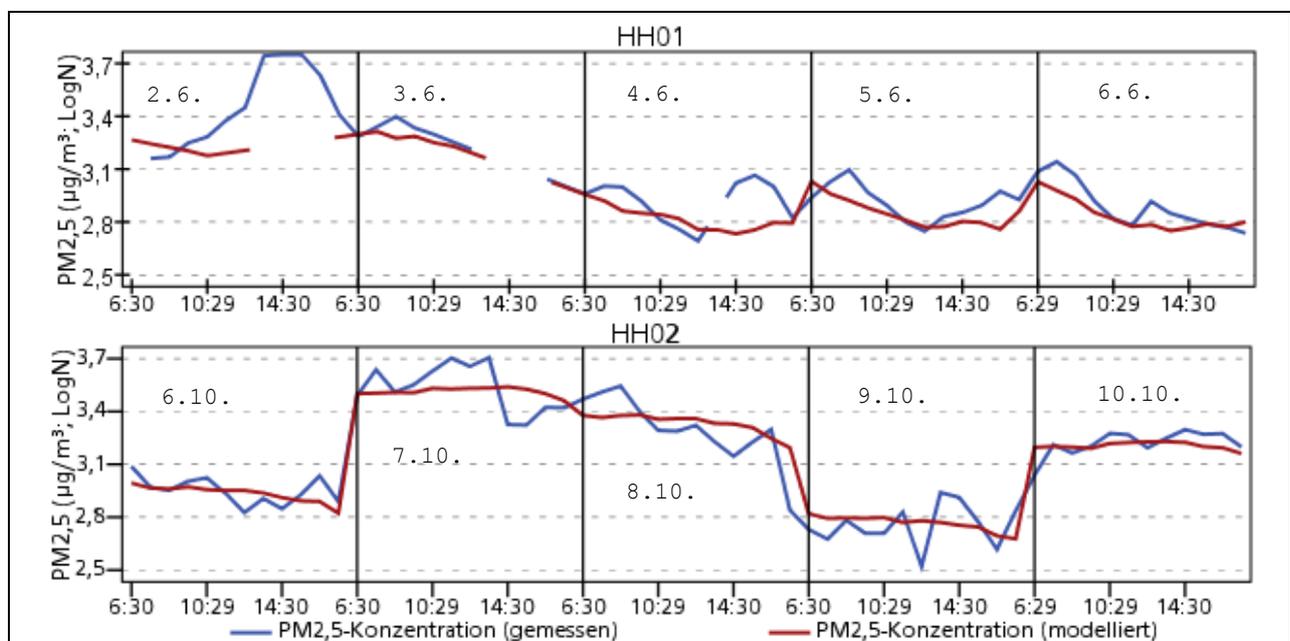


Abbildung 145: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der niederfrequenten PM_{2,5}-Konzentration im Testfeld Hamburg (getrennt nach Messwochen HH01 und HH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

Die graphische Gegenüberstellung des hochfrequenten Modells bestätigt die unbefriedigenden statistischen Kennwerte zur Modellgüte der ersten Messwoche. Weder die absoluten Werte noch die relativen Verläufe der Ganglinien zeigen erkennbare Übereinstimmungen. Für die zweite Messwoche ist eine deutliche Unterschätzung der absoluten Werte erkennbar, jedoch stimmen die relativen Verläufe an allen Tagen verhältnismäßig gut überein.

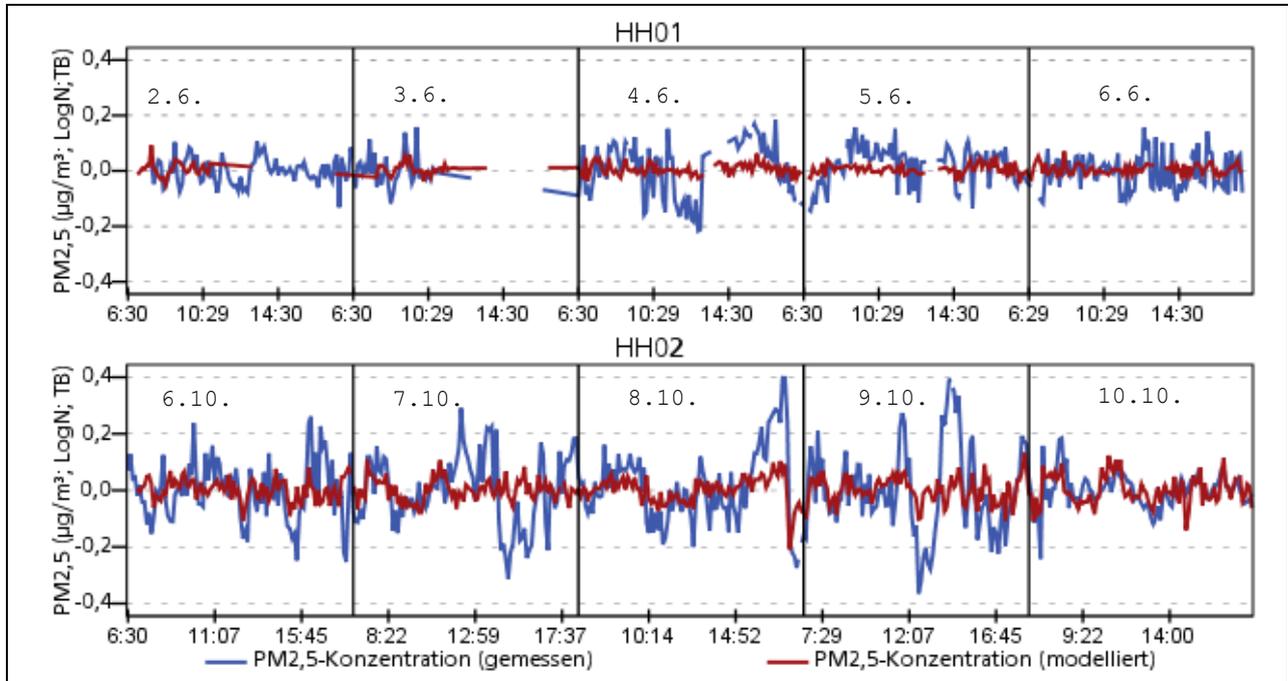


Abbildung 146: Gemessene (blau) und modellierte (rot) Zeitreihen der hochfrequenten PM_{2,5}-Konzentration im Testfeld Hamburg (getrennt nach Messwochen HH01 und HH02; senkrechte Linien trennen einzelne Messtage).

Tabelle 62 zeigt die Prädiktoren im Erklärungsmodell und die Vorzeichen der Koeffizienten. Sofern eine Prädiktorengröße in einer Messwoche keinen signifikanten Einfluss besitzt, wird das Vorzeichen nicht angegeben.

Prädiktorengröße	Vorzeichen der Regressionskoeffizienten	
	niederfrequent	hochfrequent
	HH01/HH02	HH01/HH02
Windgeschwindigkeit		-/-
Windrichtung Vektor		/-
Luftfeuchte	+/	
Luftdruck	-/-	
PM10-Hintergrund	+/+	
Verkehrsstärke SV	+/	+/+

Tabelle 86: Prädiktoren des PM_{2,5}-Modells im Testfeld Hamburg (95 %-Signifikanzniveau).

Analog zum PM10-Modell haben Windrichtung und Windgeschwindigkeit nur im hochfrequenten Modell ein signifikantes Gewicht.

Die Luftfeuchte weist im niederfrequenten Modell eine signifikante Varianzaufklärung auf. Eine höhere Luftfeuchte führt zu höheren (modellierten) Immissionen. Dieser Zusammenhang ist allerdings nicht zwingend auf Kausalbeziehungen zurückzuführen (vgl. 5.2.1.4).

Wie auch in den niederfrequenten NO_x - und PM_{10} -Modellen leistet der Luftdruck auch für die $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration einen signifikanten Beitrag zur Varianzaufklärung. Aufgrund der hohen Varianz dieser Kenngröße und mehrerer Inversionswetterlagen in den Messzeiträumen ist dies plausibel. Die PM_{10} -Hintergrundbelastung trägt mit einem plausiblen positiven Vorzeichen erheblich zur Aufklärung der $\text{PM}_{2,5}$ -Varianz bei.

Im niederfrequenten Modell ist der Prädiktor Schwerverkehrsstärke in der ersten Messwoche hochsignifikant und in der zweiten Messwoche knapp unterhalb der Signifikanzgrenze. Im Vergleich zum PM_{10} -Modell ist die Aufnahme der Schwerverkehrsstärke im Gegensatz zu den Durchfahrten plausibel, da der Anteil der emittierten (primären) motorbedingten Partikel an der $\text{PM}_{2,5}$ -Massenkonzentration größer ist als an der PM_{10} -Massenkonzentration. Das hochfrequente $\text{PM}_{2,5}$ -Modell verwendet ebenfalls die SV-Verkehrsstärke und ist damit konsistent zum niederfrequenten Modell.

Festgehalten werden kann, dass die Prädiktorenauswahl des niederfrequenten $\text{PM}_{2,5}$ -Erklärungsmodelle plausibel ist. Die Modellierungsgüte wird als „befriedigend“ bis „gut“ bewertet.

Die reduzierte Qualität der windbezogenen Kenngrößen in der ersten Messwoche wirkt sich auch beim hochfrequenten $\text{PM}_{2,5}$ -Modell erheblich auf die Gesamtmodellgüte aus – das entsprechende Modell der ersten Messwoche wird verworfen. Die Modellgüte der hochfrequenten Modells der zweiten Messwoche wird als „gut“ bewertet.

Erklärungsmodell für die gemessene $\text{PM}_{10-2,5}$ -Konzentration

Für die $\text{PM}_{10-2,5}$ -Erklärungsmodelle wurden keine signifikanten verkehrlichen Prädiktoren identifiziert und daher auch keine Modelle entwickelt.

9.5.3.4 Quantifizieren des Wirkungspotenzials der adaptiven Netzsteuerung für die Immissionen am Messquerschnitt

Maximales verkehrliches Reduktionspotenzial für die Immissionen am Messquerschnitt

Abbildung 147 zeigt die sich aus den lokalen Immissionsmodellen ergebenden verkehrsbezogenen Erklärungsanteile bzw. maximal möglichen Reduktionspotenziale als relative Anteile zur mittleren gemessenen Immissionskonzentration während der Messzeiträume. Die Erklärungsanteile sind differenziert nach den Anteilen die sich aus dem hochfrequenten und dem niederfrequenten Modell ergeben. Die Ermittlung der maximalen Reduktionspotenziale ist 5.2.6.4 näher beschrieben.

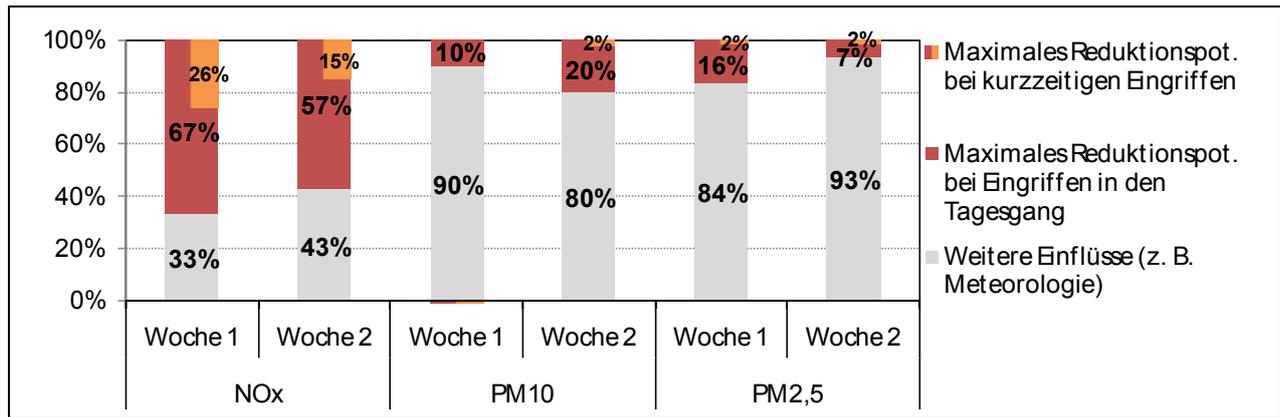


Abbildung 147: Maximale verkehrsbezogene Reduktionspotenziale im Testfeld Hamburg, relativ zur mittleren gemessenen Immissionskonzentration.

Für die NO_x-Konzentration ergibt sich ein erheblicher Erklärungsanteil aus den Kenngrößen Schwerverkehrsstärke und Anzahl der Anfahrvorgänge. Bezogen auf den hochfrequenten Ansatz, d. h. für Eingriffe in einzelne Umläufe, können einzelne Immissionsspitzen deutlich reduziert oder gänzlich vermieden werden. Im Mittel können hierbei Reduktionen in einer Größenordnung von etwa 10 % bis 20 % der NO_x-Gesamtkonzentration erzielt werden. Bezogen auf den niederfrequenten Ansatz, d. h. bei Eingriffen in den Tagesgang, erscheint zu verkehrlich hochbelasteten Zeiten sogar eine Reduktion um etwa 60 % möglich. In Bezug auf die LSA-Steuerung ist die Minimierung der Anfahrvorgänge durch eine verbesserte Koordinierung als maßgebend anzusehen. Mittels Pfortnerung kann zwar auch die Schwerverkehrsstärke reduziert werden; diese Maßnahme wirkt jedoch primär auf die Gesamtverkehrsstärke, so dass die positiven Effekte einer geringfügigen Reduzierung der Schwerverkehrsstärke von den negativen Effekten der Pfortnerung mehr als kompensiert werden.

Die Reduktionspotenziale für die Partikelbelastung liegen bei kurzzeitigen Eingriffen deutlich unter 5 % der Gesamtkonzentration. Vor dem Hintergrund der physikalisch-chemischen Eigenschaften der Partikelmassenkonzentration (vgl. 5.2.1.2) ist dies plausibel. Die mittelfristigen Reduktionspotenziale bei Eingriffen in den Tagesgang liegen für die verschiedenen Partikelmodelle bei 5 % bis etwa 15 %. In Bezug auf die LSA-Steuerung ergibt sich, zumindest gemäß dem empirischen Modell für die PM₁₀-Konzentration, ein wesentlicher Zielkonflikt: Nach dem PM₁₀-Modell müssten Durchfahrten des Schwerverkehrs vermieden werden, was gegen eine gute Koordinierung eines Straßenzugs spricht. Vor einer etwaigen Implementierung dieses Sachverhalts in einem Verkehrssteuerungsalgorithmus sollte eine weitere intensive Prüfung durchgeführt werden. Denn möglicherweise führt eine gute Koordinierung mit wenigen Kupplungs- und Bremsvorgängen zu einer niedrigeren Staubladung einer Knotenpunktzufahrt, so dass für durchfahrende Lkw nur ein geringes Staubaufwirbelungspotenzial vorhanden ist. In Bezug auf die PM_{2,5}-Konzentration ist die Schwerverkehrsstärke der einzige verkehrsbezogene Prädiktor im hoch- und niederfrequenten Modell. Wie bereits bei der Diskussion der NO_x-Reduktionspotenziale erwähnt, wird die LSA-Steuerung nicht als geeignetes Werkzeug zur Beeinflussung dieser Kenngröße gesehen.

Tatsächlich realisierte immissionsbezogene Wirkungen der verschiedenen Steuerungsverfahren

Das tatsächliche Reduktionspotenzial der verschiedenen Steuerungsverfahren am Messquerschnitt, ohne dass in der Steuerung konkrete Umweltziele bzw. zu optimierende Hot Spots definiert wurden, ist nachfolgend dargestellt:

Zunächst wurde eine Clusterung der Verkehrsnachfrage am Messquerschnitt vorgenommen. Analog zur netzbezogenen Clusterung wird die Nachfrage in 7 Cluster aufgeteilt. Allerdings wurden die Nachfragecluster unter Berücksichtigung der Pkw-Verkehrsstärke *und* Schwerverkehrsstärke ermittelt, da die bisherigen Untersuchungen die dominante Rolle des Schwerverkehrs für die gemessenen Immissionen bestätigen.

Im Zuge der vorangegangenen Untersuchungen wurde die Anzahl der Anfahrvorgänge am Messquerschnitt als relevant für die lokale Immissionsbelastung und vor allem durch die LSA-Steuerung beeinflussbar identifiziert. Folglich wurden die ermittelten Verkehrsstärke- und Schwerverkehrsstärke-Cluster hinsichtlich dieser Kenngröße ausgewertet. Bei einer nach Steuerungsverfahren differenzierten Gegenüberstellung einander entsprechender Nachfragecluster ergibt sich für die mittlere Anzahl der Anfahrvorgänge Darstellung in Tabelle 87 (Mittelwert gewichtet nach Anzahl der Situationen in den einzelnen Clustern). Detaillierte Informationen zu den Anfahrvorgängen in den einzelnen Clustern können dem Anhang entnommen werden.

	Relative Veränderung der Anfahrvorgänge im Vergleich zu anderen Steuerungsverfahren		
	FZS (HH01/HH02)	LRS (HH01/HH02)	Balance (HH01/HH02)
FZS	-	-40 % / -33 %	-31 % / -29 %
LRS		-	+20 % / +6 %
Balance			-

Tabelle 87: Mittlere relative Veränderung der Anfahrvorgänge zu Schaltzeiten der einzelnen Steuerungsverfahren im Bereich der Umweltmessstelle (HH01: 1. Messwoche; HH02: 2. Messwoche).

Mittels Verknüpfung des NO_x-Immissions-Erklärungsmodells mit den festgestellten verkehrlichen Wirkungen kann die Immissionsreduktion der einzelnen Steuerungsverfahren abgeschätzt werden. Abbildung 148 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 Koordinierung“ am lokalen Umwelt-HotSpot, d. h. einem Verkehrsablauf (nahezu) ohne Halte in der untersuchten Zufahrt.

Die Wirkungen werden getrennt für beide Messwochen (HH01 bzw. HH02) und normiert für die lokale regelbasierte Steuerung (LRS) dargestellt.

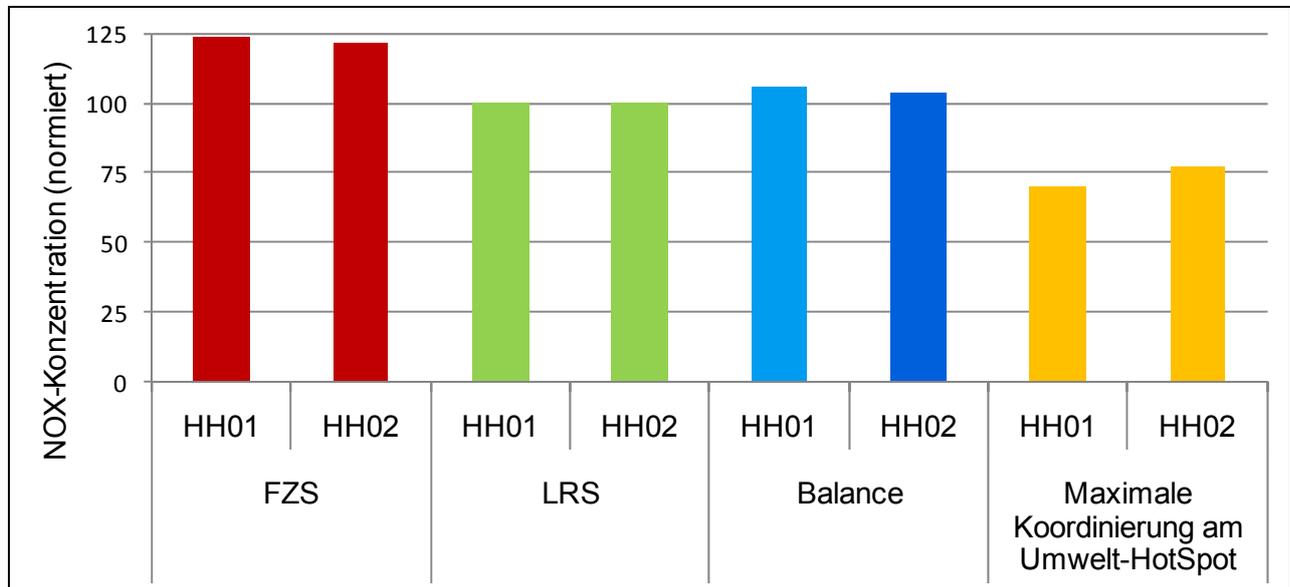


Abbildung 148: Immissionsbezogene Wirkungen der LSA-Steuerungsverfahren am Messquerschnitt Hamburg Habichtstraße, basierend auf Messungen vom 2.6. bis 6.6.2008 (Messwoche HH01) und vom 6.6. bis 10.6.2008 (Messwoche HH02).

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. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass eine LSA-Steuerung mit Fokus auf die Optimierung von Umweltkenngrößen gerade in diesen Zeiträumen zur Einhaltung von Luftqualitätsgrenzwerten und zur Minderung negativer gesundheitlicher Wirkungen beitragen kann.

9.5.3.5 Quantifizieren des Wirkungspotenzials der adaptiven Netzsteuerung für das gesamte Netz

Das (Umwelt-)Wirkungspotenzial der adaptiven Netzsteuerung im Testfeld Hamburg wird mit der kalibrierten Vissim-Mikrosimulation bewertet. Hierzu wurden für unterschiedliche Szenarios je 20 Simulationsläufe durchgeführt und die folgenden Kenngrößen netzbezogen ausgewertet:

- motorbedingte Partikelemissionen,
- Stickoxidemissionen,
- Kraftstoffverbrauch und
- CO₂-Ausstoß.

Im Testfeld Hamburg wurden die Szenarios

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

Die Kenngrößenmittelwerte der 20 Simulationsläufe wurden anhand der Summe aus ausgefahrenen und bei Simulationsende im Netz verbliebenen Fahrzeuge gewichtet. Die folgenden Grafiken stellen die gewichteten Mittelwerte der verschiedenen Kenngrößen für die Steuerungsszenarios FZS, LRS, Bal-Jun-GA und Bal-Okt-GA dar. Die Ergebnisse der Balance-Steuerung mit Hill-Climbing Algorithmus liegen in der gleichen Größenordnung wie die Festzeitsteuerung und werden der Übersicht halber nicht im Diagramm dargestellt.

