

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Verkehrstechnik

Koordinierung von Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung der Progressionsgeschwindigkeit und Pulkmanagement auf Basis der C2X-Kommunikation zur Reduzierung von CO2 Emissionen

Dipl.-Ing. Jonas Lüßmann

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Freudenstein

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich,
Technische Universität Braunschweig

Die Dissertation wurde am 19.1.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 30.4.2015 angenommen.

Kurzfassung

Die Nutzung der C2X-Kommunikation birgt neue Möglichkeiten bei der Steuerung von Lichtsignalanlagen. Einerseits stellen Fahrzeuge, die mit den Lichtsignalanlagen kommunizieren können, zusätzliche Detektoren da, andererseits besteht aber auch die Möglichkeit diese Fahrzeuge gezielt zu beeinflussen. Die bisherigen Ansätze zur Steuerung von Lichtsignalanlagen unter Zuhilfenahme von Floating Car Data nutzen dezentrale Steuerung an einzelnen Knotenpunkten. Solche Ansätze können allerdings keine Koordinierung zwischen benachbarten Knotenpunkten garantieren und stehen damit im Konflikt mit der in Deutschland gängigen Planungsphilosophie, die eine Koordinierung auf taktischer Ebene, also mit einem Zeithorizont von mehreren Minuten, in Form von Rahmenplänen vorsieht.

In der Arbeit wird daher ein Verfahren zur Optimierung der Koordinierung von Lichtsignalanlagen unter Nutzung der C2X-Kommunikation erarbeitet. Das Verfahren besteht dabei aus zwei Komponenten, einer Netzsteuerung zur Optimierung der Koordinierung und einem infrastrukturseitigen Pulkmanagement.

Die Optimierung der Koordinierung der Lichtsignalsteuerung umfasst die Parameter Versatzzeit und Progressionsgeschwindigkeit. Da die Optimierung in dieser Arbeit (im Gegensatz zu heutigen in der Praxis angewendeten Verfahren) direkt auf Grundlage der Emissionen geschieht, wird anstelle eines makroskopischen Verkehrsflussmodells ein mikroskopisches verwendet. Die Optimierung erfolgt abschnittsweise für jeweils zwei benachbarte Anlagen. Wie in früheren Forschungsprojekten festgestellt wurde, haben Freigabezeitanpassungen lokaler verkehrsabhängiger Steuerungen meist, wenn überhaupt, nur eine geringe Wirkung in Bezug auf Reisezeiten und Anzahl der Halte. Dies gilt besonders dann, wenn bereits eine Koordinierung der Anlagen vorhanden ist. Im entwickelten Verfahren wird die Freigabezeit der von der zentralen Netzsteuerung vorgegebenen Rahmenpläne daher nicht durch eine lokale Steuerung angepasst, sondern direkt umgesetzt. Eine Schaltzeitprognose, die für die genaue Information der Fahrer nötig wäre, kann somit entfallen. Die empfohlenen Geschwindigkeiten sind so zudem zuverlässiger.

Die in der Optimierung getroffene Annahme, dass die Progressionsgeschwindigkeit beeinflusst werden kann, wird über das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Pulkmanagement verwirklicht. Über die C2X-Kommunikation werden dem Fahrer die Ankunftszeit an der Haltelinie sowie ein dazugehöriger Fahrstreifen übermittelt, wobei über eine Rückstaulängenschätzung auch Einbieger und nicht ausgestattete Fahrzeuge berücksichtigt werden. Zur Kommunikation wird die im Rahmen der Arbeit spezifizierte SLAM (Speed and Lane Advice Message) genutzt, deren Inhalte inzwischen in der SPaT (Signal Phase and Timing) Message auch Einzug in die Standardisierung gefunden hat. Im Fahrzeug wird daraus eine konkrete Geschwindigkeitsempfehlung generiert. Die vom Pulkmanagement übermittelten Zeitfenster werden in Abhängigkeit aller sich auf der Zufahrt befindlichen Fahrzeuge verteilt und dienen der Optimierung der Ankunftsverteilung der Fahrzeuge an der Haltelinie. Am Knoten, dort wo die Pulks zur

idealen Nutzung der Freigabezeit gebraucht werden, können diese so möglichst dicht entstehen, während die Annäherung an die Lichtsignalanlage von jedem Fahrzeug individuell, in Abhängigkeit der Fahrzeugkennwerte, möglichst energieeffizient gestaltet werden kann.