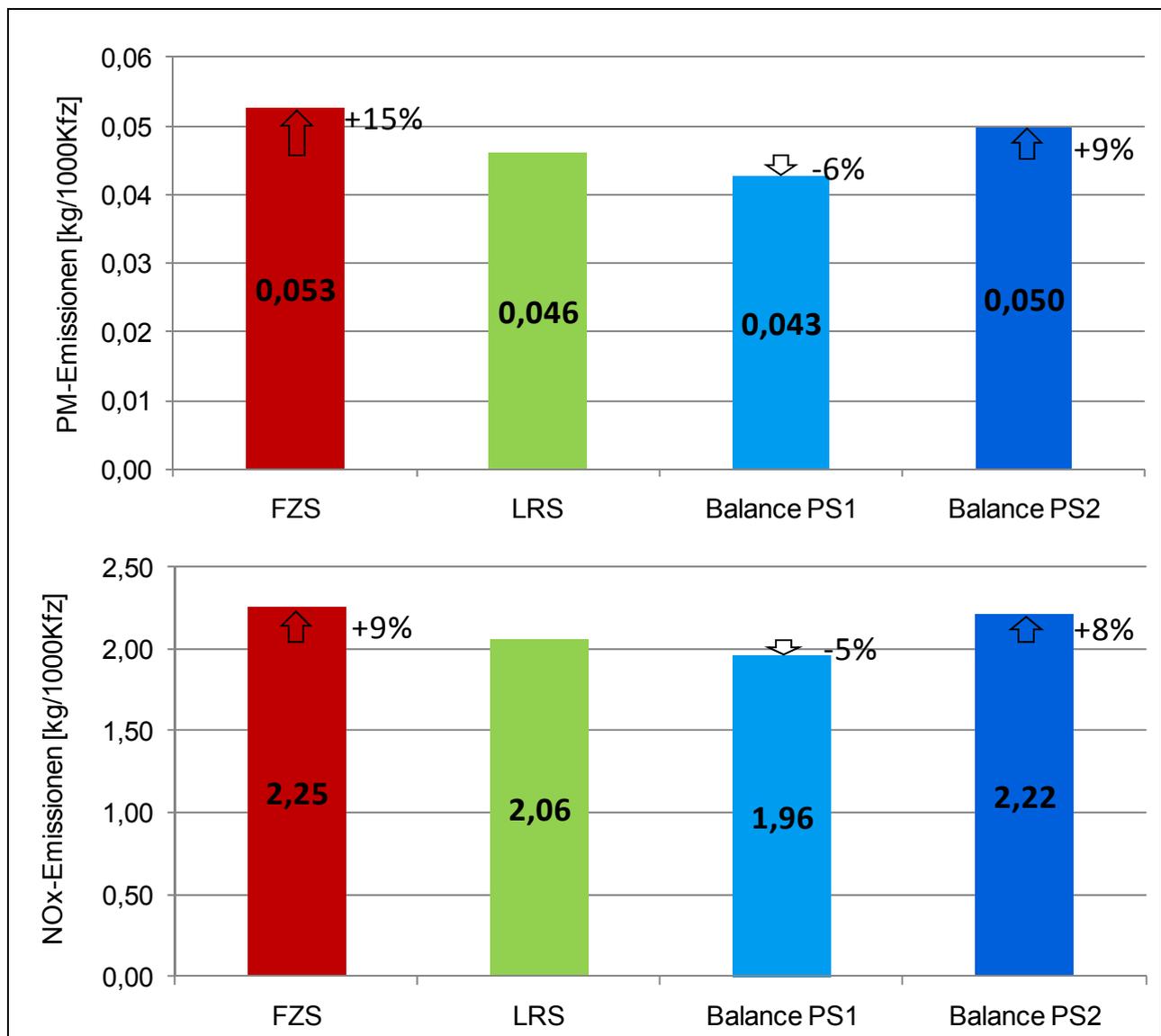


Abbildung 149: Netzbezogene PM- und NO_x-Emissionen der untersuchten LSA-Steuerungsverfahren im Vergleich (LRS=100 %).

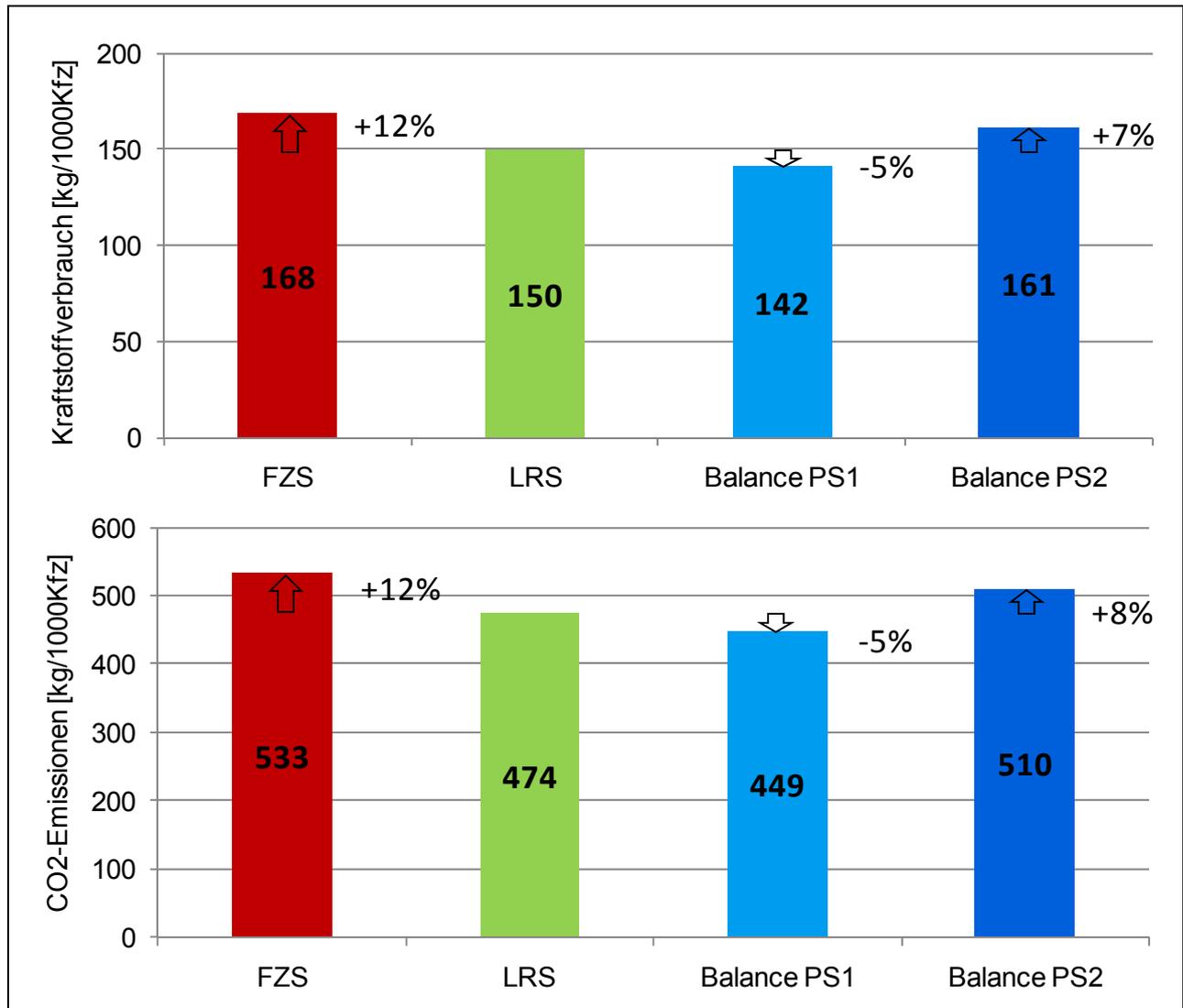


Abbildung 150: Netzbezogene PM- und NO_x-Emissionen der untersuchten LSA-Steuerungsverfahren im Vergleich (LRS=100 %).

Die Netzauswertung zeigt, dass die modellbasierte Steuerung mit dem Parametersatz 1 die Emissionen im Vergleich zur regelbasierten Steuerung unabhängig vom betrachteten Schadstoff reduzieren kann. Darüber hinaus wird aber auch hier die Relevanz der Parametrierung deutlich – die auf Grundlage der mit dem zweiten Parametersatz ermittelten Emissionen liegen in einer Größenordnung mit der Festzeitsteuerung.

10 Virtuelles Testfeld

10.1 Verkehrsangebot

10.1.1 Merkmale des Verkehrsnetzes

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 Szenarien (Abbildung 151) umgesetzt werden:

- Netz 1: Linienzug: 5 Knotenpunkte, Knotenpunktsabstand variiert
- Netz 2: kreuzende Linienzüge: 7 Knotenpunkte
- Netz 3: Netzmasche: 8 Knotenpunkte

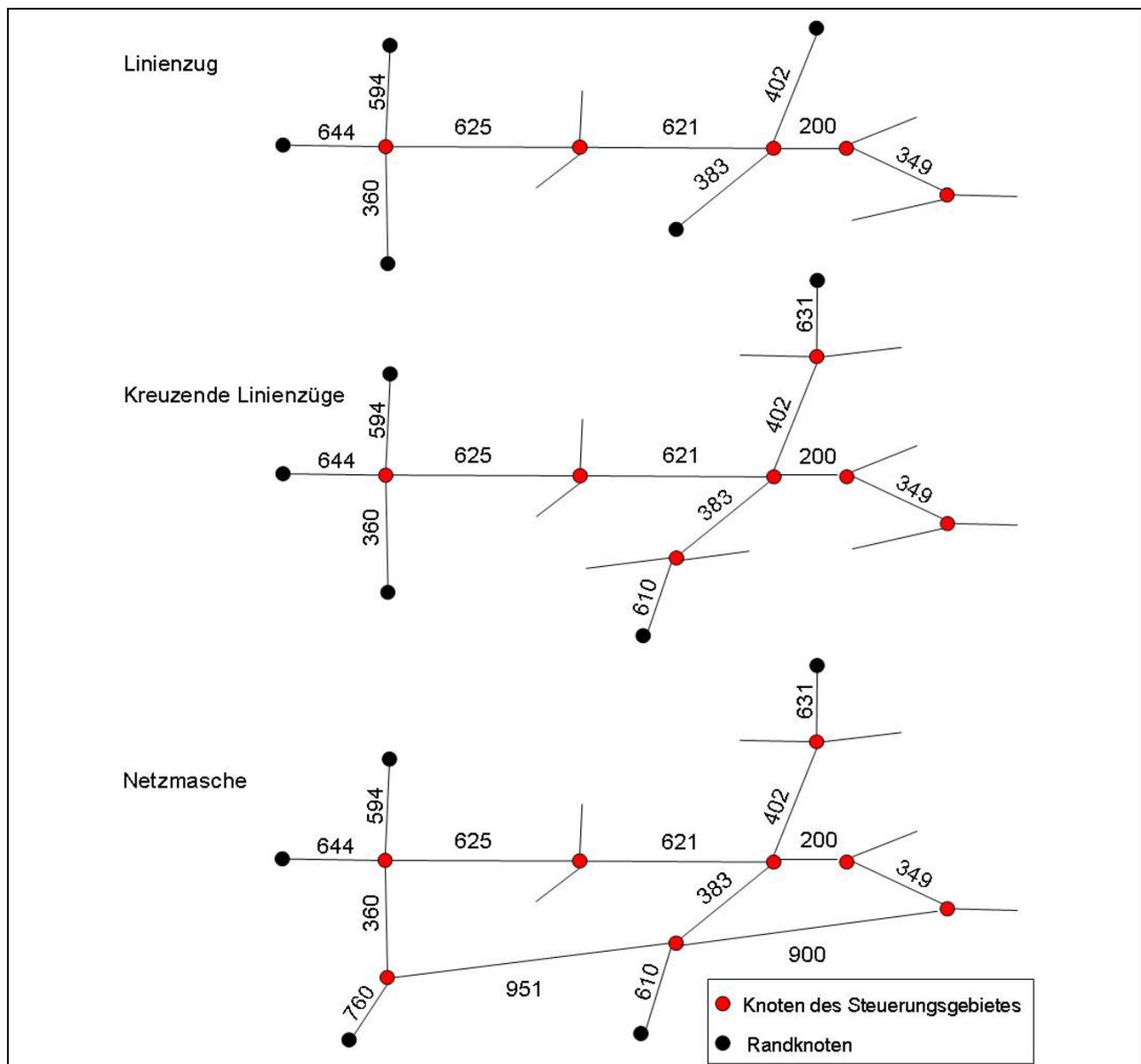


Abbildung 151: Netz des Virtuellen Testfeldes mit Angabe der Streckenlängen in Metern.

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.

Die Netzstrukturen bauen aufeinander auf, so dass für die Simulation immer das größte Netz simuliert werden kann und nur die Auswertung beziehungsweise die Steuerung an das aktuelle Szenario angepasst werden muss. Des Weiteren wurden für die Netze 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
- Abbiegestreifen für Linksabbieger

10.1.2 Verkehrssteuerung

Im virtuellen Testfeld sollen die beiden modellbasierten Netzsteuerungsverfahren BALANCE und MOTION sowie die Steuerungsvarianten Festzeit (FZS) und lokal regelbasierte Steuerung (LRS) zum Einsatz kommen. Mit Ausnahme der Festzeitsteuerung können alle Steuerungsvarianten wahlweise mit und ohne ÖV-Beschleunigung für die im Netz vorhandenen Buslinien (Abbildung 157) betrieben werden.

Um praxisrelevante Szenarien zu schaffen, wird die LRS bewusst einfach und robust gehalten. Bei der Erstellung der entsprechenden Versorgung erfolgte eine Beratung und Unterstützung durch einen praxiserfahrenen Mitarbeiter der TRANSVER GmbH. Die Versorgung der modellbasierten Steuerungen erfolgte mit Unterstützung der jeweiligen Hersteller.

Insgesamt sollten im virtuellen Testfeld folgende Steuerungsvarianten untersucht werden:

- Festzeitsteuerung
- Lokal regelbasierte Steuerung (messwertbasiert)
- BALANCE mit lokaler regelbasierter Steuerung
- MOTION mit lokaler regelbasierter Steuerung
- BALANCE (nur Rahmensignalpläne)
- MOTION (nur Rahmensignalpläne)
- BALANCE (spezielle Umweltparametrierung)
- MOTION (spezielle Umweltparametrierung)

Aus den in Abschnitt 10.1.1 genannten Gründen konnten im Rahmen von AMONES nicht mehr alle geplanten Steuerungsszenarien untersucht werden. Erste Ergebnisse liegen für die Steuerungsvarianten FZS, LRS und BALANCE (mit LRS) vor.

10.1.2.1 Festzeitsteuerung (FZS)

Für die Festzeitsteuerungen werden für jeden Knotenpunkte in jedem Nachfrageszenario vier Tagesprogramme mit unterschiedlichen Umlaufzeiten erstellt (SchwachVerkehrsZeit60; Morgenspitze90; NebenVerkehrsZeit70; Abendspitze80). Die Signalprogramme sind 4- (Kreuzung) bzw. 3-phasig (Einmündung). Sie werden mittels des Ingenieurarbeitsplatzes SITRAFFIC Office berechnet. Es wird eine sättigungsgradbezogene Berechnung nach HBS [2001] verwendet, wobei der maximale Sättigungsgrad für die Hauptrichtungen bei 0,85 und für die übrigen Verkehrsströme bei 0,90 liegt. Die Koordinierung erfolgt für 4 Linienzüge jeweils auf das Freigabezeitende (Abbildung 152). Die Linienzüge werden hierfür nacheinander optimiert. Als Kriterium dient die Anzahl der Viertelstundenintervalle mit maximaler Belastung einer Teilstrecke im Netz. Optimiert wird dabei immer die Richtung mit der höheren Belastung. Signalpläne, die bereits für einen Linienzug optimiert wurden, werden für die Optimierung weiterer Linienzüge im Versatz nicht geändert.

Die Randknotenpunkte laufen für jedes Szenario der Verkehrssteuerung in tageszeitabhängigen Festzeitprogrammen.

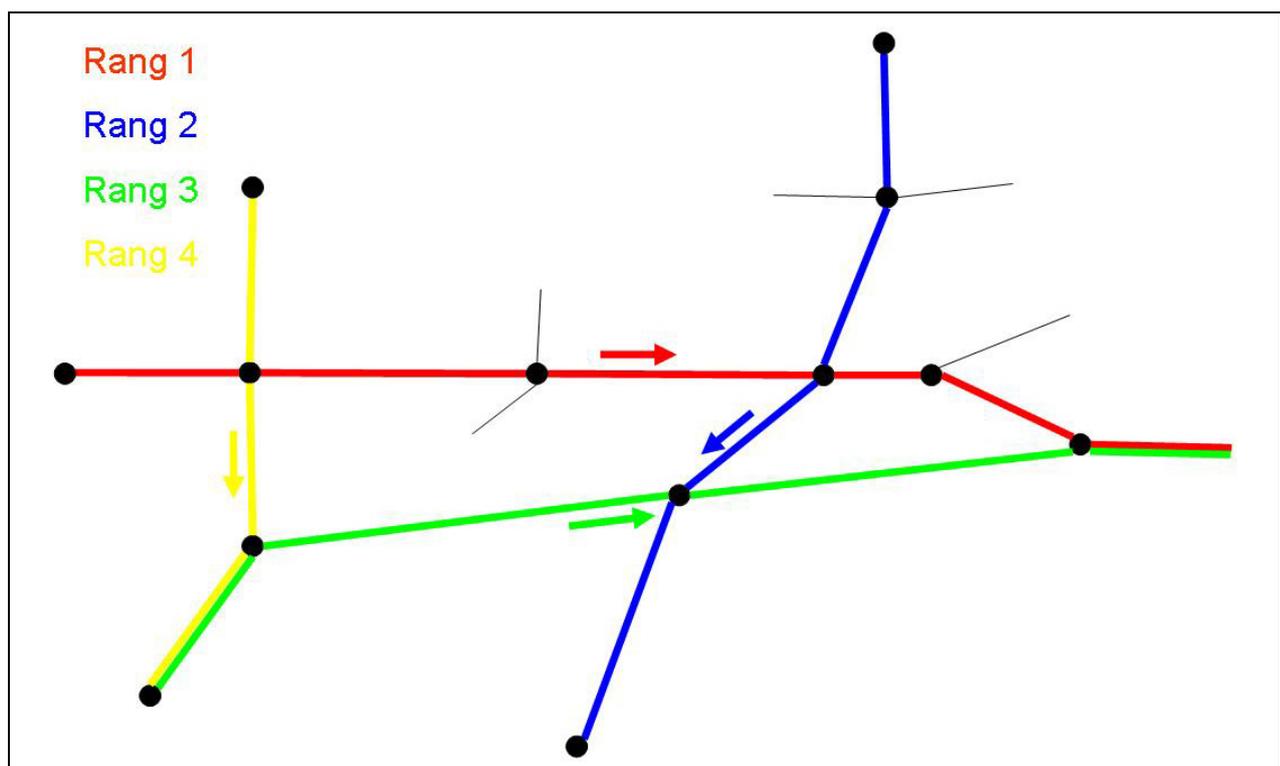


Abbildung 152: Beispiel für die Hierarchie der Linienzüge für die Grundnachfrage im Signalprogramm der Morgenspitze.

10.1.2.2 Lokal regelbasierte Steuerung (LRS)

Die koordinierten Festzeitprogramme bilden gleichzeitig die Rahmenpläne für die LRS. Die Umsetzung erfolgt regelbasiert. Um die LRS als Grundlage für die beiden Netzsteuerungen

BALANCE und Motion verwenden zu können, muss sie sowohl in SITRAFFIC Language (für MOTION) als auch in TRELAN (für BALANCE) umgesetzt werden. Die resultierende lokale Steuerung stimmt in den Umsetzungen in den beiden Sprachen überein.

Als Eingriffsmöglichkeit der lokalen Steuerung ist eine Freigabezeitzeitanpassung mittels einer Zeitlückensteuerung für jede Phase vorgesehen. 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. Mit eingeschalteter Netzsteuerung können die Phasen um einen Prozentwert von 70 früher abgebrochen werden. Die Werte werden für alle Knotenpunkte auf Empfehlung eines erfahrenen Versorgers angesetzt. Eine explizite Kalibrierung wurde nicht durchgeführt.

Phasentausch, Phasenforderung und Versatzzeitanpassung werden nicht vorgenommen.

An drei Knotenpunkten wird zusätzlich eine Beschleunigung des ÖPNV umgesetzt. Diese erfolgt ebenfalls über eine Freigabezeitzeitanpassung. 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 Dauerrahmen.

10.1.2.3 Netzsteuerung BALANCE

BALANCE erhält von den lokalen TRENDS-Steuerungen der einzelnen Knotenpunkte minütlich die aggregierten Messwerte der Detektoren übermittelt. In regelmäßigen Abständen (standardmäßig alle 5 Minuten) optimiert BALANCE auf Basis dieser Messwerte die Rahmensignalpläne für die einzelnen Knoten im Hinblick auf die eingestellte Zielfunktion. Nach Abschluss der Optimierung verschickt BALANCE als Ergebnis die neuen Rahmensignalpläne in Form von so genannten 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 (Abbildung 153). Sie geben damit die Rahmenbedingungen für die möglichen Freigabezeitzeitanpassungen der lokalen Steuerungen vor und beeinflussen indirekt auch die Versatzzeiten.

Eine Änderung der Phasenfolge sowie eine Neuberechnung der optimalen Umlaufzeit sind in BALANCE grundsätzlich ebenfalls möglich, werden jedoch im virtuellen Testfeld nicht eingesetzt. Hierfür müssten zunächst auch die lokalen Steuerungen entsprechend versorgt werden. Die Freigabezeitzeitanpassungen (innerhalb des Rahmensignalplans) und die Priorisierung des ÖPNV werden nicht auf Netzebene sondern lokal am Knoten gesteuert.

Für die im Rahmen von AMONES durchgeführten Simulationsszenarien im virtuellen Testfeld werden die Standardparameter von BALANCE gewählt:

Als Optimierungsalgorithmus kommt im virtuellen Testfeld aus Rechenzeitgründen bislang ausschließlich der Hill-Climbing-Algorithmus zum Einsatz. Die Optimierung erfolgt jeweils alle 5 Minuten.

10.1.2.4 Netzsteuerung Motion

Eine Optimierung unterteilt sich bei MOTION in drei Stufen.