Um das fahrzeugseitige System in der im Rahmen der Arbeit durchgeführten Bewertung zu modellieren und besonders hinsichtlich der Emissionen eine realitätsnahe Bewertung zu ermöglichen, wurde das Fahrverhalten der verwendeten mikroskopischen Verkehrsflusssimulation mittels Fahrsimulatorstudien kalibriert. Die Bewertung zeigt für das gewählte Anwendungsszenario in Abhängigkeit der Randbedingungen eine netzweite Reduzierung der CO₂ Emissionen von bis zu 5,9 Prozent.

Abstract

The C2X communication offers new possibilities for traffic signal control systems. On the one hand communicating vehicles can be used as additional detection for the traffic signal control. On the other hand, it is possible to influence these vehicles by providing the drivers additional information about future traffic signal states. Previous approaches using floating car data (FCD) for traffic signal control are decentralized and control single intersections only. However, such approaches cannot ensure a coordination of neighboured intersections. This is in conflict with planning philosophy established in Germany, which has a coordination at the tactical level using frame signal plans.

The object of this work is a system optimizing the coordination of traffic signal control using the possibilities of the C2X communication. The system contains two components, network control optimizing the coordination and an infrastructure based platoon management.

The network control optimizes the offset and the progressive speeds. As the optimization is based directly on emissions it uses a microscopic traffic flow model (opposed to today's applied in practice macroscopic traffic flow models). The optimization is done section by section for two neighbouring intersections. As found out in earlier research time gap control, if at all, only has small effects in terms of travel times and number of stops. This especially is the case when a coordination of traffic signal control of neighbouring intersections exists. Therefore, the frame signal plan is not adapted within the developed system. A signal state prediction is not needed for the exact information of the driver. In this way, the recommended speeds are more reliable.

The infrastructure based platoon management can influence the progressive speed, optimized by the network control. With the C2X communication, the driver is allocated to an arrival time at the stop line and an associated lane. Turning in and not equipped vehicles are considered through a queue length estimation. For communication the SLAM (Speed and Lane Advice Message) is used. Its contents is nowadays part of the standardized SPaT (Signal Phase and Timing) Message. The vehicle calculates the final speed advice. The allocated arrival times are calculated considering all vehicles on the approach and are used to optimize the arrival distribution at the stop line. In that way the dense platoons are built at the stop line where this is needed to get a high saturation, while the approach itself is optimized by the vehicle the most energy efficient way.

To simulate the driver behaviour realistically, especially with respect to emission modelling, the parameters are calibrated microscopically by real measurements and driving simulator studies. The evaluation of the system show reductions of CO₂ emissions up to 5.9 percent.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	1
1.1	Motivation der Arbeit	1
1.2	Ziel der Arbeit.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2.	Stand der Technik.....	5
2.1	Netzsteuerung von Lichtsignalanlagen.....	5
2.1.1	Klassifizierung von Netzsteuerungen.....	5
2.1.2	Verkehrssteuerungsmodelle (Optimierung).....	9
2.1.3	Verkehrsflussmodelle	10
2.1.4	Verkehrswirkungsmodelle.....	12
2.2	Netzsteuerungsverfahren	13
2.2.1	SCATS	14
2.2.2	SCOOT	14
2.2.3	UTOPIA.....	16
2.2.4	Motion	16
2.2.5	BALANCE.....	17
2.2.6	InSync	18
2.2.7	Weitere Netzsteuerungsverfahren	18
2.3	Kooperative Lichtsignalsteuerung	19
2.3.1	Kommunikationssysteme.....	19
2.3.2	Verkehrslageerfassung.....	21
2.3.3	Schaltzeitprognose	24
2.4	Pilotanwendungen der erweiterten Fahrerinformation	27
2.4.1	Düsseldorfer Trichter	27
2.4.2	Wolfsburger Welle	29
2.4.3	TRAVOLUTION.....	29
2.4.4	Forschungsinitiative AKTIV.....	30
2.4.5	Koline	31
2.4.6	Kolibri	32
2.4.7	ODYSA.....	32
2.4.8	SignalGuru	32
2.5	Zusammenfassung.....	32
3.	Gesamtsystem.....	35
3.1	Architektur.....	35
3.2	Komponenten.....	36

3.2.1 Verkehrsmanagement	36
3.2.2 Verkehrszustandsschätzung.....	37
3.2.3 Netzsteuerung	37
3.2.4 Lokale Steuerung	38
3.2.5 Pulkmanager	40
3.2.6 LSA-Steuergerät.....	41
3.2.7 Fahrzeug	41
4. Netzsteuerung	43
4.1 Konzeption der Netzsteuerung	43
4.1.1 Zielsetzungen der Netzsteuerung	43
4.1.2 Anforderungen an die Netzsteuerung	44
4.2 Steuerungsmodell	45
4.2.1 Steuerungsvariablen.....	45
4.2.2 Optimierungsalgorithmus.....	46
4.3 Verkehrsflussmodell	50
4.3.1 Netzmodell	50
4.3.2 Fahrer-Fahrzeugmodell	52
4.3.3 Verkehrsnachfrage	52
4.3.4 Datenausgabe	53
4.4 Verkehrswirkungsmodell	53
4.4.1 Bewertung der Verkehrseffizienz	54
4.4.2 Bewertung der Emissionen.....	54
4.5 Schaltbefehl	55
4.6 Systemtechnische Umsetzung	55
4.7 Technische Bewertung.....	57
4.7.1 Konsistenz.....	57
4.7.2 Robustheit	59
4.7.3 Qualität	60
4.7.4 Effizienz.....	60
5. Infrastrukturseitiges Pulkmanagement	63
5.1 Konzeption des Pulkmanagements	63
5.1.1 Zielsetzungen des Pulkmanagements	63
5.1.2 Anforderungen an das Pulkmanagement.....	64
5.2 Rückstaulängenschätzer	65
5.2.1 Rückstaulängenschätzung.....	65
5.2.2 Rückstaulängenermittlung	66
5.3 Zeitlückenzuweiser	66

5.4 Kommunikation	68
5.4.1 CAM	68
5.4.2 SLAM	69
5.4.3 ITM	69
5.5 Systemtechnische Umsetzung	70
6. Fahrzeugseitige längsdynamische Fahrerassistenzsysteme und deren Modellierung...	73
6.1 Längsdynamisches Fahrerassistenzsystem	73
6.1.1 ecoSituational Model	73
6.1.2 ecoDriving Support	74
6.1.3 ecoHMI	74
6.2 Fahrerhaltensmodellierung für das Fahren mit Fahrerassistenz und zur Emissionsberechnung	76
6.2.1 Das psycho-physische Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann	76
6.3 Messkonzept	78
6.4 Datenerhebung	80
6.4.1 Messungen im realen Testfeld	81
6.4.2 Fahrsimulatorstudien	82
6.5 Kalibrierung des Fahrerhaltens	82
6.5.1 Bisherige mikroskopische Kalibrierungen des Wiedemann Modells	83
6.5.2 Kalibrierung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung	85
6.5.3 Kalibrierung der Wunschbeschleunigungsfunktion	87
6.5.4 Kalibrierung der Wunschverzögerungsfunktion	89
6.5.5 Kalibrierung der Funktion des gewünschten Sicherheitsabstands	90
6.5.6 Annahmen für LKW	91
6.5.7 Validierung der Parameter	92
7. Bewertung	95
7.1 Bewertungskonzept	95
7.1.1 Testfeld und Methodik	95
7.1.2 Randbedingungen der Bewertung mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation	97
7.2 Erweiterung der Simulationsumgebung	99
7.2.1 Architektur der Testumgebung	99
7.2.2 Schnittstellen	99
7.2.3 Komponenten	101
7.3 Systembewertung	103
7.3.1 Verkehrseffizienz	103
7.3.2 Emissionen	109