In der ersten Stufe werden für alle erlaubten Umlaufzeiten und Phasenfolgen die günstigsten Freigabezeiten ermittelt. Da die Phasenfolgen durch die Festzeitsteuerung vorgegeben sind, erfolgt hier tatsächlich aber nur eine Ermittlung der günstigsten Freigabezeiten. Es wird dabei versucht das Verhältnis der Auslastung zur gewünschten Auslastung möglichst für alle Signalgruppen gleich groß zu halten. Als gewünschter Auslastungsgrad wird wie für die Berechnung der Festzeitsteuerung ein Wert von 85 Prozent für die Hauptrichtungen und 90 Prozent für die Nebenrichtungen und Linksabbieger gewählt.

In der zweiten Stufe wird die System-Umlaufzeit für das Regelgebiet bestimmt. Für die Auswahl der Umlaufzeit wird für jede Umlaufzeit und Phasenfolge jeweils nur die Signalgruppe, deren Zielfunktionswert den höchsten Wert aufweist herangezogen. Falls die neue Umlaufzeit nicht der zuletzt geschalteten entspricht, wird anschließend geprüft, ob die aktuelle verkehrliche Situation einen Wechsel in die neue Umlaufzeit rechtfertigt, oder ob die bisherige Umlaufzeit beibehalten werden kann. Als Grenzwert ist hier eine 5 prozentige Änderung in der Zielfunktion festgelegt.

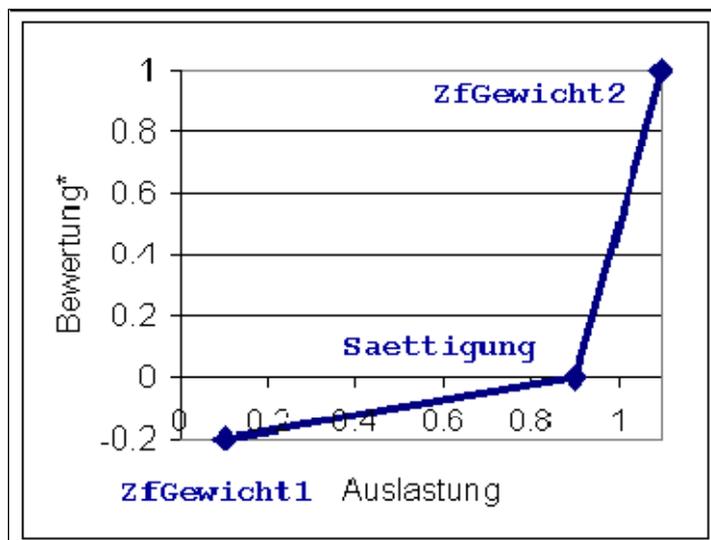


Abbildung 154: Parametrierte Zielfunktion für KFZ einer Signalgruppe der Nebenrichtung (Soll-Sättigung = 90 Prozent) [Siemens 2008].

Die Zeittückensteuerung im MOTION Modul werden in den lokalen verkehrsabhängigen Steuerungen in Abhängigkeit der berechneten Freigabezeiten der Phasen geschaltet. Ab wann

eine Phase früher abgebrochen werden kann wird über den sogenannten Vorziehungwert bestimmt.

Mit den Parametern *Vorziehungwert IV* und *Vorziehungwert OEV* wird eingestellt, um wie viel Prozent der verfügbaren Zeit die neue Phase vorgezogen werden soll. Das prozentuale Vorziehen einer Phase wird aus der verfügbaren Freigabezeit der aktuellen Phase errechnet. [Siemens 2008]

Der Vorziehungwert IV wurde mit 70 Prozent gewählt. Für die Beschleunigung des ÖPNV besteht ein Dauerrahmen.

Im dritten Schritt werden die Versatzzeiten zwischen den einzelnen Knotenpunkten optimiert. Als Verfahren zur Optimierung wird das deterministische Verfahren verwendet. Die Koordinierungsreihenfolge entspricht dem Netzaufbau. D.h. es wird zuerst der Linienzug in Ost-Westrichtung optimiert, anschließend der Linienzug in Nord-Südrichtung und abschließend wird eine Koordinierung für den letzten verbleibenden Knotenpunkt im Südwesten des Netzes vorgenommen. Optimiert wird über eine Gewichtung von Wartezeit und Halten.

Die Steuerungsgrößen Umlaufzeit, Versatzzeit, Phasenfolge und Freigabezeitverteilung werden als Rahmensignalpläne alle 15 Minuten an die Lichtsignalanlagen im Steuerungsgebiet versendet.

10.2 Verkehrsnachfrage

Aus den in Abschnitt 10.1.1 genannten Gründen konnte im Rahmen von AMONES lediglich das im Folgenden beschriebene Grundscenario betrachtet werden.

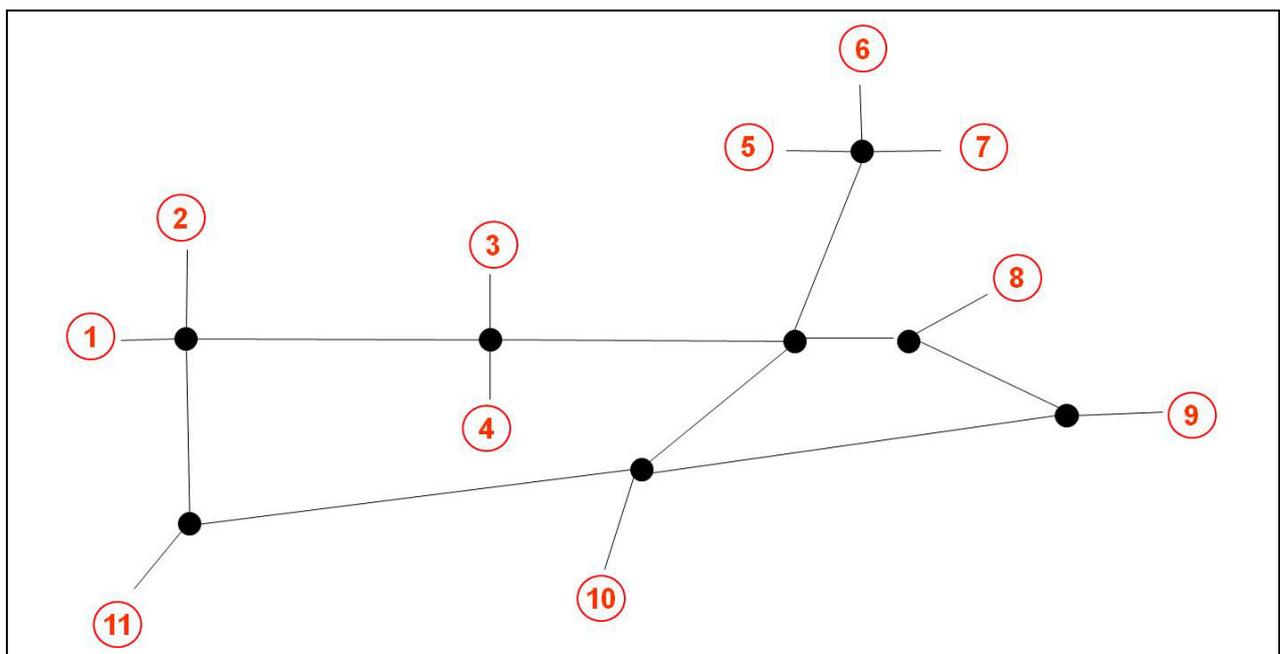


Abbildung 155: Übersicht über die Zufahrten des Gesamtnetzes.

Die untersuchten Szenarien entsprechen immer einem ganzen Tag. In der Verkehrsnachfrage des Grund szenarios, auf dem alle übrigen Szenarien der Verkehrsnachfrage aufbauen, wird in Anlehnung an reale Verkehrsnachfragen versucht, einen typischen Tagesverlauf mit nächtlicher Schwachverkehrszeit, Morgenspitze, einer Nebenverkehrszeit während des Tages und einer Abendspitze abzubilden.

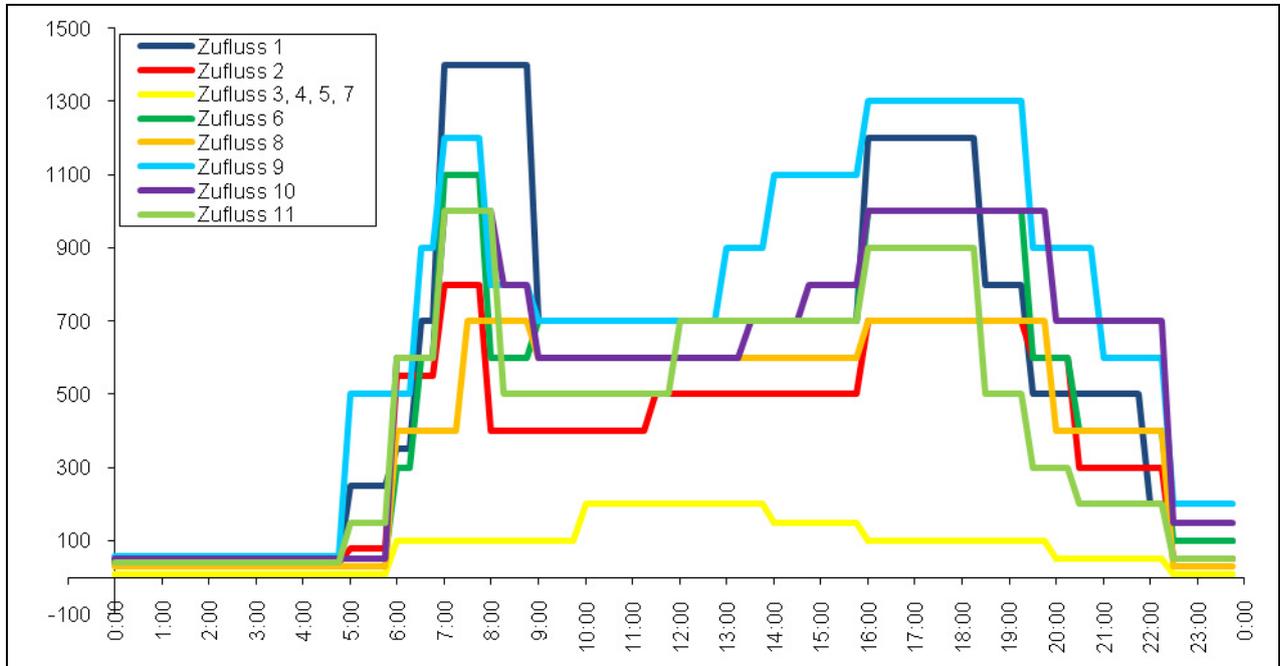


Abbildung 156: Zuflussganglinien im Grund szenario.

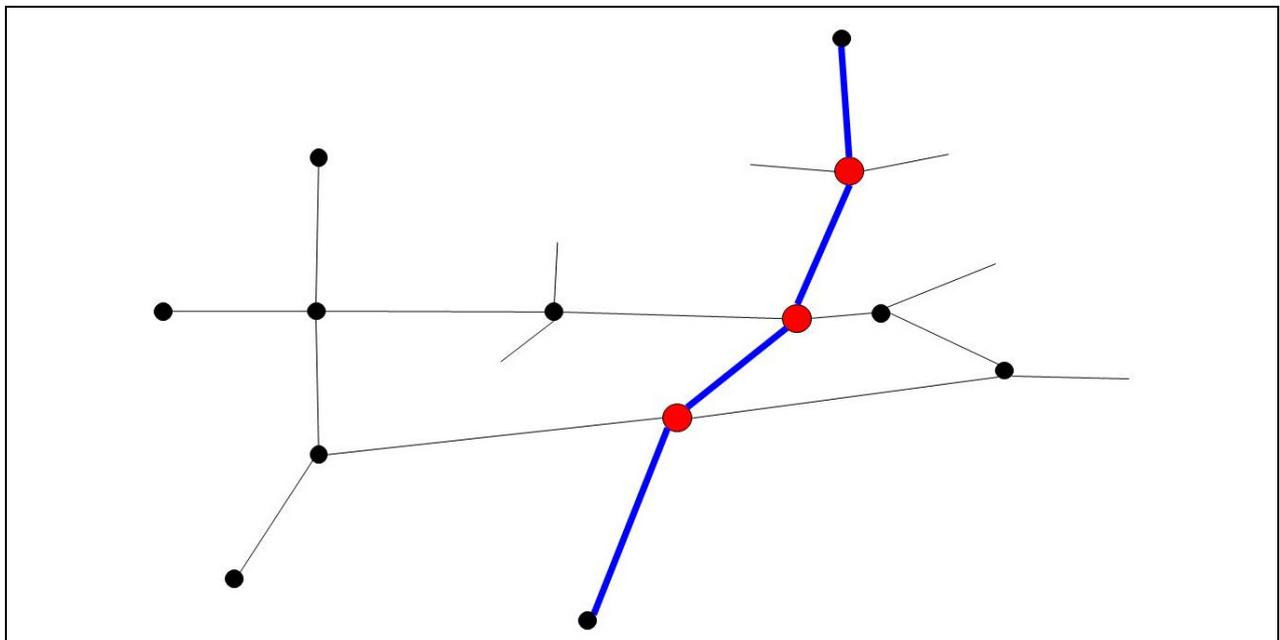


Abbildung 157: Verlauf der ÖV-Route und Knoten mit Beschleunigung des ÖPNV.

Die Hauptlast konzentriert sich im Gesamtnetz auf die Zufahrten 1, 6, 9 und 10 und somit auf die Routen 1-9 und 6-10. Für die kleineren Netze werden an den neu entstandenen Zufahrten,

die jeweiligen Streckenbelastungen aus dem Gesamtnetz als Zuflüsse definiert. Während die Zufahrten 8 und 11 noch etwas stärker belastet sind, handelt es sich bei den Zufahrten 3, 4, 5 und 7 um Anliegerstraßen aus den angrenzenden Gebieten.

Die Routenwahl ist über den Simulationszeitraum im Grundszenario unverändert. Der Schwerverkehrsanteil beträgt einheitlich für jede Zufahrt 5 Prozent. Fußgängerströme werden zwar in den Signalprogrammen berücksichtigt, aber nicht simuliert und bewertet.

Im Netz gibt es eine Buslinie des ÖPNV. Diese wird im Zeitraum von 6 Uhr bis 20 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.

10.3 Messszenarien

Innerhalb des virtuellen Testfeldes werden für alle vorhandenen Fahrbeziehungen Verlustzeitmessungen durchgeführt. Die Erhebungsquerschnitte liegen dabei hinter (Quelle) bzw. vor den Randknoten (Ziel), so dass durch die Randknoten bedingte Verlustzeiten nicht in die Auswertungen einfließen. Die einzelnen Verlustzeitmessungen werden aus Übersichtsgründen bei der Auswertung zu Routenklassen zusammengefasst:

- Zu den *Hauptrouuten* zählen die Routen 1-9, 9-1, 6-10, 10-6, 9-11 und 11-9.
- *Abbieger* sind Fahrzeuge, welche im Verlauf ihrer Route von einer der Hauptrouuten abbiegen.
- *Einbieger* sind Fahrzeuge, die im Verlauf ihrer Route in eine der Hauptrouuten einbiegen und dieser dann folgen.
- Alle anderen Fahrzeuge werden in der Klasse *Querere* zusammengefasst.

Aus technischen Gründen müssen für einige Routen die Verlustzeitmessungen aus mehreren Messungen für einzelne Teilstrecken zusammengesetzt werden. Daher ist Gesamtanzahl der Fahrzeuge aufsummiert über alle Verlustzeitmessungen größer als die Gesamtanzahl der ins Netz eingespeisten Fahrzeuge. Auf das Verhältnis der Verlustzeiten zwischen den einzelnen Steuerungsszenarien wirkt sich dies jedoch nicht aus.

Die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgt getrennt nach Schwachverkehrszeit, Morgenspitze, Nebenverkehrszeit und Abendspitze sowie für den Gesamttag. Neben den Verlustzeiten werden auch die Standzeiten und die Anzahl der Halte ermittelt. Die Verlustzeiten für die Fahrzeuge des ÖPNV werden zusätzlich separat ermittelt und ausgewertet.

10.4 Ergebnisse

10.4.1 Allgemeines

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Simulationsergebnisse für die verschiedenen Steuerungsszenarien vergleichend gegenübergestellt und bewertet. Für alle Szenarien wurden Mittelwerte, Standardabweichungen und Konfidenzintervalle aus jeweils 10 Simulationsläufe bestimmt. Die kompletten Ergebnisse befinden sich im Anhang. Soweit nicht anders angegeben, ist die Bezugsgrundlage für alle relativen Angaben jeweils das Szenario *LRS mit ÖPNV-Beschleunigung*. Die angegebenen Werte für BALANCE wurden mit dem voreingestellten Optimierungsintervall von 5 Minuten erzielt.

10.4.2 Verlustzeiten im ÖPNV

Bereits die in den lokalen Steuerungen integrierte einfache Maßnahme zur ÖPNV-Beschleunigung mittels Freigabezeitanpassung zeigt deutliche Wirkung. Vergleicht man bei LRS und BALANCE jeweils die Varianten mit und ohne ÖPNV-Beschleunigung gegeneinander, so liegen die Verlustzeiten bei fehlender ÖPNV-Beschleunigung im Mittel etwa um den Faktor 1,75 höher (Tabelle 88).

Beim Einsatz von BALANCE sind die Verlustzeiten der Busse im Vergleich zur LRS jeweils geringfügig größer (4% mit und 6% ohne ÖPNV-Beschleunigung).

Steuerungsszenario	Mittlere Verlustzeit pro Bus [s]		
	Fahrtrichtung Nord nach Süd	Fahrtrichtung Süd nach Nord	Mittel über beide Fahrtrichtungen
FZS	86	66	75
LRS mit ÖPNV-Beschleunigung	52	38	44
LRS ohne ÖPNV Beschleunigung	94	64	77
BALANCE mit ÖPNV-Beschleunigung	55	40	46
BALANCE ohne ÖPNV Beschleunigung	98	70	82

Tabelle 88: Mittlere Verlustzeiten des ÖPNV

Die Wirkung der ÖPNV-Beschleunigung variiert je nach Fahrtrichtung und zwischen den verschiedenen Tageszeiten bzw. Signalprogrammen. Die Spanne der erzielbaren Beschleunigung reicht dabei von 5% (BALANCE, Süd nach Nord, Morgenprogramm) bis 72% (BALANCE, Nord nach Süd, Morgenprogramm). Die Verlustzeiten bei der Festzeitsteuerung sind vergleichbar mit denen der LRS ohne ÖPNV-Beschleunigung.

Aus den folgenden Abschnitten wird deutlich, dass den positiven Wirkungen der ÖPNV-Beschleunigung auf die Verlustzeiten der Busse auf der anderen Seite deutliche negative Auswirkungen auf die Fahrzeuge des MIV entgegen stehen. Die Frage, ob die im virtuellen

Testfeld umgesetzte Form der ÖPNV-Beschleunigung z. B. aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist, wird in AMONES nicht betrachtet.

10.4.3 Schwachverkehrszeit

In der Schwachverkehrszeit findet kein ÖPNV-Betrieb statt, so dass sich folglich die Ergebnisse für die Szenarien mit und ohne ÖPNV-Beschleunigung nicht voneinander unterscheiden.

Die in den einzelnen Steuerungsszenarien auftretenden Verlustzeiten unterscheiden sich nur geringfügig voneinander, wobei die LRS hier am besten abschneidet. An zweiter Stelle folgt die FZS.

BALANCE liefert hier die schlechtesten Ergebnisse (Tabelle 89). Dies liegt eventuell darin begründet, dass insgesamt nur sehr wenige Fahrzeuge im Netz unterwegs sind und BALANCE damit keine geeigneten Werte für eine valide Modellierung der Verkehrsnachfrage zur Verfügung stehen.

Steuerungsszenario	Normierte mittlere Verlustzeit pro Kfz (LRS = 100)	Normierte mittlere AnzahlHalte pro Kfz (LRS = 100)
FZS	103	102
LRS	100	100
BALANCE	105	107

Tabelle 89: Mittlere Verlustzeiten und mittlere Anzahl Halte in der Schwachverkehrszeit

10.4.4 Morgenspitze

Während der Morgenspitze sind deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Steuerungsszenarien zu beobachten. Das beste Ergebnis für den MIV wird hier durch die FZS erreicht. Etwas schlechter schneiden LRS und BALANCE jeweils in der Variante ohne ÖPNV-Beschleunigung ab. Während diese bei der LRS zu einem deutlichen Anstieg der Verlustzeiten im MIV führt, kann BALANCE diesen Anstieg offenbar wirkungsvoll verhindern (Tabelle 90). Bei der Betrachtung der mittleren Anzahl Halte zeigen sich ähnliche Ergebnisse.

Das gute Abschneiden der Festzeitsteuerung findet sich auch in den Ergebnissen für die Schwachverkehrszeit und die Abendspitze wieder. Es ist insofern plausibel, als die Signalprogramme genau für die simulierte Verkehrsnachfrage geplant wurden, und bestätigt die Aussage, dass eine Festzeitsteuerung Szenarien mit bekannter und vorhersagbarer Nachfrage sehr gut bewältigen kann.

Steuerungsszenario	Normierte mittlere Verlustzeit pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)	Normierte mittlere AnzahlHalte pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)
FZS	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

Tabelle 90: Mittlere Verlustzeiten und mittlere Anzahl Halte in der Morgenspitze

Da auch die LRS auf der gut geplanten FZS aufsetzt, besteht in den Varianten ohne ÖPNV-Beschleunigung offensichtlich wenig Optimierungspotential für eine Netzsteuerung. Die Ergebnisse von LRS und BALANCE unterscheiden sich hier in der Gesamtbetrachtung nicht signifikant voneinander. Betrachtet man allerdings die Verlustzeiten getrennt nach den einzelnen Routenklassen, so zeigen sich statistisch signifikante Unterschiede (Tabelle 91). BALANCE verringert vor allem, die Verlustzeiten auf den Haupttrouten und gelangt dabei in die Nähe der FZS (52,3s).