7.4 Zusammenfassung der Bewertung.....	117
7.5 Übertragbarkeit der Ergebnisse.....	119
8. Zusammenfassung und Ausblick	123
8.1 Zusammenfassung.....	123
8.2 Ausblick.....	124
Literaturverzeichnis.....	127
Abkürzungsverzeichnis	139
Abbildungsverzeichnis	143
Tabellenverzeichnis	147
Anhang A.....	149
Anhang B.....	155

1. Einführung

Für den Verkehrsablauf im Stadtverkehr ist die Lichtsignalsteuerung an den Knotenpunkten von wesentlicher Bedeutung. „Sie ist damit ein wichtiges Instrument im Rahmen übergeordneter Verkehrskonzepte, bei denen auch Maßnahmen zur Beschleunigung des öffentlichen Verkehrs, zur sicheren Führung des Fußgänger- und Radverkehrs und zur Bündelung der Kraftfahrzeugströme auf bestimmten Routen ineinander greifen. Als dynamisches Element ist die Lichtsignalsteuerung ein wichtiger Bestandteil des Verkehrsmanagements.“ [FGSV, 2010]

In erster Linie dienen die Lichtsignalanlagen dabei der Verkehrssicherheit, indem feindliche Verkehrsströme des motorisierten sowie des nicht-motorisierten Verkehrs zeitlich voneinander getrennt freigegeben werden und so Konfliktsituationen vermieden werden. Ein weiteres Ziel ist seit langem auch die Optimierung der Verkehrseffizienz, also die Reduzierung von Fahrzeiten und Halten, indem versucht wird die Lichtsignalsteuerung an das aktuelle Verkehrsgeschehen anzupassen. Dies kann sowohl lokal, für einen einzelnen Knotenpunkt geschehen, als auch in einem Netzzusammenhang für mehrere Knotenpunkte. Als letztes Ziel lässt sich die Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen nennen. Dieses Ziel gewinnt durch die in der *Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft für Europa* [EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT, 2008] und deren Umsetzung durch im Bundes-Immissionsschutzgesetz [BMUB, 2013] festgelegte Grenzwerte an Bedeutung.

1.1 Motivation der Arbeit

Im Kontext der Lichtsignalsteuerung haben sich in den letzten Jahren im Wesentlichen zwei Themenschwerpunkte für Forschung und Weiterentwicklung herauskristallisiert.

Der erste Schwerpunkt liegt dabei auf der modellbasierten Optimierung der Lichtsignalsteuerung in Netzen, um gezielt die Emissionen beziehungsweise den Kraftstoffverbrauch und damit auch die daraus resultierenden Immissionen zu minimieren. Einige Arbeiten versuchen die Optimierung dieser Kenngrößen nachzuweisen (unter Anderem BRILON ET AL. [2014], MARGREITER ET AL. [2014], KOHOUTEK [2010], HIRSCHMANN UND FELLENDORF [2009]). Dabei verbessern sich beim Einsatz adaptiver Netzsteuerungen die Emissionskenngrößen, wenn die Steuerung zugleich zu einer Verbesserung der Kenngrößen der Verkehrseffizienz führt.

Die untersuchten Ansätze arbeiten dabei allerdings nicht direkt auf Grundlage von Emissionen oder Kraftstoffverbrauch, sondern versuchen das Ziel in der Regel indirekt über die Minimierung der Anzahl der Halte zu erreichen. Die Anzahl der Halte sollte dabei zwar ein Indikator für die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch sein, allerdings ist die Definition eines Halts in der Regel durch die Unterschreitung einer Grenzgeschwindigkeit definiert und damit hart festgelegt. Eine Erhöhung der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs entsteht allerdings bereits bei kleinen Änderungen in der Geschwindigkeit und den damit verbundenen Beschleunigungen.

Der zweite Schwerpunkt ist der Informationsaustausch zwischen Lichtsignalanlage und Fahrzeug durch die sogenannten kooperativen Systeme. Die Optimierung der Lichtsignalsteuerung basiert in der Regel auf Verkehrsmengen, welche über erweiterte Fahrzeuginformationen nur indirekt und erst ab einer bestimmten Durchdringung erfasst werden können, weshalb hier meist (und in Systemen im realen Betrieb bisher ausschließlich) auf stationäre Detektion zurückgegriffen wird. Ein dagegen bereits in einigen Pilotanwendungen demonstrierter Informationsaustausch ist die Geschwindigkeitsempfehlung für den Fahrer (siehe Abschnitt 2.4). Die Lichtsignalanlage dient dabei als reiner Informationsgeber und stellt den Fahrzeugen in der Regel nur Informationen zur zukünftigen Schaltung der Signalgruppen zur Verfügung. Das fahrzeugseitige System berechnet daraus dann eine Geschwindigkeitsempfehlung für den Fahrer.

Voraussetzung für eine Kooperation, und damit für ein echtes kooperatives System, ist im Gegensatz zu einer Interaktion, dabei ein zweckgerichtetes Zusammenwirken der einzelnen Systeme. Für ein kooperatives System müssen die Lichtsignalanlage und die fahrzeugseitigen Systeme auf ein gemeinsames Ziel, die Verbesserung des Verkehrsflusses für das Fahrzeug (fahrzeugseitiges System) beziehungsweise den Gesamtverkehr (Lichtsignalanlage) hinarbeiten. Da die Lichtsignalanlage keinerlei Einfluss darauf hat, welche Geschwindigkeit das fahrzeugseitige System aus ihren zusätzlichen Informationen empfiehlt, dient sie in den bisherigen Umsetzungen als reine zusätzliche Informationsquelle. Sie kann damit ihr Ziel, eine Verbesserung des Verkehrsflusses für den Gesamtverkehr zu erreichen, nicht garantiert erreichen oder gezielt beeinflussen, da eine Optimierung des Fahrtverlaufs einzelner Fahrzeuge nicht zu einem Systemoptimum führt (vgl. WARDROP [1952]). Ein solches Gesamtsystem ist damit für die Lichtsignalanlage nicht unbedingt zweckgerichtet und das Gesamtsystem ist damit kein kooperatives System im eigentlichen Sinne, sondern vielmehr nur ein interagierendes System, bei dem die Lichtsignalanlage neben dem aktuellen Schaltbild auch Informationen zu zukünftigen Schaltungen zur Verfügung stellt.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die in Abschnitt 1.1 aufgeführten Schwachpunkte der genannten Themenschwerpunkte aufzugreifen. Das vorgestellte Gesamtsystem soll daher „echt“ kooperativ sein und eine direkte Optimierung der Lichtsignalsteuerung auf Grundlage des Emissionsausstoßes beziehungsweise des Kraftstoffverbrauchs ermöglichen.

Um die Lichtsignalsteuerung direkt auf Basis von Emissionen steuern zu können, bedarf es eines modellbasierten Verfahrens, da die Emissionen stärker als Fahrtzeiten und Halte vom Fahrverhalten abhängen, dessen Abbildung bei einer Aggregation der einzelnen Fahrzeuge zu einem makroskopischen Verkehrsstrom weitgehend verloren geht, wird im Rahmen dieser Arbeit ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell zur Optimierung eingesetzt. Die Arbeit soll dabei die Frage beantworten, ob ein solches Modell für die Optimierung der Lichtsignalsteuerung einsetzbar ist und gegebenenfalls auch für Echtzeitsysteme genutzt werden kann.

Die Optimierung erfolgt dabei auf Basis der CO₂ Emissionen, da diese direkt mit dem Kraftstoffverbrauch und damit mit dem Energieverbrauch korrelieren. Eine Übertragung des Ansatzes und der Vergleich mit anderen Antriebsarten, wie beispielsweise dem in den letzten Jahren aufkommenden Elektro- und Hybridantrieben, ist damit grundsätzlich möglich. NO_x Emissionen sind hingegen stark von der Antriebsart abhängig und treten vermehrt bei Dieselmotoren auf. Feinstaub (PM₁₀, PM_{2,5}) hängt stark von der Grundbelastung aus industriellen Anlagen sowie Aufwirbelungen von der Straße ab und wird weniger von den Fahrzeugen emittiert.