Routenklasse	Mittlere Verlustzeit pro Kfz [s] bei LRS ohne ÖV-Beschl.	Mittlere Verlustzeit pro Kfz [s] bei BALANCE ohne ÖP-Beschl.	Mittlere Verlustzeit pro Kfz [s] bei BALANCE mit ÖP-Beschl.
Haupttrouten	65,5	54,3	61,0
Abbieger	53,8	59,1	53,6
Einbieger	83,0	80,7	84,1
Querter	72,9	77,0	82,4
Gesamt	64,0	63,5	62,3

Tabelle 91: Mittlere Verlustzeiten in der Morgenspitze nach Routenklassen

Bei der im Morgenprogramm geschalteten Umlaufzeit von 90s (40 Umläufe pro Stunde) greift im Mittel in jedem dritten Umlauf die ÖPNV-Beschleunigung. Bei der LRS führt dies zu einem Anstieg der Verlustzeiten um etwa 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 geringfügige Verbesserung ist statistisch nicht signifikant.) Zwischen den einzelnen Routenklassen zeigen sich jedoch wieder signifikante Unterschiede.

10.4.5 Nebenverkehrszeit

In der Nebenverkehrszeit gibt es insgesamt nur geringe (wenn auch größtenteils signifikante) Unterschiede zwischen den Steuerungsszenarien LRS und BALANCE sowie mit und ohne ÖPNV-Beschleunigung. Die Festzeitsteuerung schneidet 5-10% besser ab als die anderen Verfahren. Die ÖPNV-Beschleunigung bewirkt hier nur geringe Verschlechterungen für den MIV, was durch die kürzere Umlaufzeit und die insgesamt deutlich niedrigere Verkehrsnachfrage erklärbar ist.

Steuerungsszenario	Normierte mittlere Verlustzeit pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)	Normierte mittlere AnzahlHalte pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)
FZS	93	94
LRS mit ÖPNV-Beschleunigung	100	100
LRS ohne ÖPNV Beschleunigung	99	99
BALANCE mit ÖPNV-Beschleunigung	103	102
BALANCE ohne ÖPNV Beschleunigung	101	102

Tabelle 92: Mittlere Verlustzeiten und mittlere Anzahl Halte in der Nebenverkehrszeit

10.4.6 Abendspitze

In der Abendspitze treten verglichen mit den anderen Tagesabschnitten die größten Verlustzeiten auf. Auch die Ergebnisse der verschiedenen Steuerungsszenarien unterscheiden sich hier am stärksten (Tabelle 93). Bedingt durch die hohe Auslastung im Netz wirken sich die „Störungen“ durch die ÖPNV-Beschleunigung hier besonders stark auf die MIV-Verlustzeiten aus.

Steuerungsszenario	Normierte mittlere Verlustzeit pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)	Normierte mittlere AnzahlHalte pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)
FZS	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 93: Mittlere Verlustzeiten und mittlere Anzahl Halte in der Abendspitze

Von den Varianten ohne ÖPNV-Beschleunigung schneidet erneut die FZS am besten ab. Mit Ausnahme der FZS treten in der Abendspitze in allen Steuerungsszenarien 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.

Bei genauerer Analyse zeigt sich, dass es bei den Szenarien mit ÖPNV-Beschleunigung in einigen Simulationsläufen zu größeren Rückstaus an dem nördlich der Zufahrt 10 gelegenen Knoten kommt. Diese führen dann zu einem starken Anstieg der Verlustzeiten, die im Extremfall doppelt so hoch werden können wie die mittlere Verlustzeit. Hier besteht Nachbesserungsbedarf an der lokalen Steuerung.

10.4.7 Zusammenfassung

Abbildung 158 verdeutlicht noch einmal das Verhältnis der Verlustzeiten in den verschiedenen Steuerungsszenarien im Tagesverlauf, dargestellt als mittlere Verlustzeit normiert auf das Steuerungsszenario LRS mit ÖPNV-Beschleunigung. Wie bereits erwähnt, entspricht das

bislang im virtuellen Testfeld betrachtete Nachfrageszenario exakt der Planungsgrundlage für die Festzeitprogramme, was deren gutes Abschneiden erklärt.

Bei den Varianten ohne ÖPNV-Beschleunigung bewirken LRS und BALANCE nahezu identische Verlustzeiten, allerdings mit unterschiedlicher Verteilung auf die Routen im Netz (Tabelle 91). Einschränkend ist hier zu sagen, dass bei BALANCE aus Zeitgründen keine Tests mit anderen Parametern (Gewichtungsfaktoren, erlaubte T-Zeit-Grenzen, Optimierung mittels genetischen Algorithmus) durchgeführt werden konnten. Die Erfahrungen aus dem Testfeld Hamburg legen nahe, dass hier noch Potential besteht.

Seine Stärken spielt BALANCE bei aktivierter ÖPNV-Beschleunigung und starker Verkehrsnachfrage (Morgenspitze) aus, wo es den Anstieg der MIV-Verlustzeiten vollständig auffangen kann. Bei zu starker Auslastung und schlechter lokaler Steuerung (Abendspitze), kann sich der Effekt allerdings auch ins Gegenteil umkehren.

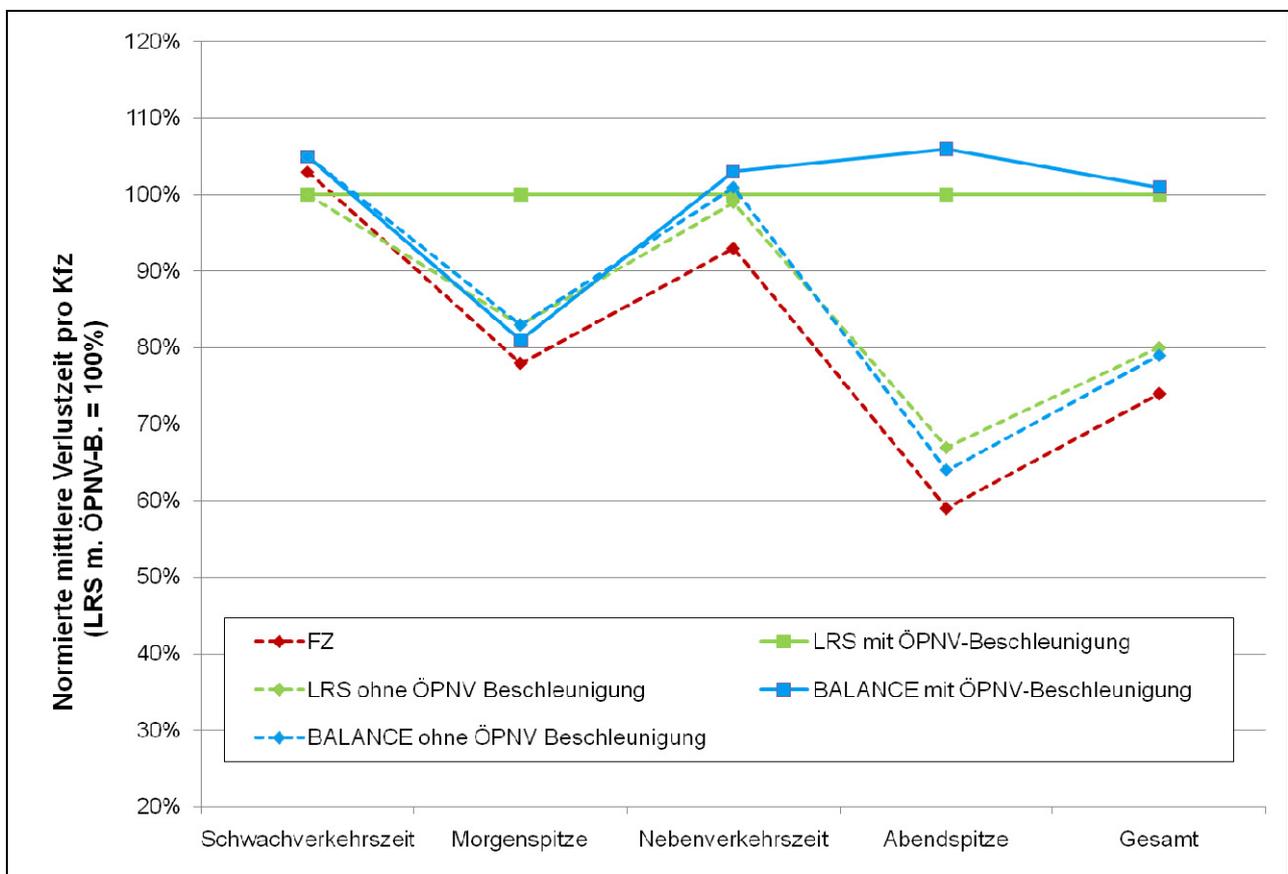


Abbildung 158: Vergleich der mittleren Verlustzeiten im Tagesverlauf.

Abschließend ist festzuhalten, dass die bislang betrachteten Szenarien lediglich einen ersten Einblick in die Potentiale der verschiedenen Steuerungsverfahren im virtuellen Testfeld geben können. Neben einer Umsetzung der übrigen Steuerungsvarianten sollten auch die beiden anderen Netzvarianten sowie Szenarien mit variierte Verkehrsnachfrage noch betrachtet werden.

11 Evaluierung modellbasierter Steuerungsverfahren

11.1 Evaluierung modellbasierter Steuerungsverfahren in den AMONES-Testfeldern

Im Vergleich der netzweiten modellbasierten Steuerungsverfahren (NMS) mit der lokal regelbasierten Steuerung (LRS) und der Festzeitsteuerung (FZS) zeigen sich weder in den Felduntersuchungen und Simulationsstudien für die Testfelder in Hamburg und in Bremerhaven noch in den Simulationsstudien im virtuellen Testfeld eindeutige Ergebnisse hinsichtlich der Bewertungskriterien Verlustzeiten und Anzahl der Halte.

In der Tendenz ergeben sich in den realen Testfeldern gegenüber dem Referenzverfahren LRS kleine Vorteile für die NMS, die jedoch über den Tagesverlauf nicht durchgängig nachgewiesen werden konnten. Darüber hinaus wird mit der FZS in Bremerhaven eine vergleichbare Verkehrsqualität erreicht wie mit den beiden verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren. Ein deutlicher systematischer Abstand bezüglich der Verkehrsqualität besteht lediglich für die FZS im Testfeld Hamburg. Die FZS führt dort aufgrund der zyklischen Freigabe eines Linksabbiegers am zentralen Knotenpunkt, der bei den verkehrsabhängigen Steuerungen nur bei Bedarf bedient wird, zu deutlich längeren Fahrzeiten und einer höheren Anzahl von Halten.

Die detaillierte Auswertung der in der Felduntersuchung und in der Simulation für die realen Testfelder ermittelten Daten zeigt, dass es mit den NMS zeitweise gelingt, deutliche Verbesserungen zu erzielen, diese Verbesserungen aber im Tagesverlauf auch Zeitbereichen gegenüber stehen, in denen die Verkehrsqualität auf ein schlechteres Niveau als bei der LRS zurück fällt. Dies weist darauf hin, dass offensichtlich Verbesserungspotenziale von bis zu 20 % Reduzierung der Verlustzeiten mit Hilfe von modellbasierten Steuerungsverfahren erzielt werden können, die Verfahren jedoch noch nicht ausgereift genug sind, dieses Potenzial durchgängig zu nutzen.

Im virtuellen Testfeld sind drei Steuerungsverfahren ohne ÖPNV-Bevorrechtigung und zwei Verfahren mit ÖPNV-Bevorrechtigung für identische Nachfragesituationen untersucht worden. Der Vergleich anhand der mittleren Verlustzeit der Busse zeigt sehr deutlich das große Beschleunigungspotenzial der ÖPNV-Bevorrechtigung, mit der die Verlustzeiten der Busse um etwa 40 % reduziert werden können.

Die Verbesserung der Fahrzeiten der ÖPNV-Busse durch die Bevorrechtigung steht jedoch insbesondere bei höherer Auslastung in einem offensichtlichen Zielkonflikt zu der Verkehrsqualität des übrigen Kfz-Verkehrs. So steigen die Verlustzeiten des Kfz-Verkehrs in der stark belasteten Abendspitze bei der LRS mit ÖPNV-Bevorrechtigung um 67 % gegenüber der FZS an. In der Gegenüberstellung aller Steuerungsverfahren mit bzw. ohne ÖPNV-Bevorrechtigung zeigt sich diese Wechselwirkung für die Abendspitze in ähnlicher Größenordnung.

Lediglich in der Morgenspitze wird diese Systematik einmal von BALANCE mit ÖPNV-Bevorrechtigung durchbrochen. In diesem Steuerungsszenario erzielt BALANCE für den Kfz-

Verkehr vergleichbar gute Ergebnisse wie die Steuerungsverfahren ohne ÖPNV-Bevorrechtigung. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass bei einer gelungenen Integration der ÖPNV-Bevorrechtigung in die Netzsteuerung die negativen Auswirkungen auf den Kfz-Verkehr weitgehend vermieden werden können. BALANCE mit ÖPNV-Bevorrechtigung kann diese Verbesserung jedoch nicht systematisch nachweisen und schneidet in der Abendspitze mit dem ungünstigsten Ergebnis ab. Ein grundsätzliches Potenzial zum Ausgleich von Störungen lässt sich jedoch aus den Ergebnissen für modellbasierte Verfahren vermuten.

Die Steuerungsverfahren ohne ÖPNV-Bevorrechtigung erzielen im virtuellen Testfeld hinsichtlich der Verlustzeiten von ÖPNV-Bussen und übrigen Kfz in allen Nachfrageszenarien eine vergleichbare Verkehrsqualität. Im Gegensatz zur allgemeinen Erwartung schneidet die FZS nicht schlechter sondern überwiegend besser als die beiden verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren ohne ÖPNV-Bevorrechtigung ab. Dies ist sicherlich der vorab getroffenen Anpassung der Freigabezeiten entsprechend der bekannten Verkehrsnachfrage geschuldet, zeigt jedoch, dass bei der LRS mit derselben Voranpassung der Rahmensignalprogramme an die Verkehrsnachfrage eine darüber hinaus gehende Anpassung an kurzfristige Schwankungen eher kontraproduktiv wirkt.

Die Synthese der Auswertungen zeigt, dass mit einer guten Anpassung der Freigabezeiten an die Verkehrsnachfrage auch für längere Zeiträume bereits ein gutes Ergebnis erzielt wird, dass eine weitergehende Nachfrageanpassung durch die NMS, aufgrund der schwierigen Verkehrslagemodellierung, bislang zu keinen durchgängigen Verbesserungen führt und kurzfristige Freigabezeitanpassungen an stochastische Schwankungen durch die LRS eher kontraproduktiv wirken, wenn ihnen ein zu großer Spielraum eingeräumt wird. Für bestimmte Situationen, in denen eine Reaktion auf die Anforderung einzelner Fahrzeuge oder Verkehrsteilnehmer erforderlich ist, kann die LRS jedoch wesentliche Vorteile bieten. In gleicher Weise ist die LRS für die ÖPNV-Bevorrechtigung ohne Alternative.

Die ÖPNV-Bevorrechtigung führt zu eindeutig geringeren Verlustzeiten für ÖPNV-Fahrzeuge, ist aber in der Regel mit einer signifikanten Verschlechterung für den übrigen Kfz-Verkehr verbunden. Offensichtlich besteht im Grundsatz die Möglichkeit, mit modellbasierten Steuerungsverfahren die ÖPNV-Bevorrechtigung ohne wesentlichen Nachteil für den übrigen Kfz-Verkehr zu integrieren und Störungen auszugleichen. Da dies in den Untersuchungen jedoch nicht systematisch gelungen ist, wird hier noch ein Entwicklungspotenzial für die modellbasierten Verfahren gesehen.

Aus der Evaluierung der Umweltwirkungen wird anhand der Feldmessungen deutlich, dass die Reduktionspotenziale der Lichtsignalsteuerung für die lokalen Luftschadstoffimmissionen bei entsprechenden verkehrlichen und meteorologischen Randbedingungen erheblich sein können: Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten und hohen Verkehrsbelastungen wie z. B. am Messquerschnitt Hamburg Habichtstraße beobachtet, wurde für eine steigende Anzahl Halte im Messbereich eine deutliche positive Korrelation mit den gemessenen Stickstoffoxid-Immissionen festgestellt. Im Testfeld Bremerhaven mit im Mittel deutlich höheren Windgeschwindigkeiten und einer durchweg niedrigeren Verkehrsbelastung konnten erwartungsgemäß keine signifikanten Zusammenhänge zwischen Kenngrößen der

Verkehrsqualität und den Luftschadstoffimmissionen abgeleitet werden. Deutlich erkennbar in nahezu allen Immissionsmessreihen, d. h. sowohl für Partikel als auch für Stickstoffoxide und für Hamburg ebenso wie für Bremerhaven, sind jedoch die Einflüsse des Schwerverkehrs.

Für eine detaillierte Betrachtung der Wirkungen einer verbesserten Koordinierung zeigt ein Vergleich der NMS BALANCE mit der LRS am Messquerschnitt Hamburg Habichtstraße ähnliche Ergebnisse wie die (netzbezogenen) verkehrlichen Untersuchungen. Beide Verfahren reduzieren im Vergleich zur FZS die Anzahl der Halte im Untersuchungsbereich deutlich, wobei die Anzahl der Halte bei der NMS BALANCE je nach Parametrierung geringfügig höher liegt als bei der LRS. Für die Immissionen am Messquerschnitt bedeutet dies in beiden Fällen eine Reduktion von etwa 20 bis 25 % im Vergleich zur FZS. Mit einer annähernd optimalen „Umwelt-HotSpot-Koordinierung“ am Messquerschnitt könnten die Immissionen (zu verkehrlich hochbelasteten Zeiten) allerdings um weitere 25 % reduziert werden.

Die Ergebnisse der Untersuchung der netzweiten Emissionen anhand der Mikrosimulationen in Verbindung mit Emissionskennfeldern zeigen analog zu den verkehrsbezogenen Untersuchungen keine klaren Tendenzen. Je nach Parametrierung liegen die motorbedingten Emissionen mit der NMS BALANCE im Vergleich zur LRS in einer Größenordnung von -10 % bis +10 %.

Aus diesen Erkenntnissen lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Eine umweltbezogene Optimierung der Lichtsignalsteuerung sollte ebenso wie die Aktivierung weiterer Maßnahmen der Verkehrssteuerung aufgrund der dominanten meteorologischen Einflüsse situationsabhängig erfolgen. Für die modellbasierten Steuerungsverfahren bedeutet dies, dass zu Zeiten mit erhöhtem Grenzwertüberschreitungsrisiko eine Optimierung der Anzahl der Halte der Optimierung von Verlustzeiten vorgezogen werden sollte.
- Die Lichtsignalsteuerung sollte nur ein Element eines umweltbezogenen verkehrlichen Maßnahmenpakets darstellen. Weitere Maßnahmen wie z. B. situationsabhängige differenzierte Zufahrtsbeschränkungen für den Schwerverkehr erscheinen mit dem Ziel der Minimierung negativer gesundheitlicher Wirkungen und der Einhaltung gesetzlicher Luftschadstoffgrenzwerte sinnvoll und wichtig.
- Insbesondere für komplexe Situationen, in denen verschiedene miteinander konkurrierende Ziele (z. B. Reisezeiten im ÖV, Einhaltung von Immissionsgrenzwerten) unter Berücksichtigung der meteorologischen Situation und weiteren Randbedingungen dynamisch priorisiert werden müssen, wird ein grundsätzlicher wesentlicher Vorteil modellbasierter Verfahren gesehen (vgl. hierzu die umweltbezogenen Ziel- und Erfassungskonzepte in Kapitel 5.2.5). Zur Realisierung einer solchen Steuerung besteht jedoch noch erheblicher Entwicklungsbedarf.

Grundsätzlich kann man zwar sagen, dass die Parameter der NMS einfacher abzuschätzen sind als dies für die LRS der Fall ist, da dies in der Regel global geschieht und es sich um makroskopische Verkehrskenngrößen handelt. Um das ganze Potential der NMS ausschöpfen zu können, ist es aber insbesondere erforderlich, die zahlreichen Parameter für die Nachfrage-

und Wirkungsmodelle und für die Optimierungsfunktion möglichst optimal einzustellen. Im realen Verkehr ist es jedoch nahezu unmöglich, mehrere unterschiedliche Parametervarianten mit vertretbarem Aufwand und hinreichender Aussagegenauigkeit gegeneinander zu vergleichen. Einerseits sind die zur ausreichend genauen Ermittlung der verkehrlichen Wirkungen durchzuführenden Messungen sehr aufwändig. Andererseits ist in der Praxis die Verkehrsnachfrage an unterschiedlichen Tagen in der Regel nicht direkt miteinander vergleichbar.

Es bietet sich daher an, eine gut kalibrierte Mikrosimulation zum Vergleich unterschiedlicher Parametersätze einer NMS einzusetzen. In der Mikrosimulation können die zu untersuchenden Varianten bei unveränderter Verkehrsnachfrage gegeneinander verglichen werden. Zudem ermöglicht die wiederholte Durchführung von Simulationläufen mit geänderten Startzufallszahlen es, stochastische Schwankungen in den Ergebnissen abzuschätzen und in die Bewertung mit einfließen zu lassen. Die verkehrlichen Wirkungen können in der Simulation mit geringem Aufwand flächendeckend und in hoher Genauigkeit gewonnen werden.

Die Erfahrungen aus den Simulationsszenarien der realen Testfelder sowie im virtuellen Testfeld bestätigen die gute Eignung des Werkzeugs Mikrosimulation für die Untersuchung und Bewertung unterschiedlicher Steuerungsverfahren bzw. Parametersätze. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass sich die Anbindung der NMS an die eingesetzte Mikrosimulationsumgebung VISSIM trotz intensiver Unterstützung durch die Hersteller als zeitaufwändig und schwierig gestaltete. Mit MOTION konnten bis zum Ende des Projektes keine plausiblen Simulationsergebnisse für das Netz in Bremerhaven erzeugt werden. Ein Grund hierfür konnte leider nicht festgestellt werden. Durch den hierentstandenen Mehraufwand war es daher für das virtuelle Testfeld nicht mehr möglich Simulationen mit MOTION durchzuführen.

Auch die Kalibrierung und die Validierung sind in Simulationsnetzen mit verkehrsabhängiger Steuerung aufwändig und schwierig. Sie erfordern zudem vorab umfangreiche Messungen in der Realität, um geeignete Vergleichswerte zur Verfügung zu haben. Die Standardparameter in VISSIM liegen vor allem bei den Wunschbeschleunigungen weit ab der Realität. Zudem gibt es auch für weitere Parameter, die einen teils erheblichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben, wie etwa Querverkehrsstörungen bisher keine Vergleichsdaten in der Literatur. Der Erhebungsaufwand für solche Daten aber ist enorm.

Sobald eine hinreichend kalibrierte Simulationsumgebung zur Verfügung steht, lassen sich mit ihr gut und mit vergleichsweise geringem Aufwand unterschiedliche Parametersätze bei variierenden Verkehrsnachfragen gegeneinander vergleichen.

Da in den NMS aktuell die Auswirkungen von Veränderungen an einzelnen Parametern für den Planer leider nicht direkt abzuschätzen sind, erscheint das Austesten zahlreicher Parametersätze in der Simulation momentan als einzig empfehlenswerte Methode, um das Potential der NMS vernünftig untersuchen und abschätzen zu können.

11.2 Stand und Sichtweise der Baulastträger

Der Stand der Lichtsignalsteuerung und die Sichtweise der Baulastträger wurde über einen Fragebogen, der von 21 Städten in Deutschland beantwortet wurde, sowie über eine Podiumsdiskussion während des „7. DVWG Straßenverkehrsforum AMONES-Symposium *Modellbasierte LSA-Netzsteuerungsverfahren*“ am 11. November 2009 in Berlin ermittelt.

Die Rücklaufquote der Fragebögen war Städten die eine modellbasierte Netzsteuerung bereits verwenden oder bei denen sich eine solche momentan im Aufbau befindet höher als bei Städten bei denen dies nicht der Fall ist.

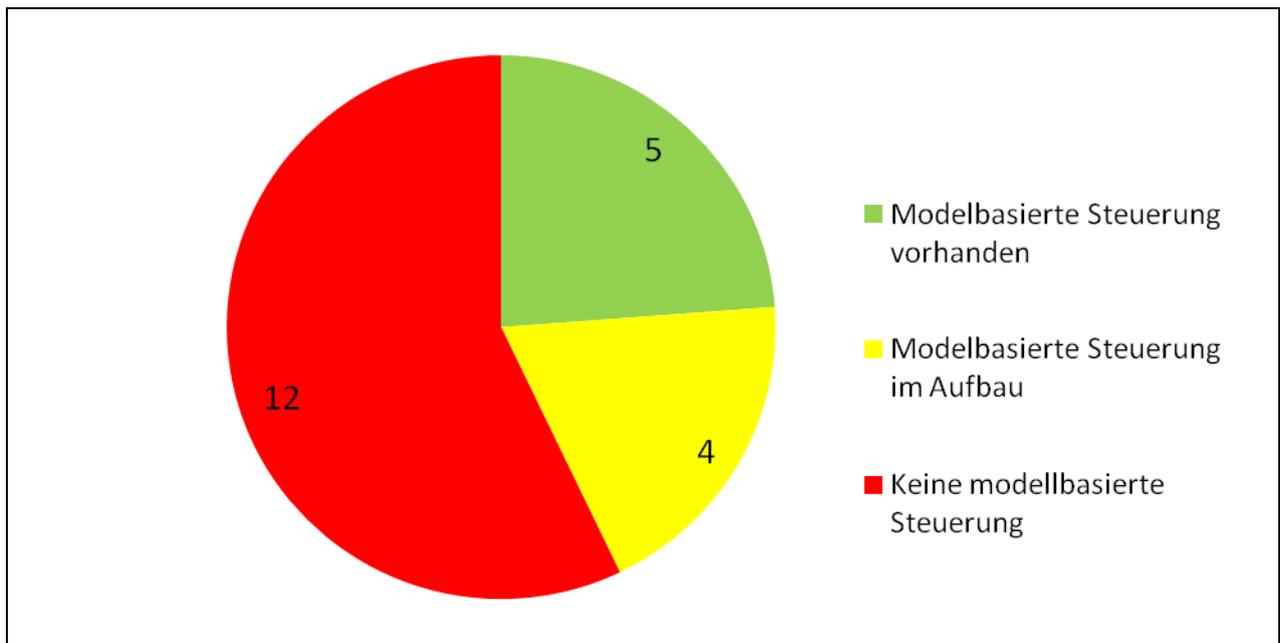


Abbildung 159: Vorhandensein einer modellbasierten Netzsteuerung.

An der Podiumsdiskussion nahmen neben Vertretern der Städte Bremerhaven und Hamburg, die als Testfelder im Projekt AMONES dienten, auch ein Vertreter der Stadt Münster als weiterer Repräsentant einer Stadt mit Einsatz einer modellbasierten Netzsteuerung sowie ein Vertreter der Stadt Berlin, als Repräsentant einer Stadt ohne modellbasierter Netzsteuerung, teil.

11.2.1 Stand der LSA-Steuerung

Die 21 befragten Städte verfügen zusammen über etwa 60.000 Lichtsignalanlagen. Im Schnitt werden pro 100.000 Einwohnern 60 Lichtsignalanlagen benötigt.

Jeder der Städte verfügt an einzelnen Knotenpunkten über lokale regelbasierte Steuerungen. Auch wird in jeder der Städte an einzelnen Knotenpunkten der öffentliche Personenverkehr priorisiert. Netzsteuerungen, sowohl regelbasierte Signalprogrammauswahl als auch die modellbasierte Netzsteuerungen BALANCE und MOTION werden nicht in allen Städten eingesetzt und falls nur in kleinen Teilnetzen.

Pro Lichtsignalanlage stehen im Schnitt 5.500€ für Planung, Wartung und Erneuerung zur Verfügung. Im Schnitt betreut eine Person 75 Lichtsignalanlagen. Die Planung kann demzufolge nicht immer sehr aktuell sein. Die Aktualität der Steuerung hängt dabei stark vom Steuerungsverfahren ab.

Das geringe Alter der Planung für die modellbasierten Netzsteuerungsverfahren hängt hierbei hauptsächlich von der erst kürzlich erfolgten Implementierung ab.

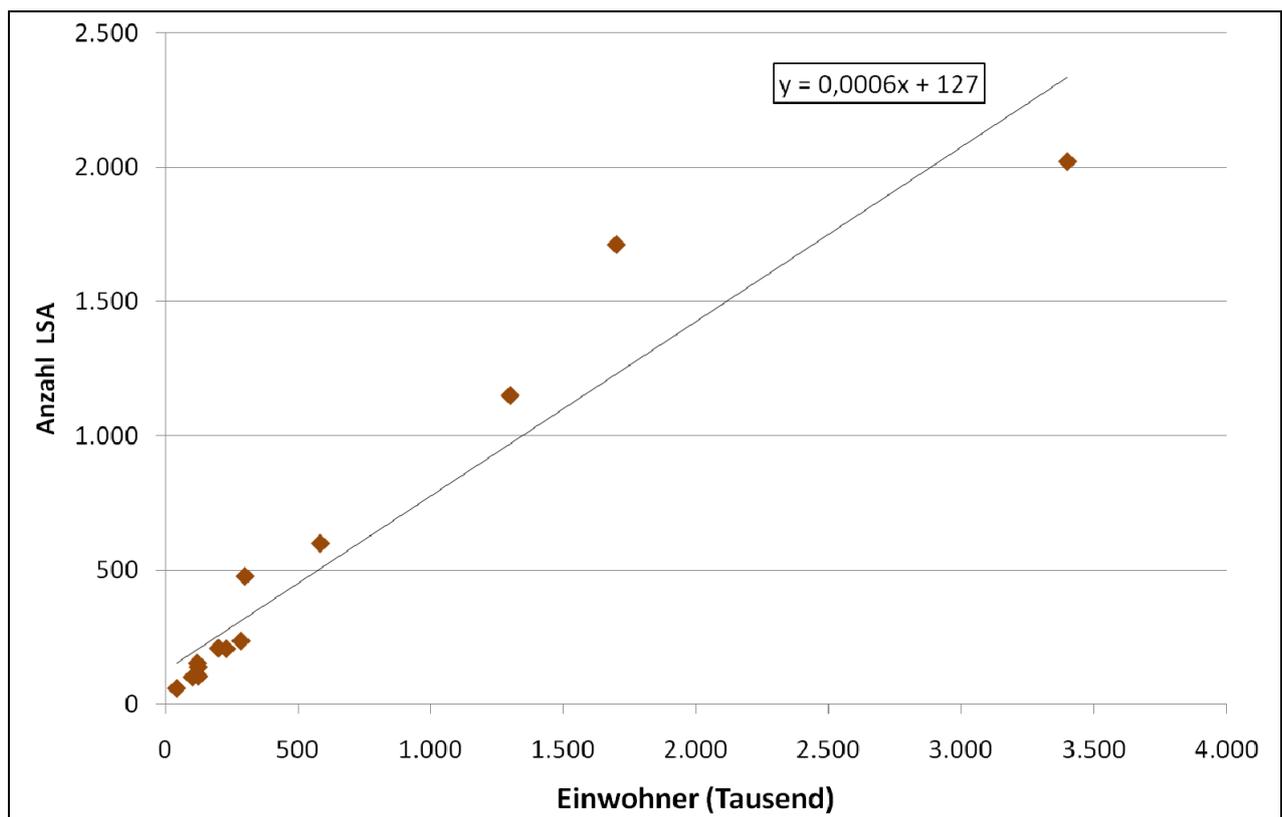


Abbildung 160: Anzahl der Lichtsignalanlagen in Abhängigkeit der Einwohnerzahl

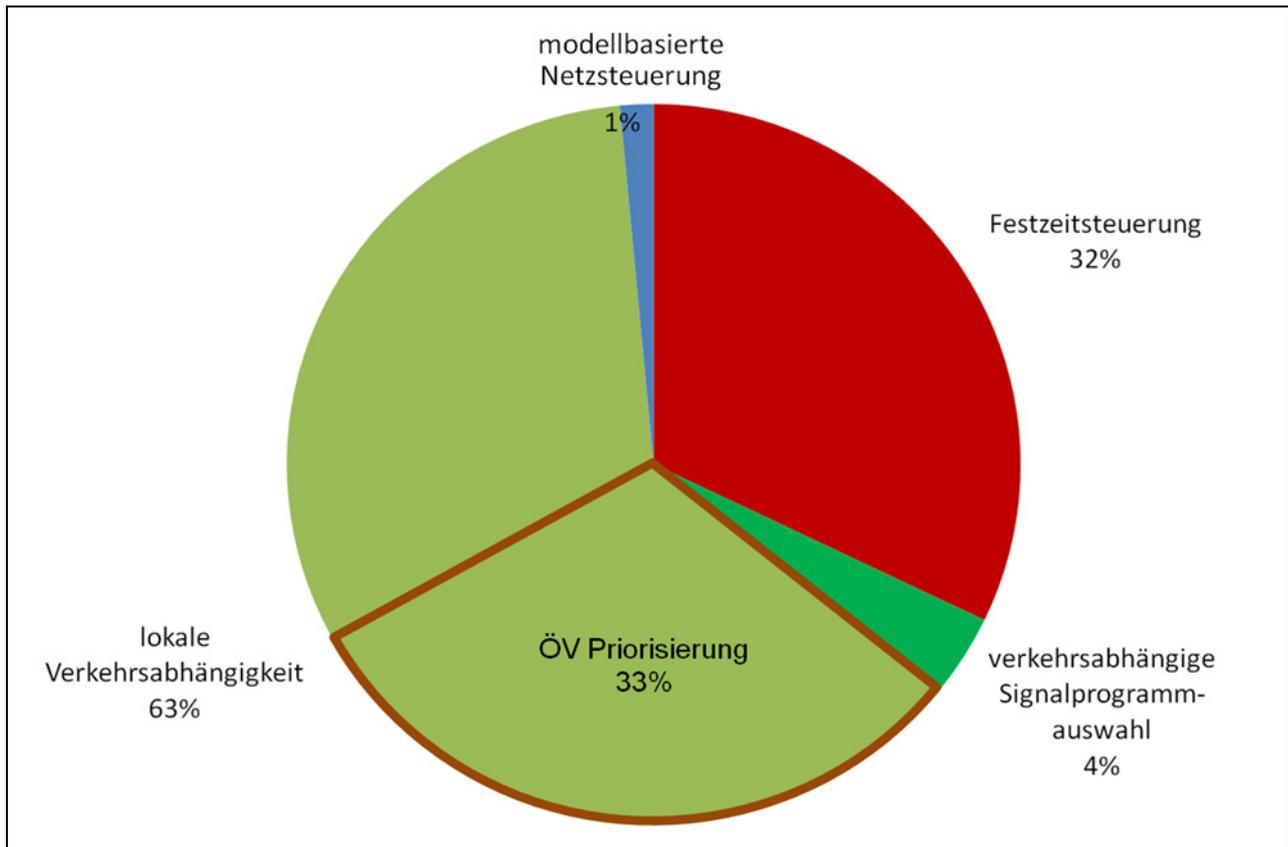


Abbildung 161: Art der Lichtsignalsteuerung.

	Festzeit	Verkehrs-abhängige Signalprogramm-auswahl	lokale Verkehrs-abhängigkeit	modellbasierte Netzsteuerungs-verfahren
Mittleres Alter der Planung in Jahren	8,9	4,6	6,2	1,6
Maximales Alter der Planung in Jahren	20	10	20	2

Tabelle 94: Alter der Planung in Jahren nach Art des Steuerungsverfahrens.

Auch die Systemtechnik entspricht nicht immer dem neusten Stand. Für die volle Funktionalität benötigen gerade die modellbasierten Steuerungen in der Regel auch den neusten Stand der Technik im Bereich der Systemtechnik bei Steuergeräten und der Verkehrsrechnerzentrale. Dabei müssen die Steuergeräte und der Verkehrsrechner bei Kombination einer modellbasierten Netzsteuerung mit lokalen regelbasierten Steuerungen zusätzlich die jeweilige Sprache der Logik unterstützen.

Mittleres Alter der Steuerungsgeräte in Jahren	12
Maximales Alter der Steuerungsgeräte in Jahren	25
Mittleres Alter des Verkehrsrechners in Jahren	7
Maximales Alter des Verkehrsrechners in Jahren	20

Tabelle 95: Alter der Systemtechnik in Jahren.

Eine Kopplung der Lichtsignalsteuerung an andere Maßnahmen des Verkehrsmanagement, wie Wechselwegweisung, Pfortnerung, variable Fahrstreifenzuweisung oder temporäre Busspuren wird etwa bei einem Drittel der befragten Städte realisiert.

11.2.2 Sichtweise der Baulastträger

Unter den 21 befragten Städten haben 9 eine modellbasierte Netzsteuerung bereits eingeführt oder sie befindet sich in der Einführung. Von den restlichen 12 Städten sind 3 an einer Einführung interessiert. Es gibt hier allerdings noch Hindernisse für eine Einführung. 7 Städte schließen eine Einführung derzeit aus.

Hauptgrund für die Einführung einer modellbasierten Netzsteuerung ist die Einschätzung, dass im Netz Überlastungen oder eine stark schwankende Verkehrsnachfrage zu erwarten ist, also meist konkrete Verkehrsprobleme. So wie es beispielsweise für das AMONES Testfeld in Bremerhaven der Fall, wo aufgrund des neu errichteten Kongresszentrums in Zukunft starker Veranstaltungsverkehr zu erwarten ist (Das Kongresszentrum wurde erst nach den Messwochen in Bremerhaven fertiggestellt). Auch die beiden Städte in der Befragung, die der Einschätzung sind, dass es nur zu geringen Überlastungen im Netz kommt haben in den Steuerungsgebieten mit modellbasierter Netzsteuerung vermehrt Veranstaltungsverkehr.

Wesentliches Hemmnis für den Einsatz einer modellbasierten Netzsteuerung ist daher auch, dass kein Handlungsbedarf gesehen wird. Hauptgrund ist hier, dass es kaum zu Überlastungen kommt oder die lokal regelbasierte Steuerung für die vorhandene Verkehrsnachfrage ausreichend ist.

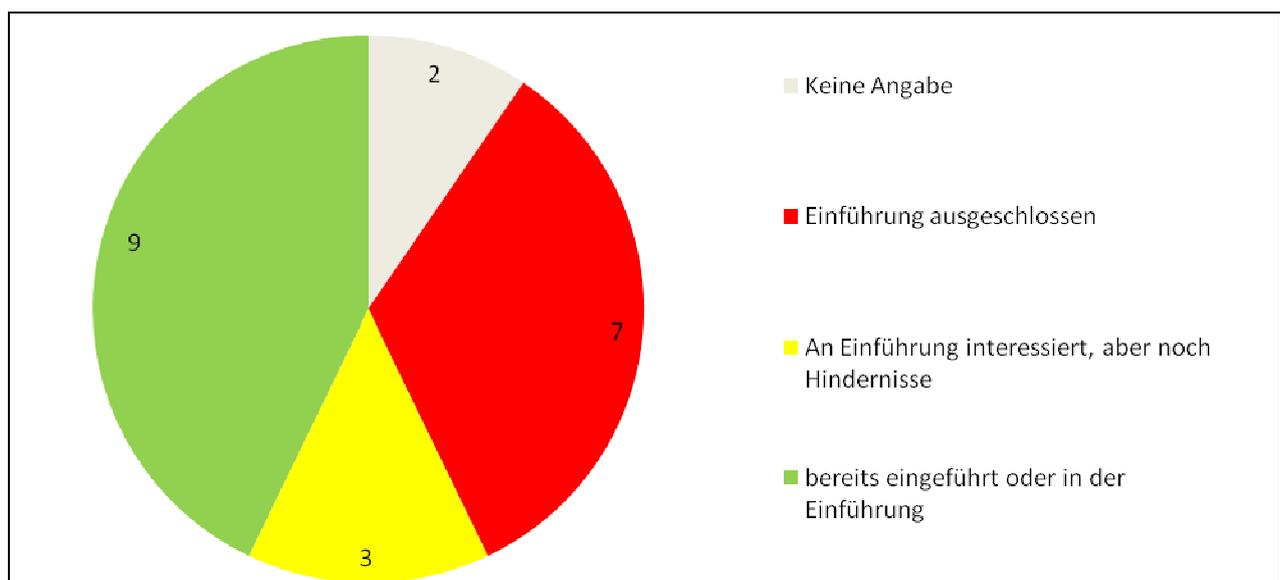


Abbildung 162: Einführungspotential.

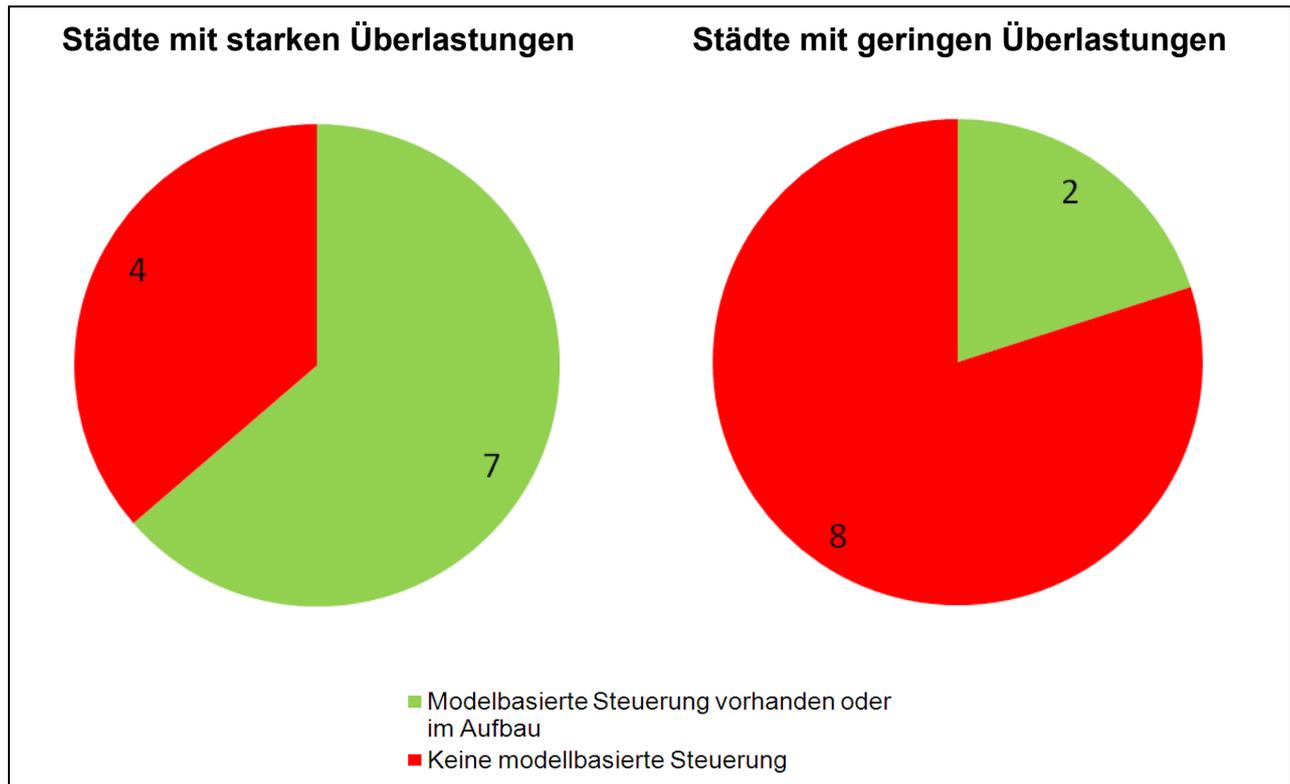


Abbildung 163: Vorhandensein einer modellbasierten Netzsteuerung in Abhängigkeit der Einschätzung der Verkehrsüberlastungen.

Ein weiteres Hemmnis sind selbstentwickelte Systeme, die die gestellten Anforderungen erfüllen und in die eine modellbasierte Netzsteuerung (aus Sicht des Baulastträgers) nicht ohne weiteres integriert werden kann. Hinzu kommt, dass weder der öffentliche Personenverkehr noch Fußgänger und Radfahrer von den produktreifen modellbasierten Netzsteuerungen direkt berücksichtigt werden können. Hier ist allerdings eine Kombination mit der lokalen regelbasierten Steuerung üblich, die die Belange des Öffentlichen Personenverkehrs und der Fußgänger und Radfahrer berücksichtigen kann.

Das Haupthemmnis sind allerdings die Kosten für die Implementierung. Diese würden größtenteils aufgrund der nötigen Umrüstung der Lichtsignalanlagen und des Verkehrsrechners anfallen. Die Einführung einer modellbasierten Netzsteuerung muss in der Regel über einen Sonderetat und nicht aus laufenden Mitteln finanziert werden. Hinzu kommt, dass aufgrund der als sehr kompliziert empfundenen Parametrierung ein höherer Personalaufwand als bei anderen Steuerungsarten erwartet wird.

Zudem fällt, aufgrund der hohen Kosten, die Kosten-Nutzen Abwägung oft negativ aus.

Die Schätzung der Kosten für die Einführung einer modellbasierten Netzsteuerung liegen zwischen 100.000 € (Nur Netzsteuerung, Systemtechnik bereits vorhanden) und 1.000.000 € (mit Austausch der Steuergeräte und der des Verkehrsrechners). Im Mittel werden Kosten von ca. 400.000 € angenommen.

Für die Betriebskosten in Form von Planung, Wartung und Erneuerung werden Mehrkosten, gegenüber der bisherigen Steuerung von 2.000 € bis zu 150.000 € erwartet. Im Mittel werden Mehrkosten von ca. 60.000 € erwartet.

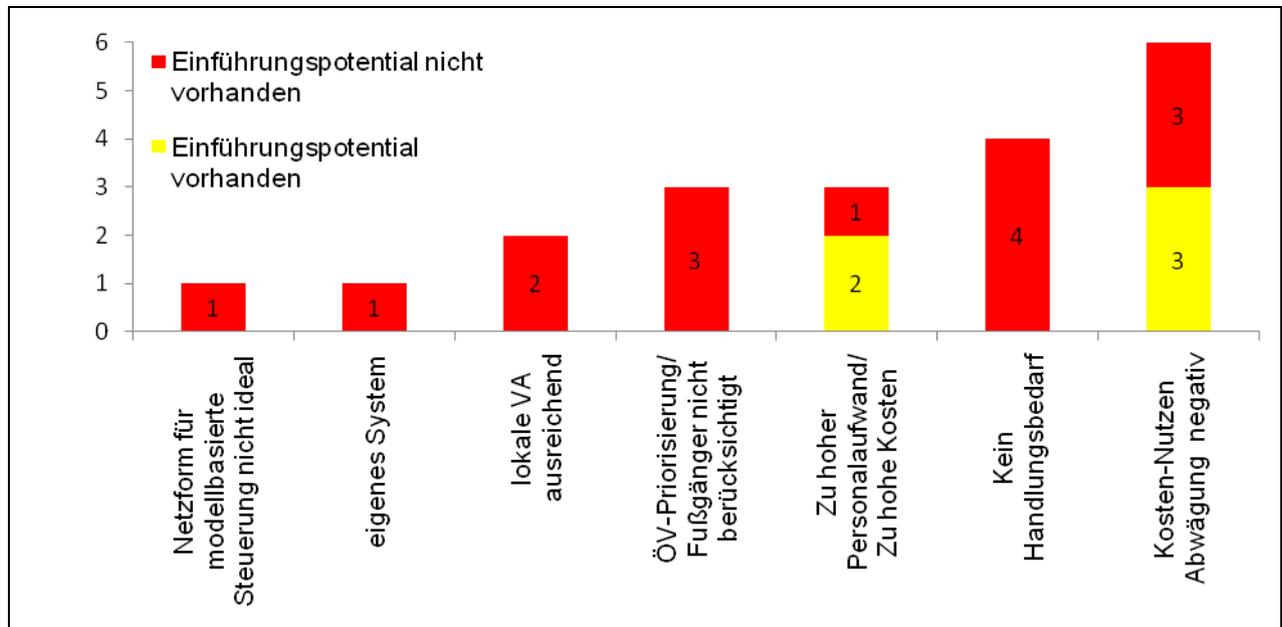


Abbildung 147: Einführungshemmnisse (Mehrfachnennung möglich).

Für die Parametrierung und Bedienung der Systeme sind in jedem Fall Schulungen nötig. Der Parametrierungsaufwand bleibt nach der ersten Implementierung bestehen, da auch weiterhin komplexe und sich ändernde Anforderungen bestehen. Eine Fehlersuche ist in der Regel sehr aufwändig. Durch die Anforderungen der Systeme werden allerdings auch Fehler und Schwächen der (Detektions-)Infrastruktur sichtbar, die vorher bereits vorhanden aber nicht erkannt wurden.

Allgemein wird von den modellbasierten Netzsteuerungen aufgrund ihrer hohen Flexibilität eine Verbesserung des Verkehrsablaufs erhofft. Insbesondere bei der Anzahl der Halte und damit bei den Emissionen werden hier Verbesserungen erwartet. Eine genaue Quantifizierung ist allerdings schwierig und aufwändig. Auch eine „Erfolgsgarantie“ kann nicht gegeben werden.

Die Erfahrungen der Städte, die eine modellbasierte Netzsteuerung eingeführt haben, scheinen allerdings positiv zu sein. In Hamburg sind inzwischen 3 Steuerungsgebiete umgesetzt. Bremerhaven und Münster planen derzeit ihr zweites Steuerungsgebiet.

12 Fazit und Handlungsempfehlungen

Monitoring der Wirkung

Die Erfassung von Kenngrößen für eine umfassende Bewertung erfordert die Fusion verschiedener Datenquellen.

Zur Erfassung der verkehrlichen Wirkungen (Fahrzeit, Anzahl Halte) haben sich die Kombination von Messfahrten mit GPS-Geräten (wenige Fahrzeuge werden exakt erfasst) und einer Kennzeichenerfassung mit ANPR-Systemen (für viele Fahrzeuge wird die Fahrzeit exakt erfasst) bewährt. Messfahrten allein genügen nur für kleinere Untersuchungen um eine ausreichende statistische Sicherheit zu erhalten. Hierfür sind je nach Erhebungsgebiet zwischen 20 und 80 Messfahrten pro Relation, Szenario und Tageszeitblock erforderlich. Zusätzlich sind lokale Verkehrsstärken notwendig, um die gemessenen Wirkungen zu quantifizieren. Die mikroskopische Simulation erweist sich als leistungsfähige Ergänzung der Feldversuche, ist aber sehr aufwändig.

Zur Erhebung kollektiver Fahrzeiten sind weniger aufwändige Methoden zu entwickeln.

Die im Rahmen von AMONES verwendeten Erhebungsmethoden haben einen sehr hohen Planungs- und Personalaufwand und erfordern den Einsatz teurer Geräte. Dies betrifft insbesondere die Messung der Fahrzeiten mit ANPR-Systemen. Im Bereich der Fahrzeitmessung werden derzeit andere Verfahren (Induktionsschleifensignaturen, Bluetooth) entwickelt, die vielversprechende Verbesserungen in diesen Bereichen erwarten lassen.

Für die Qualitätssicherung ist ein regelmäßiges Monitoring notwendig.

Für die Qualitätssicherung von Lichtsignalanlagen ist ein Qualitätsmanagement erforderlich, dass zum einen die Detektorinfrastruktur und zum anderen die verkehrlichen Wirkungen regelmäßig überprüft. Die Qualität einer verkehrsabhängigen Steuerung wird unmittelbar von der Qualität der gemessenen Eingangsdaten beeinflusst. Die verkehrlichen Wirkungen sind komplex und die Randbedingungen einer Lichtsignalanlage können sich im Laufe der Zeit ändern. Deswegen ist es notwendig regelmäßig Detektoren und Wirkungen zu prüfen. Dies gilt insbesondere bei Eingriffen in die Steuerung in Form von Vorher-/Nachher-Untersuchungen.

Verkehrliche Wirkungen

Die Anpassung des Signalprogrammrahmens an die aktuelle Verkehrsnachfrage ist wesentlich.

Die Ergebnisse aus den Felduntersuchungen und Simulationen, insbesondere diejenigen, die im virtuellen Testfeld ermittelt werden konnten, zeigen, dass eine Anpassung des Signalprogrammrahmens an die aktuelle Verkehrsnachfrage gerade bei höherer Auslastung am besten geeignet ist, die vorhandene Kapazität zu nutzen. In diesem Sinne hat die FZS mit einer tageszeitlich guten Anpassung an die Verkehrsnachfrage überraschend gute Ergebnisse erzielt. Vor diesem Hintergrund ist zu empfehlen, dass bei Neuprojektierungen oder Überarbeitungen

von Lichtsignalsteuerungen die Erfassung der Nachfragestrukturen und die Erarbeitung von gut angepassten Festzeitsteuerungen bzw. Rahmensignalplänen im Vordergrund stehen sollten.

Modellbasierte Steuerungsverfahren haben das größte Potenzial, benötigen aber eine aufwändige Kalibrierung.

Modellbasierte Steuerungsverfahren (NMS) haben das größte Potenzial, die vorhandene Kapazität bestmöglich zu nutzen, da sie den Rahmensignalplan im Grundsatz am feinsten an die variable Verkehrsnachfrage anpassen können. Für einige Zeitbereiche konnte dies sowohl in den Felduntersuchungen wie auch in den Simulationen eindrucksvoll nachgewiesen werden. Aufgrund der Schwierigkeit der Kurzfristprognosen der Verkehrsnachfrage sowie der präzisen Verkehrslagemodellierung gelingt diese Anpassung jedoch offensichtlich noch nicht durchgängig. Für den Einsatz von NMS bedeutet dies, dass eine aufwändige Kalibrierung und Validierung der Steuerung für gute Ergebnisse von großer Bedeutung ist. Für die Weiterentwicklung der modellbasierten Steuerungsverfahren wird empfohlen, das Augenmerk insbesondere auf die Verkehrslagemodellierung und die Kurzfristprognose unter dem Gesichtspunkt der Robustheit zu richten.

Lokale regelbasierte Steuerungsverfahren wirken bei der Anpassung an die Verkehrsnachfrage eher kontraproduktiv, können jedoch auf spezielle Anforderungen am besten reagieren.

Einerseits haben die Untersuchungen gezeigt, dass bei der LRS mit einer genauen Voranpassung der Rahmensignalprogramme an die Verkehrsnachfrage eine darüber hinaus gehende Anpassung an kurzfristige Schwankungen kontraproduktiv wirkt. Andererseits kann die LRS jedoch wesentliche Vorteile für bestimmte Situationen bieten, in denen eine Reaktion auf die Anforderung einzelner Fahrzeuge oder Verkehrsteilnehmer erforderlich ist. In gleicher Weise ist die LRS für die ÖPNV-Bevorrechtigung ohne Alternative. Die LRS sollte aus diesem Grund nicht für die Nachfrageanpassung sondern ausschließlich die Behandlung von besonderen einzelnen Anforderungen wie z. B. die Bedarfsphasenanforderung für Linksabbieger im Testfeld Hamburg eingesetzt werden. Durch eine solche Reduktion können die Signalprogramme auch einfacher und im Sinne des Qualitätsmanagements transparenter gestaltet werden.

ÖPNV-Bevorrechtigung ist mit modellbasierten Verfahren in Verbindung mit lokaler regelbasierter Steuerung realisierbar.

Für die ÖPNV-Bevorrechtigung ist die LRS ohne Alternative. Sie kann in Verbindung mit der NMS und FZS verwendet werden. Der Zielkonflikt zwischen der Beschleunigungswirkung für die ÖPNV-Fahrzeuge und der Verkehrsqualität für den übrigen Kfz-Verkehr ist dabei zu beachten. Die weitere Entwicklung der NMS sollte darauf gerichtet sein, deren in den Untersuchungen deutlich gewordenen Potenziale zum Ausgleich des Zielkonflikts zu verstetigen.

Ein einfacher Einstieg in die Nachfrageanpassung und geeignete Strategien für die Migration zu modellbasierten Steuerungsverfahren erscheinen sinnvoll.

Aus verkehrlicher Sicht ist die Anpassung der Rahmensignalprogramme an die variable Verkehrsnachfrage zielführend und sollte von den Betreibern der Lichtsignalanlagen angestrebt werden. Hierfür erscheinen Strategien, die eine Migration vom Bestandssystem über offline auch hinsichtlich der Netzkoordinierung optimierte Festzeitsteuerungen vorsehen, sehr geeignet. Die Auswahl der Programme kann im einfachsten Fall tageszeitabhängig oder mit zunehmendem Anspruch regelbasiert bzw. modellbasiert erfolgen. Über eine solche Migrationsstrategie werden Hemmnisse, die mit der Anschaffung neuer Systemtechnik verbunden sind, sowie auch Risiken, die aus der Einführung neuer anspruchsvoller Steuerungsverfahren resultieren, minimiert.

Umweltwirkungen**Eine Reduzierung der straßenseitigen Luftschadstoffimmissionen infolge einer angepassten LSA-Steuerung ist nachweisbar.**

Die Wirkungen einer reduzierten Verkehrsstärke, z. B. aufgrund einer Zuflusdosierung, und einer reduzierten Anzahl Halte in einer Knotenpunktzufahrt, z. B. aufgrund einer verbesserten Koordinierung, sind in straßenseitig gemessenen NO_x - und PM_x -Immissionen nachweisbar. Mit kurzzeitigen Eingriffen, z. B. gezielte Grünzeitverlängerungen, können kurzzeitige lokale Reduktionen der NO_x -Konzentration in einer Größenordnung von über 10 % realisiert werden; mit einer dauerhaft verbesserten Koordinierung erscheinen sogar deutlich höhere Reduktionspotenziale realisierbar. Für die PM_{10} - und $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration erzielen kurzzeitige Maßnahmen eine vernachlässigbare Reduktion von unter 5 %. Aufgrund der chemisch-physikalischen Eigenschaften von Partikeln erscheinen mittel- und langfristige Maßnahmen geeigneter. Je nach lokalem Verursacheranteil des Verkehrs sind mittels Zuflusdosierung oder Beschränkungen für den Schwerverkehr Reduktionspotenziale in einer Größenordnung von 5-10 % der Gesamtbelastung realisierbar.

Eine modellbasierte Netzsteuerung kann im Vergleich zu regelbasierten Verfahren bei der Reduzierung verkehrsbedingter Umweltwirkungen von Vorteil sein.

Bei entsprechender Parametrierung kann eine modellbasierte Netzsteuerung die Emissionen des Straßenverkehrs im gesamten Netz signifikant reduzieren. In Bezug auf die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte an Umwelt-HotSpots können modellbasierte Verfahren erweitert werden, um zeitlich und räumlich differenziert zur Reduzierung der Immissionen beizutragen. Dies kann z. B. durch eine Veränderung der Zielfunktion der modellbasierten Steuerung für bestimmte Netzabschnitte in Abhängigkeit der relevanten meteorologischen Parameter und der Hintergrundbelastung der jeweiligen Schadstoffe geschehen.

Die immissionsbezogenen Wirkungen verkehrlicher Maßnahmen hängen ebenso wie die Immissionen selbst, stark von meteorologischen Randbedingungen ab.

In beiden Testfeldern wurde ein erheblicher Einfluss meteorologischer Kenngrößen und insbesondere der lokal gemessenen Windgeschwindigkeit auf die untersuchten

Immissionskenngrößen festgestellt. Bei bestimmten meteorologischen Situationen, z. B. bei hohen Windgeschwindigkeiten und damit einhergehender guter Durchlüftung, ist der Einfluss des Verkehrs ebenso wie das Minderungspotenzial etwaiger Maßnahmen auf die Immissionsbelastung messtechnisch nur schwach erkennbar.

Wissenslücken bei der Erhebung umweltrelevanter Verkehrskenngrößen sind zu schließen.

Dies betrifft zum einen weitere Forschung hinsichtlich der Einflussgrößen auf die nicht-motorbedingte Partikelbelastung, die sich in ihren Eigenschaften deutlich von den weiteren untersuchten Immissionskenngrößen unterscheidet. Zum anderen betrifft dies Untersuchungen hinsichtlich der Eignung gängiger Kenngrößen zur Qualität des Verkehrsablaufs als Eingangsgrößen für die Immissionsmodellierung (z. B. die Eignung der Kenngröße „Anzahl Halte“ gegenüber der Kenngröße „Rückstaulänge“).

Zusammenhänge zwischen Verkehrskenngrößen und alternativen Messgrößen der Partikelkonzentration sind zu untersuchen.

Die Messgröße „Partikelanzahlkonzentration“ ist besser geeignet als die Messgröße „Partikelmassenkonzentration“, um die gesundheitlichen Wirkungen des Straßenverkehrs und entsprechender Minderungsmaßnahmen zu bewerten. Es ist zudem absehbar, dass diese Messgröße stärker mit den motorbedingten Partikelemissionen des Straßenverkehrs korreliert. Detaillierte Untersuchungen zu den Zusammenhängen zwischen Verkehrskenngrößen und Partikelanzahlkonzentration erscheinen daher sinnvoll.

Geeignete Detektionsverfahren zur Erhebung der umweltrelevanten Verkehrskenngrößen sind zu entwickeln.

Insbesondere im Bereich von Umwelt-HotSpots ist eine möglichst genaue Abschätzung der Umweltwirkungen verkehrlicher Maßnahmen empfehlenswert. Eine Detektion der Kenngröße „Verkehrsstärke“ ist hierfür nicht ausreichend. Bestehende Detektionsverfahren, z. B. die videobasierte Erfassung, sind ggfs. weiterzuentwickeln, um den Verkehrsablauf und die Verkehrszusammensetzung im Bereich von Umweltmessstellen in hoher Qualität zu erfassen. Diese hochwertige Datengrundlage kann zur Erhöhung der Aussagekraft gängiger Emissions- und Immissionsmodellierungen eingesetzt werden.

Modellbasierte Steuerungsverfahren sollten dynamisch auf bestimmte Umweltsituationen reagieren können.

Die Wirkungen einer Lichtsignalsteuerung in Form einer Zuflussdosierung und/oder einer verbesserten Koordinierung sollten in Abhängigkeit des Grenzwertüberschreitungsrisikos und der Betroffenheit bestimmter Gebiete gezielt und zeitlich sowie räumlich differenziert eingesetzt werden, um die Umweltbelastung des Straßenverkehrs zu mindern. Eine situationsabhängige Gewichtung der Zielgrößen der modellbasierten Steuerung kann dies grundsätzlich ermöglichen.

Handhabbarkeit

Die Evaluierung von LSA-Steuerungen mittels mikroskopischer Simulation ist aufwändig aber sehr empfehlenswert.

Die Kalibrierung eines Mikrosimulationsszenarios mit mehreren Knoten und komplexer LSA-Steuerung ist aufwändig und schwierig. Sie setzt zudem eine umfangreiche und geeignete empirische Datengrundlage voraus. Nach erfolgreicher Kalibrierung können jedoch mit der Mikrosimulation unterschiedliche Steuerungsszenarios verglichen und statistische signifikante Unterschiede zwischen diesen nachgewiesen werden. Ein Vergleich unterschiedlicher Steuerungsszenarios im realen Straßenraum ist dagegen oftmals nur sehr eingeschränkt möglich. Während bei einer empirischen Messung aus Aufwandsgründen in der Regel nur die Fahrzeuge auf wenigen Relationen betrachtet werden können, ermöglicht es die Simulation zudem, die Wirkungen der Steuerung auf alle Fahrzeuge im Untersuchungsnetz zu betrachten.

Die Parametrierung (Versorgung) der modellbasierten Verfahren ist sehr aufwendig und schwer zu durchschauen. Dies wird von potentiellen Anwendern als eindeutige Barriere für eine mögliche Nutzung gesehen.

Die Parametrierungsmöglichkeiten der modellbasierten Steuerungsverfahren sind sehr komplex. Dadurch ergibt sich prinzipiell die Möglichkeit, über eine Vielzahl von Stellschrauben das System optimal an die eigenen Bedürfnisse anzupassen. Auf der anderen Seite besteht aber auch der Zwang, die Parameter zunächst mit sinnvollen Werten zu versehen. Zudem sind die Auswirkungen von Änderungen an den einzelnen Parametern in den aktuellen Systemen oft nur schwierig bzw. nicht vollständig vorhersehbar. Somit sind auch erfahrene Anwender bei der Parametrierung auf die Hilfe der Hersteller und auf ein „Ausprobieren“ zur Ermittlung der optimalen Einstellungen angewiesen. Hier sind die Hersteller gefragt, die Akzeptanz und die Nutzbarkeit der Verfahren durch Verbesserungen bei der Transparenz bzgl. der Wirkungen von Parametereinstellungen und durch eine bessere Dokumentation zu erhöhen.

Einsatzbereich und Implementierungsstrategien

Bei der Einführung eines neuen LSA-Steuerungsverfahrens sind eine strukturierte Vorgehensweise und die Durchführung begleitender Untersuchungen zur Wirkungsermittlung empfehlenswert.

Um die Wirkungen einer Steuerung im Vorfeld abschätzen und im Anschluss nachweisen zu können, wird ein strukturiertes Vorgehen mit Simulationsstudie und empirischer Vorher-Nachher-Untersuchung empfohlen. Nachfolgende Auflistung stellt eine aus fachlicher Sicht sinnvolle Vorgehensweise dar:

- Analyse der Ist-Situation:
 - Randbedingungen klären (vorhandene Infrastruktur, Verkehrsmanagement, ÖPNV)
 - Charakterisierung der Nachfrage- und Netzstruktur
 - ggfs. Segmentierung/Strukturierung des Netzes
 - Vorher-Messung

- Wahl des geeigneten Steuerungsverfahrens (evtl. verschiedene je nach Strukturierung, evtl. Stufenlösungen vorsehen)
- Wirkungsabschätzung und Vorparametrierung (Simulation)
- Installation, Inbetriebnahme mit intensiver Begleitung
- Nachher-Messung
- Regelmäßige Qualitätsüberwachung

Empfehlungen zur Auswahl geeigneter Steuerungsverfahren.

Basierend auf den Ergebnissen aus den drei Testfeldern, Erkenntnissen aus der Literatur und Erfahrungen von Herstellern und Anwendern lassen sich zu den in Kapitel 6 aufgeführten Typisierungskriterien folgende Empfehlungen zur Auswahl eines LSA-Steuerungsverfahrens ableiten:

Steuerungsverfahren	FZS	LRS	LMS	NRS	NMSA	NMS
Nachfragestruktur						
• Tageszeitabhängige Variabilität	+	+	+	+	/	/
• Räumliche Variabilität	-	o	o	+	+	+
• Situationsabhängige Variabilität (z. B. bei Veranstaltungen)	-	-	o	o	o	+
• Regelmäßige Überstauung mehrerer Zufahrten eines Knotenpunktes	o	o	+	o	o	+
Netzstruktur						
• Keine Alternativrouten (geringe Vermaschung)	+	+	+	/	/	/
• Vorhandene Alternativrouten (hohe Vermaschung)	-	o	+	+	+	+
• Vorhandene Rückstauräume mit unterschiedlicher Betroffenheit (in Bezug auf die Umweltbelastung) oder unterschiedlichem Grenzwertüberschreitungsrisiko	-	-	-	+	+	+
Ziele der Steuerung						
• Umweltkriterien sollen berücksichtigt werden	-	o	+	o	+	+
• Situationsabhängige Optimierung spezifischer Kenngrößen (Anzahl Halte, Wartezeit, ÖV-Wartezeit)	-	o	+	o	o	+
Gewünschte Funktionalitäten						
• Anpassung der LSA-Steuerung an übergeordnete Strategien einer Verkehrsleitzentrale (z. B. Schaltung strategiekonformer Hauptrouten)	-	o	o	+	+	+
• Situationsabhängige Zuflussdosierung durch Pfortneranlagen (z. B. bei bestimmten umweltbezogenen Randbedingungen)	-	-	-	+	+	+
• Situationsabhängige ÖV-Priorisierung	-	+	+	+	+	+
„+“ geeignet	„o“ bedingt geeignet	„-“ nicht geeignet	„/“ nicht erforderlich			

Tabelle 96: Empfehlungen zur Auswahl geeigneter Steuerungsverfahren.

13 Glossar

Adiabatischer Gradient

Der (trocken)adiabatische Temperaturgradient lässt sich an dem Aufstieg eines Luftpakets modellhaft veranschaulichen: Bei einer adiabatischen Zustandsänderung tauscht das Luftpaket keine Wärme mit seiner Umgebung aus. Wärmeänderungen im Luftpaket können folglich nur durch Änderung der inneren Energie erfolgen. Beim Aufstieg in Höhen mit geringerem Luftdruck dehnt sich das Luftpaket aus und benötigt hierfür Energie. Die Energieabgabe führt wiederum zu einer Abkühlung des Luftpakets. Bei einem trockenadiabatischen Aufstieg kühlt sich ein Luftpaket gemäß dem trockenadiabatischen Temperaturgradienten ab, der bei etwa 1°C pro 100 Meter Höhendifferenz liegt. Steigt z. B. ein Luftpaket 1000 Meter auf, so nimmt seine Temperatur um rund 10°C ab.

Alarmschwelle

Grenzwert der Luftqualität bei dessen Überschreitung bereits bei kurzzeitiger Exposition eine Gefahr für die Gesundheit besteht [39. BImSchV].

Autokorrelation

Werte zum Zeitpunkt t sind hochgradig von Werten zum Zeitpunkt $t-1$ abhängig. Nach Schönwiese [2006] kann eine hohe Autokorrelation zu einer Überschätzung der Signifikanz bei Signifikanztests im Zuge von Korrelations- und Regressionsuntersuchungen führen.

Beurteilungsschwelle (obere / untere)

Kenngroße der Luftqualität nach der unterschiedliche Beurteilungsmethoden unterschieden werden: Zwischen der oberen und unteren Beurteilungsschwelle ist eine Kombination aus Messungen und Modellierungen möglich. Unterhalb der unteren Beurteilungsschwelle sind Modellierungen ausreichend.

Emissionskennfeld

Nach van Bashuysen [2007] sind die Rohemissionen und/oder die Emission hinter dem Katalysator der gesetzlich geregelten Schadstoffe Gegenstand von Emissionskennfeldern. Die Emissionskennfelder beschreiben die Emissionen in Abhängigkeit bestimmter operativer Parameter wie der Drehzahl oder dem Luft-Kraftstoff-Verhältnis.

Fahrzeit

Zeit die ein Verkehrsteilnehmer benötigt, um von einem Querschnitt A zu einem Querschnitt B zu gelangen. Diese Zeit ist die Summe aus Verlustzeit und Wunschfahrzeit.

GEH

GEH-Wert, benannt nach Geoffrey E. Havers. Ein selbstskalierender Abstandswert zwischen zwei Größen, der sich dazu eignet die Abstände von Verkehrsstärken zu bewerten. Dieser Wert

zeichnet sich besonders dadurch aus, dass er für hohe wie niedrige Verkehrsstärken gleichermaßen ein plausibles Abstandsmaß liefert (siehe auch UK Highway Agency [1996]).

Heteroskedastizität

Heteroskedastizität bezeichnet die Abhängigkeit der Varianz der Residuen vom Wert der unabhängigen Variablen. In der Regressionsanalyse führt dies zu ineffizienten Schätzungen und zu Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Standardfehler von Regressionskoeffizienten [Rudolf, Müller 2004].

KenngroÙe

Die KenngroÙe ist eine Maßzahl, die zur Quantifizierung eines Zustandes oder Vorgangs dient, wie z. B. die Partikelkonzentration. Für präzise Aussagen ist es zweckmäßig, die KenngroÙe immer im Zusammenhang mit der MessgroÙe aufzuführen, zum Beispiel als „Massenkonzentration der Partikelbelastung“.

Knotenpunkt

Die Kreuzung oder Verbindung zweier Strecken.

Kollinearität

Wechselseitige Abhängigkeit von Variablen im Rahmen multipler Analyseprozesse [Rudolf, Müller 2004].

Kovarianz

Die Kovarianz beschreibt die gemeinsame Streuung zweier Variablen. Im Gegensatz zur Varianz kann die Kovarianz positive oder negative Werte annehmen [Voß, Buttler 2004]. Bei der Kreuzkovarianz wird analog zur Kreuzkorrelation eine zeitliche Verschiebung τ der beiden Zeitreihen eingeführt, so dass die Kovarianz unterschiedlicher Phasen untersucht werden kann.

Messdauer (temporär/permanent)

Die Messdauer und damit die Art und die Installation der verwendeten Geräte wird zwischen einer temporären und einer permanenten Messdauer oder Messung unterschieden.

MessgroÙe

Die MessgroÙe ist diejenige physikalische GröÙe, der eine Messung gilt. Bezogen auf die KenngroÙe (siehe Definition) Partikelkonzentration kann dies z. B. die Massenkonzentration mit der Dimension $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sein; Bezogen auf die KenngroÙe Verkehrssituation kann dies z. B. die Anzahl der Anfahrvorgänge von Lkw als dimensionslose GröÙe sein.

Messmethode (direkt/indirekt)

Als direkte Messmethoden werden Methoden bezeichnet die Kenngrößen ohne Verwendung eines Modells oder anderweitiger komplexer Zusammenhänge erfassen. Als Beispiele sind die Messung von lokalen Geschwindigkeiten, Verkehrsstärken aber auch Fahrzeiten aus Kennzeichenerfassungssystemen zu nennen. Eine indirekte Messung findet sich bei der Schätzung des Rückstaus aus Zufluss, Belegungsgrad und Signalzeitplänen.

Messwert (lokal/momentan/mobil)

Ein lokaler Messwert ist unter anderem die an einem Querschnitt erfasste Verkehrsstärke über die Zeit. Momentane Messwerte entsprechen einem Schnappschuss aus einem Flugzeug und beschreiben den Zustand an allen Orten, aber nur zu einem Zeitpunkt. Die in der Praxis eingesetzte Erfassung von Streckenabschnitten mit Videokameras entspricht der Definition einer momentanen Messung, wobei hier zusätzlich auch über die Zeit hinweg beobachtet wird. Mobile Messwerte bewegen sich zeitlich und räumlich und werden durch FCD repräsentiert.

OLS-Schätzer (Ordinary-Least-Squares-Schätzer)

Die Parameter einer zu schätzenden Funktion werden so bestimmt, dass die Summe der quadrierten Residuen minimal wird [Rudolf, Müller 2004].

Prädiktorvariable

Nach Rudolf, Müller [2004] wird bei der Regressionsanalyse zwischen abhängigen Kriteriums- oder Zielvariablen und zwischen unabhängigen Prädiktor- oder Einflussvariablen unterschieden.

Reisezeit

Zeit die ein Verkehrsteilnehmer benötigt, um von dem Start (z. B. Wohnung) zu dem Ziel (z. B. Arbeitsplatz) seiner Fahrt bzw. „Reise“ zu gelangen.

Richtungsbezogener Messquerschnitt (RMQ)

Straßenquerschnitt an dem richtungsbezogene Zählwerte vorliegen.

Route

Eine Route ist eine gerichtete zusammenhängende Abfolge von Strecken oder Knotenpunkten.

Strahlungswetterlage

Als Strahlungswetterlage wird eine Wetterlage mit hohem Luftdruck bei geringer Bewölkung und niedrigen Windgeschwindigkeiten bezeichnet.

Strecke

Eine Strecke ist die Verbindung zwischen zwei Knotenpunkten.

Suppression

Unabhängige Variablen erhöhen den Erklärungsbeitrag anderer Prädiktoren, indem sie irrelevante Varianzanteile dieser Variablen kompensieren [Rudolf, Müller 2004].

Toleranzmarge

Ein im jährlichen Intervall abnehmender Wert, um den der Immissionsgrenzwert innerhalb bestimmter Fristen überschritten werden darf, ohne dass Luftreinhaltepläne erstellt werden müssen.

Trajektorie

Eine Trajektorie ist eine gerichtete Abfolge von Positionen und den zugehörigen Zeitpunkten (Weg-Zeit-Verlauf).

Verlustzeit

Differenz zwischen Fahrzeit und Wunschfahrzeit.

Weg-Zeit-Verlauf

Siehe Trajektorie.

Wunschfahrzeit

Zeit die ein Verkehrsteilnehmer ohne Störungen z. B. durch andere Verkehrsteilnehmer oder Lichtsignalanlagen benötigt, um von einem Querschnitt A zu einem Querschnitt B zu gelangen.

14 Literatur

22. BImSchV 2002, Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes: Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft, vom 11. September 2002 (BGBl I, S. 3626).
39. BImSchV - Bundesregierung 2010: Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen – 39. BImSchV).
- Akkan, Z., Voss, J. U., Kalberlah, F., Mayer, H., Rost J. 2004, Luftqualitätsindex für langfristige Wirkungen (LAQx) - Modell und Anwendung für ausgewählte Orte in Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe.
- Aldrin, M., Haff, I. H. (2005): Generalised additive modelling of air pollution, traffic volume and meteorology. In: Atmospheric Environment, Jg. 39, H. 11.
- Anke, K., Illgen, A., Sähn, E., Klingner, M. 2004, Auswertung von Immissionsdatensätzen aus automatischen Messstationen in Baden-Württemberg auf Basis von Screeningfunktionen, Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- Bächlin, W., Müller, W. J., Lohmeyer, A. 2000, Vergleich von Modellanwendungen zur Berechnung von Immissionswerten innerhalb eines beidseitig bebauten Straßenquerschnitts, Förderkennzeichen PEF29707 und BWE99002, Projektträgerschaft Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung.
- Bächlin, W., Frantz, H., Lohmeyer, A., Dreiseidler, A., Baumbach, G., Theurer, W., Heits, B., Müller, W. J., Giesen, K. -P. 2003, Feinstaub und Schadgasbelastungen in der Göttinger Straße, Hannover, Hannover.
- BAFU – Bundesamt für Umwelt (Schweiz) 2006, PM10 - Fragen und Antworten zu Eigenschaften, Emissionen, Immissionen, Auswirkungen und Maßnahmen.
- Baltes-Götz, B. 2008, Lineare Regressionsanalyse mit SPSS. Universitäts-Rechenzentrum Trier.
- van Basshuysen, R. 2007, Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven (4., aktualisierte und erw. Aufl.), ATZ-MTZ Fachbuch, Vieweg Verlag, Wiesbaden.
- bast - Bundesanstalt für Straßenwesen 1999, Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen - MARZ, Bergisch Gladbach.
- bast – Bundesanstalt für Straßenwesen 2006, Datenbank MARLIS - Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft in Bezug auf Immissionen an Straßen, Bergisch-Gladbach.
- bast – Bundesanstalt für Straßenwesen 2008, Einfluss von Straßenzustand, meteorologischen Parametern und Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PMx-Belastung an Straßen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Verkehrstechnik: V174, Bericht zum Forschungsprojekt FE 02.265/2005/LRB, Bergisch-Gladbach.

- Baum, A., Hasselko, H., Becker, R., Weidner, W. 2006, PM_x-Belastungen an BAB, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast) V137, Bergisch Gladbach.
- Baum, A. 2008, Einfluss meteorologischer und verkehrlicher Parameter auf die Partikelbelastung an BAB, Fachtagung Luftqualität an Straßen, Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Bergisch Gladbach.
- Baum, A., Dutzi, R., Ropertz, A., Suritsch, N. 2009, Einfluss von offenporigem Asphalt (OPA) auf die Feinstaubbelastung an Straßen, Bergisch-Gladbach.
- Baumüller, J., Reuter, U. 1995, Die summarische Bewertung von Luftschadstoffen durch einen Luftbelastungsindex. In: Staub. Reinhaltung der Luft, 55(4).
- Bertaccini, P., Dukic, V., Ignacollo, R. 2009, Modeling the short-term Effect of Traffic on Air Pollution in Torino with generalized additive Models, ICER Working Paper Series: Working Paper No. 10/2009.
- Bielefeldt, Keller, Philipps, Ploss (1986), Projektstudie zur Entwicklung eines verkehrsabhängigen Steuerungsverfahrens MOTION, im Auftrag der Siemens AG, München.
- Birmili, W. 2006, Räumlich-zeitliche Verteilung, Eigenschaften und Verhalten ultrafeiner Aerosolpartikel (<100nm) in der Atmosphäre, sowie die Entwicklung von Empfehlungen zu ihrer systematischen Überwachung in Deutschland, Forschungsbericht 203 43 257/05 des Umweltbundesamts, Dessau-Roßlau.
- BImSchG 2002, Bundes-Immissionsschutzgesetz - Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnlichen Vorgängen, zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 25. Juni 2005 (BGBl I, Nr. 39, S. 1865).
- Bohlen, S., Winkler, J., Lauterbach, H., Wehrse, R., Osmers, J., Endler, D., Giesen, K.-P., Heits, B., Klasmeier, E., Haase, D., Müller, W.J. 2004, PM₁₀-Messprogramm Bremerhaven 2003, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ), Der Senator für Bau und Umwelt Bremen, Bremen.
- Boltze, M., Schäfer, P. K., Wolfemann, A. 2006, Leitfaden für die Planung und Nutzung der Telematik für kommunale Planungsträger zur Verbesserung der Verkehrsbedingungen in Städten, Gemeinden und Landkreisen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.
- Boltze, M., Busch, F., Friedrich, B. Friedrich, M. 2007, Summer School Verkehr 2007 „Verkehrsbeeinflussung in Netzen“, Kursunterlagen, Herrsching (D), September 2007.
- Boltze, M., Dunker, L., Everts, K., Kaemmerer, H., Ruhnke, D. 1987, Kraftstoffeinsparungen an Lichtsignalanlagen, Straßenverkehrstechnik, Heft 3/1987, Kirschbaum-Verlag, Bonn.
- Bortz, J., Weber, R. 2005, Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Mit 242 Tabellen. 6., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl.: Springer Medizin (Springer-Lehrbuch). Heidelberg.
- Braun, R., Weichenmeier, F. 2005, Automatische Offline-Optimierung der lichtsignaltechnischen Koordinierung des mIV im städtischen Netz unter Verwendung genetischer Algorithmen, Straßenverkehrstechnik, Heft 05/2005, Kirschbaum-Verlag, Bonn.

- Braun, R. 2006, Projektsteckbrief Travolution, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, TU München.
- Braun, R., Kemper, C. 2008, GALOP-Online – ein Genetischer Algorithmus zur netzweiten Online-Optimierung der Lichtsignalsteuerung, HEUREKA'08, Stuttgart.
- 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 06/2009, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn.
- Bremen – Freie Hansestadt Bremen 1999, Messprogramm Verkehrsimmissionen 1999, Der Senator für Bau und Umwelt, Bremen.
- Bremen – Freie Hansestadt Bremen 2000, Messprogramm Verkehrsimmissionen 2000, Der Senator für Bau und Umwelt, Bremen.
- Bremen – Freie Hansestadt Bremen 2006, BLUES – Das Bremer Luftüberwachungssystem: Messprogramm Verkehrsstation Stresemannstraße in Bremerhaven, Der Senator für Bau, Umwelt und Verkehr, Bremen.
- Bremen – Freie Hansestadt Bremen 2006, Luftreinhalte- und Aktionsplan Bremen, Senator für Bau Umwelt und Verkehr, Bremen.
- Brilon, W. 2007, Differenzierte Bewertung der Qualitätsstufen im HBS im Bereich der Überlastung, Forschungsprojekt FE 02.259/2005/ARB der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Brilon, W., Wietholt, Th. 2009, Evaluierung (Erfolgskontrolle und Bewertung) der Grünen Wellen im Zuge der Modellachse Albersloher Weg in Münster mittels Reisezeitmessung, http://www.muenster.de/stadt/stadtplanung/pdf/albersloher-weg_1sa_bericht2009-01.pdf.
- Bringfielt, B., Backström, H., Kindell, S., Omstedt, G., Persson, C., Ullerstig, A. (1997): Calculations of PM10-concentrations in Swedish cities - Modelling of inhalable particles (Report number RMK No. 76). Norrköping, Schweden.
- Burgeth, G., Cyrol, W., Müller, J., Duttlinger, W. 2008, Photokatalytisch funktionale Oberflächen zur Reduktion von Stickoxiden und Ozon, Tagungsband zu: Luftqualität an Straßen, Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Bergisch-Gladbach.
- Busch F., Kruse G. 1993, "MOTION – ein neues Verfahren für die städtische Lichtsignalsteuerung und seine Erprobung im Rahmen des EG-Programms ATT", HEUREKA'93, Karlsruhe.
- Busch, F., Kruse, G. 2002, MOTION for SITRAFFIC – Optimierung der Lichtsignalsteuerung im Einsatz, HEUREKA'02, Karlsruhe.
- Cerwenka (1997): Anwendungsorientierte Ermittlung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Kraftfahrzeugverkehrs in Deutschland für die Neufassung der RAS-W (EWS). In: Straßenverkehrstechnik, Jg. 41, H. 1.
- Cobian, R., Henderson, T., Mitra, S., Nuworsoo, C., Sullivan, E. 2009, Vehicle Emissions and Level of Service Standards: Exploratory Analysis of the Effects of Traffic Flow on Vehicle Greenhous Gas Emissions. ITE Journal, (4), 30–41.

- COPERT – Kouridis, C., Ntziachristos, L., Samaras, Z. 2000, COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport. Copenhagen.
- Corani, G. 2005, Air quality prediction in Milan: Feed-forward neural networks, pruned neural networks and lazy learning. *Ecological Modelling*, 185(2-4).
- Cyrus, J., Hochadel, M., Gehring, U., Hoek, G., Diegmann, V., Brunekreef, B. 2005, GIS-Based Estimation of Exposure to Particulate Matter and NO₂ in an Urban Area: Stochastic versus Dispersion Modeling, *Environmental Health Perspectives*, 113(8).
- Diakaki, C., Dinopoulou, V., Papageorgiou, M. 2002, Signal Management in Real Time for urban traffic Networks, Deliverable N°:7.
- Diegmann, V., Pfäfflin, F., Wiegand, G., Wursthorn, H., Dünnebeil, F., Helms, H., Lambrecht, U. 2007, Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub und Stickstoffdioxid, IVU Umwelt GmbH, Freiburg.
- Diegmann, V., Gäßler, G., Pfäfflin, F. 2009a, From Traffic Management to Environmental Traffic Management. In mobil.TUM 2009 - International Scientific Conference on Mobility and Transport. München.
- Diegmann, V., Mahlau, A., Neunhäuserer, L., Pfäfflin, F., Wursthorn, H. 2009b, Leitfaden Modellierung verkehrsbedingter Immissionen: - Anforderungen an die Eingangsdaten, Freiburg.
- Dineen, M. 2000, Real-Time Disply of Dublin Traffic Information on the Web.
- DRIVE'91 1991, The Drive Programme in 1991, Brussels.
- Dünnebeil, F., Lambrecht, U., Kessler, C. 2007, Zukünftige Entwicklung der NO₂-Emissionen des Verkehrs und deren Auswirkung auf die NO₂-Luftbelastung in Städten in Baden-Württemberg, ifeu - Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg.
- Düring, Lohmeyer 2001, Validierung von PM₁₀-Immissionsberechnungen im Nahbereich von Straßen und Quantifizierung der Feinstaubbildung von Straßen, Karlsruhe.
- Düring, I., Nitzsche, E., Moldenhauer, A., Stockhause, M., Lohmeyer, A. 2004, Berechnung der Kfz-bedingten Feinstaubemissionen infolge Aufwirbelung und Abrieb für das Emissionskataster Sachsen, Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe.
- Düring, I. 2006, Aktuelle Ergebnisse zu Messungen der PM₁₀- und NO₂-Konzentrationen an Stadtstraßen und der Korrelation zu Verkehrs- und Wetterdaten, Veranstaltung der Heureka-Stiftung: Praktische Erfahrungen zur Verringerung der verkehrsbedingten Luftschadstoffbelastung in Städten, Berlin.
- Düring, I. 2007, Quantifizierung des Einflusses von verkehrsplanerischen Maßnahmen auf die PM₁₀-Konzentrationen an Straßen: Wirkungsanalysen zum Straßenzustand, Verkehrsfluss und Fahrzeuggeschwindigkeit unter realen Bedingungen, PM₁₀-Workshop Reinhardtsgrimma.
- Düring, I., Pöschke, F., Lohmeyer, A., 2009: Einfluss von verkehrsberuhigenden Maßnahmen auf die PM₁₀-Belastung an Straßen. FE 77.486/2006. Bergisch-Gladbach 2009.
- Eickelpasch, D., Eickelpasch G. 2004, Feststellung und Bewertung von Immissionen. Leitfaden zur Immissionsüberwachung in Deutschland, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungsbericht 200 42 261, Berlin.

- Federal Highway Administration 2004, Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software. Report FHWA-HRT-04-040, Washington, D.C.
- Fellendorf, M., Vortisch, P. 2000, Integrated Modeling of Transport Demand, Route Choice, Traffic Flow and Traffic Emissions, Seventy-Ninth Annual Meeting of the Transport Research Board, Transport Research Board, Washington.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 1991, Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr Ausgabe 1991, Köln.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 1992, RiLSA, Richtlinien für Lichtsignalanlagen, FGSV Verlag, Köln.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2002, Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) Ausgabe 2001, Fassung 2005, Köln.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2003, RiLSA, Richtlinien Lichtsignalanlagen, Teilfortschreibung FGSV Verlag, Köln.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2005, Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung (MLuS02), geänderte Fassung 2005, Köln.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und Zustandsbewertung von Straßen (ZTV ZEB-StB) (2006). Köln.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2006b, Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, FGSV Verlag, Köln.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2010, Entwurf der RiLSA, Richtlinien für Lichtsignalanlagen, FGSV Verlag, Köln.
- Fitz, D. R. 2001, Measurements of PM10 and PM2,5 Emission Factors from paved Roads in California. Final report contract No. 98-723. Sacramento, CA.
- Flassak, T., Bächlin, W., Bösinger, R., Blazek, R., Schädler, G., Lohmeyer, A. 1996, Einfluss der Eingangparameter auf berechnete Immissionswerte für Kfz-Abgase: Sensitivitätsanalyse, Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung, Karlsruhe.
- Fleer, H. 1983, Das Kreuzspektrum, In: Deutscher Wetterdienst (Hg.): promet. Meteorologische Fortbildung: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes (1), S. 30–33, Offenbach am Main.
- Friedrich, B. 1999, Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen, Dissertation, Schriftenreihe des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, München.
- Friedrich, B. 2000, Steuerung von Lichtsignalanlagen: BALANCE – ein neuer Ansatz, Straßenverkehrstechnik, Heft 7/2000, Kirschbaum Verlag, Bonn.
- Friedrich, B. 2002, Verkehradaptive Steuerung von Lichtsignalanlagen - Ein Überblick - . Festschrift zum Ehrenkolloquium für Univ.- Prof. Dr./UCB Hartmut Keller 1.3.2002 an der TU

München, Veröffentlichungen des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, München.

Friedrich, M. 2009, Verkehrstechnik und Verkehrsleittechnik, Vorlesungsskript Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart.

Friedrich, M., Jehlicka, P., Schlaich, J. 2009, Erfassung von Verkehrsdaten mit automatischen Kennzeichenerfassungssystemen, Straßenverkehrstechnik, Heft 12/2009, Kirschbaum Verlag, Köln.

Fürbeth V., Großer W., Kolb W., Burger H., 1993, Lkw-Anfahrbeschleunigungswerte für die Praxis, VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik Ausgabe 7/8 Jahrgang 1993, Kippenheim.

Galatioto, E., Zito, P. 2007, Traffic Parameters Estimation to Predict Road Side Pollutant Concentrations using Neural Networks, Springer Science + Business Media.

Gartner, N.H. 1982, Prescription for Demand-Responsive Urban Traffic Control, Transportation Research Report Nr. 881.

Grimm Aerosol Technik GmbH & Co. KG 2007, Handbuch zum Spectrometer 107, Ainring.

Grivas, G., Chaloulakou, A. 2006, Artificial neural network models for prediction of PM10 hourly concentrations, in the Greater Area of Athens, Greece. Atmospheric Environment, 7/2006.

Gustafsson, M., 2001, Non-exhaust particles in the road environment. A literature review. Linköping, Swedish National Road and Transport Research Institute, Schweden.

Heidelberg Cement 2008, TioCem® mit TX Active® – High-Tech-Zement zur Reduktion von Luftschadstoffen, Posterbeitrag in: Luftqualität an Straßen, Bergisch-Gladbach.Heidelberg.

Hamburg – Freie und Hansestadt Hamburg 2004, Luftreinhalteplan für die Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg.

Hamburg – Freie und Hansestadt Hamburg 2005, Aktionsplan gegen Belastungen durch Feinstaub - Hamburg / Habichtstraße, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg.

Hirschmann, K., Felldendorf, M. 2009, Emission minimizing traffic control – simulation and measurements, mobil.TUM2009 International Scientific Conference on Mobility and Transport ITS for larger Cities, München.

HLUG – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, o. J., Begriffsbestimmungen zur Ausbreitungsrechnung, Wiesbaden.

HLUG – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2009, Merkblatt - Eingangsdaten für eine Immissionsabschätzung mit IMMISLuft, Wiesbaden.HLUG – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie 2007a, Feinstaub (PM10) Eigenschaften - Quellen - gesundheitliche Bewertung - Immissionen, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden.

Holmes, N. S., Morawska, L. 2006, A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available, Atmospheric Environment, 30/2006.

HORIBA Ltd. 2007, Handbuch zum NO_x-Analysator Modell APNA-370, Oberursel.

- Hoyer, R., Kühnel, C. 2008, Floating Car Observer - Perspektiven seiner Umsetzung, Tagungsband zur HEUREKA 2008, FGSV-Verlag, Köln.
- Hrust, L., Klaić, Z. B., Krizan, J., Antonic, O., Hercog, P. 2009, Neural network forecasting of air pollutants hourly concentrations using optimised temporal averages of meteorological variables and pollutant concentrations, *Atmospheric Environment*, 35/2009.
- HU Hamburg – Institut für Hygiene und Umwelt 2006a, Erhöhte Luftbelastung auch im Umfeld von stark befahrenen Straßen, Aktuelle Themen 2005/2006, Hamburg.
- HU Hamburg – Institut für Hygiene und Umwelt 2006b, Feinstaub / PM₁₀ - Erste Bilanz nach Inkrafttreten der Grenzwerte, Hamburger Luftmessnetz, Hamburg.
- Hunt, P.B., Robertson, D.I., Bretherton, R. D., Winton R.I. 1981, SCOOT - a traffic responsive method of co-ordinating signals, TRL Laboratory Report 1014.
- INFRAS 2010, CD-ROM Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs 3.1 (HBEFA), INFRAS, Bern.
- IVU Umwelt GmbH 2010, IMMIS em – Eingangsgrößen, www.immis.de/immisluft/immision.htm, 2010, Freiburg.
- Jain, A., Dubes, R. 1988, Algorithms for Clustering Data, Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall.
- Kaminski, U. 2005, Minderung von Feinstaub in der Luft: Was können Dieselrußfilter beitragen?, GAW Brief des Deutschen Wetterdienstes Nr. 28, Offenbach.
- Kantamaneni, R., Adams, G., Bamesberger, L., Allwine, E., Westberg, H., Lamb, B., et al. 1996, The measurement of roadway PM₁₀ emission rates using atmospheric tracer ratio techniques, *Atmospheric Environment*, 24/1996.
- Karajan, R. H. 2007, Schadstoffreduktion durch verbesserte Signalsteuerung des Straßenverkehrs, Stuttgart.
- Kemper, C. 2008, Beantwortung eines Fragebogens.
- Kimber, R. M., Hollis, E. M. 1979, Traffic Queues and Delays at Road Junctions. TRRL Laboratory Report 909.
- Klingner, M., Sähn, E. 2005, Feinstaub: Vom Winde verweht. Präsentation im November 2005 bei der IHK Darmstadt.
- Klingner, M., Sähn, E. 2006, Auswirkungen ordnungsrechtlicher Verkehrsmaßnahmen auf die lokale Feinstaubbelastung unter Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse, Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin.
- Klingner, M., Sähn, E., Anke, K., Holst, T., Rost, J., Mayer, H., Ahrens, D. 2006, Reduktionspotenziale verkehrsbeschränkender Maßnahmen in Bezug zu meteorologisch bedingten Schwankungen der PM₁₀- und NO_x-Immissionen. In: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, H. 7-8.
- Koch, O. 2006, Innovative Verkehrssteuerung in Hamburg - Einführung einer verkehrsadaptiven Netzsteuerung im Rahmen des Pilotprojekts im Stadtteil Barmbek, in VSVI-Hamburg Information 2006, VSVI-Hamburg, Hamburg.

- Kouridis, C., Ntziachristos, L., Samaras, Z. 2000, COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport, Kopenhagen.
- Kukkonen, J., Partanen, L., Karppinen, A., Ruuskanen, J., Junninen, H., Kolehmainen, M., Niska, H., Dorling, S., Chatterton, T., Foxall, R., Cawley, G. 2003, Extensive evaluation of neural network models for the prediction of NO₂ and PM₁₀ concentrations, compared with a deterministic modelling system and measurements in central Helsinki, Atmospheric Environment, 32/2003.
- Kuwahara, M., Oneyama, H., Oguchi, T. 2001, Estimation Model of vehicle emission considering variation of running speed, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation studies, 05/2001.
- Kurtenbach, R., Becker, K. -H, Bruckmann, P., Kleffmann, J., Niedojadlo, A., Wiesen, P. 2008, Das innerstädtische „Stickstoffdioxid (NO₂)-Problem“: Welchen Einfluss haben direkte Verkehrsemissionen?, In: Mitt Umweltchem Ökotox, 3/2008.
- Liu, P.-W. G. 2009, Simulation of the daily average PM₁₀ concentrations at Ta-Liao with Box-Jenkins time series models and multivariate analysis, Atmospheric Environment, 13/2009.
- Lohmeyer, A., Düring, I., Flassak, T., 2001, Modelle zur Berechnung der Luftqualität und ihre Anwendung, Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe.
- Lohmeyer, A., Düring, I., Nitzsche, E., Moldenhauer, A., Stockhause, M., 2004, Berechnung der Kfz-bedingten Feinstaubemissionen infolge Aufwirbelung und Abrieb für das Emissionskataster Sachsen, Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe.
- Lowrie, P. R. 1982, The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System – Principles, Methodology, Algorithms, Department of Main Roads, N. S. W., Australia 1982.
- Ludes, G., Siebers, B., Kuhlbusch, T., Quass, U., Beyer, M., Weber, F. 2008, Feinstaub und NO₂ – Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung, Hagen.
- Lüßmann, J. 2006, Simulation und Vergleich verschiedener LSA-Steuerungsverfahren - verkehrliche Wirkung und Wahrnehmung in der Öffentlichkeit, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- Maier, F., Roth, C. 2008, Fahrzeugwiedererkennung unter Verwendung der Signaturen aus Induktivschleifendetektoren, Straßenverkehrstechnik Heft 2/2008, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn.
- Manier, G. 2005, Internetvorlesung: Umweltmeteorologie, Kapitel Ausbreitung und Umwandlung von Luftschadstoffen, www.meteor.tu-darmstadt.de/umet/index.html, gesehen am 4.6.2008, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- MATLAB The Language of Technical Computing 2009, Product Documentation, Cross-Correlation, The Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts, USA.
- Mauro, V. 2002, UTOPIA - Urban Traffic Control Main concepts, PEACE ITS Workshop - 8-9 April 2002, Peking.
- Meißner, J.-D. 2004, Statistik – Verstehen und sinnvoll nutzen, Oldenbourg Verlag, München.

- Mertz, J., Friedrich, B. 1994, Das Konzept der Priorisierungsstufen, Internes Arbeitspapier Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München.
- MERTZ, J. 1996, Abschlussbericht Munich COMFORT, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München.
- Mertz, J. 2001, Ein mikroskopisches Verfahren zur verkehrsadaptiven Knotenpunktsteuerung mit Vorrang des öffentlichen Verkehrs, Dissertation, Schriftenreihe des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, München.
- MIZAR 2008, UTOPIA References (Stand 20.5.2008), http://www.miz.it/documenti/31_Utopia%20Reference.pdf.
- Mück J. 2002, Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung haltliniennaher Detektoren, HEUREKA'02, Karlsruhe.
- Mück, J. 2002, Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung haltliniennaher Detektoren. Straßenverkehrstechnik 11/2002.
- Mück, J. 2008, Schätz- und Optimierungsverfahren in der AdaptivenNetzsteuerung SITRAFFIC Motion MX, HEUREKA'08, Stuttgart.
- Mück, J. 2008-2, Beantwortung eines Fragebogens.
- Mück, J., Poschinger, A. 2009, Modellbasierte Netzsteuerungen – Neue Algorithmen und aktuelle Evaluierungsergebnisse von Motion, mobil.TUM 2009 - International Scientific Conference on Mobility and Transport - ITS for larger Cities. 12&13 May 2009, Munich.
- NWS - National Weather Service 2009, NWS Support During Hazardous Materials Emergencies. unter http://www.meted.ucar.edu/dispersion/disp_ops/txt/menu.htm.
- ORINOKO, Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Stadt Nürnberg, DLR, Siemens VAG, SSP Consult, MNO Stühler, Taxi-Zentrale Nürnberg 2008, Fließender Verkehr dank ORINOKO, www.fraunhofer.de/presse/presseinformationen/2008/03/-Presseinformation1332008.jsp, gesehen am 13.5.2008, Presseinformation Fraunhofer-Gesellschaft, Dresden.
- Park, J. Y., Noland, R. B., Polak, J. W. 2000, A Microscopic Model of Air Pollutant Concentrations: Comparison of Simulated Results with Measured and Macroscopic Estimates (80th Annual Meeting), Washington: Transportation Research Board (TRB).
- Peek 2008, UTOPIA Modern Traffic Management, Brochure, Amersford.
- Pohlmann, T., Hoffmann, S., Kutzner, R. 2008, Guidelines for Quality Management of Traffic Signal Systems in Germany, Proceedings 15th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS) 2008 (planned publication).
- Prüfling, C. 2004, Verkehrsabhängige Steuerungen von Lichtsignalanlagen in Eu-ropa, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, TU München, München.
- PTV AG 2008, VISSIM 5.0 Benutzerhandbuch, Karlsruhe.
- Rabl, P., Deimer, R. 2001, Pkw-Emissionen bei 50 und 30 km/h - ein Vergleich, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Tätigkeitsbericht 2000, Augsburg.

- Reußwig, A. 2005, Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- Robertson, D.I. 1969, TRANSYT, A Traffic Study Tool, TRRL, Report, LR 253.
- Röckle, R., Richter, C. J. 1998, Ausbreitung von Emissionen in komplexer Bebauung: Vergleich zwischen numerischen Modellen und Windkanalmessungen. PEF - Projekt europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen der Luftreinhaltung: Förderkennzeichen PEF 295002.
- Rudolf, M., Müller, J. 2004, Multivariate Verfahren - Eine praxisorientierte Einführung mit Anwendungsbeispielen in SPSS, Hogrefe Verlag, Göttingen.
- Ruske, W. et al. 1982, Mitteilungen über Forschungen zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse in den Gemeinden, Einbeziehung von Umweltgesichtspunkten in die Generalverkehrsplanungsmethodik. Forschung Stadtverkehr Heft 31.
- Sachs, L. 2002, Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden, 10. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.
- Schatzmann, M., Leidl, B., Liedtke, J. 1999, Ausbreitung von Kfz-Abgasen in Straßenschluchten. PEF - Projekt europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen der Luftreinhaltung: PEF 296001, Hamburg.
- Schwartz, J. 2000, Assessing confounding, effect modification, and threshold in the association between ambient particles and daily deaths. In: Environmental Health Perspectives, H. 108.
- Schönwiese, C. D. 1983a, Schätzverfahren. In Deutscher Wetterdienst, promet. Meteorologische Fortbildung. Offenbach am Main.
- Schönwiese, C. D. 1983b, Zeitreihenfilterung. In Deutscher Wetterdienst, promet. Meteorologische Fortbildung. Offenbach am Main.
- Schönwiese, C. D. 1983c, Zeitreihenkorrelation. In Deutscher Wetterdienst, promet. Meteorologische Fortbildung. Offenbach am Main.
- Schönwiese, C. D. 2006, Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler (4., verb. und erw. Aufl.). Borntraeger Verlag, Berlin.
- Schönwiese, C. D. 2010, Expertengespräch zur geplanten Auswertungsmethodik der erhobenen Daten aus den AMONES-Feldmessungen. Frankfurt a. M.
- Schnabel, W., Lohse, D. 1997, Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 2, Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin.
- Schubö, W., Haagen, K., Oberhofer, W. 1983, Regressions- und kanonische Analyse, In: Strukturierung und Reduzierung von Daten, J. Bredenkamp & H. Feger, Hogrefe Verlag, Göttingen.
- Schulze, E. 2002, Räumliche und zeitliche Analyse von kontinuierlichen Luftschadstoffmessungen in Berlin Einfluss von Regen und Luftfeuchte auf die PM₁₀-Emission und -Immission. Diplomarbeit Landschafts- und Geoökologie TU Dresden.
- SCOOT 2008, Advice Leaflet 1: The "SCOOT" Urban Traffic Control System, Stand 20.5.2008, www.scoot-utc.com.

- SENSOR Konsortium 2004, Secondary Road Network Traffic Management Strategies-Handbook for Data Collection, Communication and Organisation, Technischer Bericht, Europäische Kommission, D8.1d.
- Shi, J. P., Harrison, R. M. 1997, Regression modelling of hourly NO_x and NO₂ concentrations in urban air in London, Atmospheric Environment, Vol. 31, Elsevier Science Ltd., Great Britain.
- Siemens AG I&S ITS 2003, SITRAFFIC C800V – Grundversorgungsdaten Handbuch, München.
- Siemens AG 2005, Präsentation - Nachweis der Wirksamkeit, Piräus, München.
- Siemens AG I&S ITS 2005b, SITRAFFIC Language V3.1 – Bedienungsanleitung Handbuch, München.
- Siemens AG I&S ITS 2007, SITRAFFIC Office V4.3 Handbuch, München.
- Siemens AG I&S ITS 2008, SITRAFFIC Motion MX 4.0 Handbuch, München.
- Siemens AG I&S ITS 2008b, SITRAFFIC MOTION – Ablaufbeschreibung für Sitraffic Motion Simulation Handbuch, München.
- Siemens AG I&S ITS 2008c, SITRAFFIC Control- Bedienung Version 5.0 Handbuch, München.
- Siemens AG I&S ITS 2008d, SITRAFIC PDMe – Beschreibung und Bibliotheken V2.0 Handbuch, München.
- Siemens AG I&S ITS 2008e, SITRAFFIC M-Xe – MOTION Komponente im SITRAFFIC C900 – Beschreibung und Bibliothek V2.0 Handbuch, München.
- Sims, A. G., Dobinson, K. W. 1980, The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCATS) System: Philosophy and Benefits, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume 29(2), p. 130-137.
- Smit, R. 2006, An Examination of Congestion in Road Traffic Emission Models and their Application to Urban Road Networks, Dissertation, Griffith University, Griffith.
- Spangl, W., Schneider, J., Nagl, C., Lorbeer, G., Placer, K., Lichtblau, G., et al. 2003, Fachgrundlagen für eine Stuserhebung zur NO₂-Belastung an der Messstelle Wien-Hietzinger Kai, Wien.
- Spangl, W. 2004, Fachgrundlagen für eine Stuserhebung zur PM₁₀-Belastung in Wien, Umweltbundesamt, Wien.
- TA-Luft – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, vom 24. Juli 2002, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2002, Berlin. n.
- TABASCO Report 9.3 1998, UTC with PT Priority: User Needs, Functional Specification and Demonstrators (Ed.: Friedrich, B.) Projektnummer TR1054 European Commission, DG XIII, Brussels.
- Tuch, Th., Brand, P., Wichmann, H. E., Heyder, J. 1997, Variation of particle number and mass concentration in various size ranges of ambient aerosols in Eastern Germany. In: Atmospheric Environment, Jg. 31, H. 24, S. 4193–4197.
- Tullius, K. 2002, Information Society Programme - Project HEAVEN: Demonstration Berlin.

- UK Highway Agency 1996, Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), Volume 12, Section 2, Part 1, Office of Official Publications, Richmons, Surrey, United Kingdom.
- Umweltbundesamt 2009a, Luft und Luftreinhaltung - Luftschadstoffe - Schwefeldioxid (SO₂) (2009). Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/luft/schadstoffe/so2.htm>, abgerufen am 13.2.2010.
- Umweltbundesamt 2009b, Entwicklung der Luftqualität in Deutschland, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt 2010, Auswertung der Luftbelastungssituation 2009, Dessau-Roßlau.
- USEPA - U.S. Environmental Protection Agency 2001, Mobile6 Vehicle Emission Software, Washington DC.
- Van Basshuysen, R. 2007, Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven, ATZ-MTZ Fachbuch, Wiesbaden.
- Van der Puetten, N. 2006, Messungen oder Modellrechnungen?: Wege zur Bewertung der Umweltqualität vor dem Hintergrund aktueller und zukünftiger Anforderungen an die kommunale Verkehrsplanung, FIV-Symposium Qualität von Daten, Modellen und Informationen im Verkehr, Darmstadt.
- Van Zuylen, H. J. 1979, The information minimizing method: validity and applicability to transportation planning, In: New Developments in Modelling Travel Demand and Urban systems (Jansen et al. Ed.), Saxon House.
- Vester, B. 2006, Feinstaubexposition im urbanen Hintergrundaerosol des Rhein-Main-Gebietes: Ergebnisse aus Einzelpartikelanalysen, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Material- und Geowissenschaften, Darmstadt.
- Vortisch, P. 2005, Emission Modelling in Vissim: The Volkswagen Emission Modell. Kurzvortrag im Rahmen eines AMONES-Treffens am 23.4.2008. Stuttgart.
- Weichenmeier, F. 2007, BALANCE Roadshow, Verkehrsadaptive Netzsteuerung BALANCE: Prinzip, Ziele, Erfahrungen und neue Entwicklungen, München.
- Werner, P.C. 2002, Zur Berücksichtigung der Persistenz in meteorologischen Zeitreihen. In PIK Report No. 75, Angewandte Statistik PIK-Weiterbildungsseminar 2000/2001, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam.
- Wiedemann, R. 1974, Simulation des Verkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 8, Universität (TH) Karlsruhe.
- Willumsen, L.G. 1978, Estimation of an O-D Matrix from Traffic Counts - A Review, Institute for Transport Studies, University of Leeds, UK.
- Willumsen, L.G. 1981, An Entropy Maximizing Model for Estimating Trip Matrices from Traffic Counts, Ph.D. Thesis, University of Leeds, UK.
- Wiltshko, T., Schwieger, V. 2008, Floating Phone Data - Ansatz zur Generierung von Verkehrsdaten aus Mobilfunkdaten, Tagungsband zur HEUREKA 2008, FGSV-Verlag, Köln.
- Witten, S.-L. 2007, Stickstoffdioxid (NO₂) Quellen – Emissionen – Auswirkungen auf Gesundheit und Ökosystem – Bewertungen – Immissionen, Wiesbaden.

Zahn, C.T. 1971, Graph-theoretical methods for detecting and describing Gestalt clusters, IEEE Transactions on Computers, Vol. C-20, Issue 1, pp. 68-86.