Einerseits ist der Einsatz eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells und die Berechnung der Emissionen sehr rechenzeitintensiv. Andererseits werden die Emissionen, wie bereits erwähnt, vor allem durch den Annäherungsprozess an die Haltelinie erzeugt und werden daher hauptsächlich durch den Netzbezug benachbarter Knotenpunkte beeinflusst (unter der Annahme das die lokale Steuerung gut geplant ist). Aus diesem Grund ist eine Optimierung der Lichtsignalsteuerung auf der operationalen, also lokalen, Ebene nicht möglich beziehungsweise auch nicht zielführend. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine Optimierung daher nur auf taktischer Ebene in Form einer Netzsteuerung.

Auf der operationalen Ebene erfolgt die Optimierung durch die Anpassung des Fahrverhaltens an die Lichtsignalsteuerung am Knotenpunkt. Um das System echt kooperativ zu machen wird mittels eines infrastrukturseitigen Pulkmanagements versucht, die Ankunftsverteilung der Fahrzeuge an der Haltelinie zu optimieren, indem dem fahrzeugseitigen System anstatt der kompletten Freigabezeit ein für das Fahrzeug reserviertes Freigabefenster innerhalb der Gesamtfreigabezeit übermittelt wird. Das fahrzeugseitige System kann so weiterhin eine für das Fahrzeug optimale Annäherung an die Haltelinie berechnen. Auf diese Weise wird der Informationsaustausch zwischen Lichtsignalanlage und fahrzeugseitigem System, neben dem Fahrzeug, auch für die Lichtsignalanlage zu einem zweckgerichteten Zusammenspiel und das Gesamtsystem damit zu einem echten kooperativen System.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird in Kapitel 2 der Stand der Technik für sämtliche für das Gesamtsystem relevanten technischen und nichttechnischen Aspekte dargestellt. Dies umfasst zum Einen die Lichtsignalsteuerung in Netzen, sowie Beispiele für in realen Straßennetzen eingesetzte Systeme. Zum Anderen werden kooperative Systeme zur Lichtsignalsteuerung beschrieben. Dies enthält die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage, die makroskopische und mikroskopische Verkehrslageerkennung aufgrund von Fahrzeugdaten, wie etwa die Rückstaulängenschätzung sowie die Prognose zukünftiger Schaltzeiten verkehrsabhängig gesteuerter Lichtsignalanlagen. Abschließend wird auf Pilotanwendungen der erweiterten Fahrerinformation eingegangen.

Kapitel 3 beschreibt die Zusammenhänge der einzelnen Komponenten des entworfenen Gesamtsystems. Es wird dazu auch auf die nicht im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelten Komponenten eingegangen, soweit dies für das Gesamtverständnis erforderlich ist.

In Kapitel 4 wird auf die Komponente Netzsteuerung eingegangen. Dies umfasst die Konzeption der Steuerung, sowie die Beschreibung ihrer Bestandteile – das Steuerungsmodell, das verwendete Verkehrsflussmodell und das verwendete Verkehrswirkungsmodell. Außerdem wird die systemtechnische Umsetzung beschrieben und abschließend eine technische Bewertung der Netzsteuerung durchgeführt.

Kapitel 5 enthält die Beschreibung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten infrastruktureitigen Pulkmanagements. Dazu wird die Konzeption, das Prinzip sowie die systemtechnische Umsetzung des Pulkmanagements beschrieben. Außerdem erfolgt eine Zusammenfassung der im Rahmen des Pulkmanagements verwendeten Rückstaulängenschätzung von SANTA [2014].

Das fahrzeugseitige System zur erweiterten Fahrerinformation sowie dessen Modellierung wird in Kapitel 6 erläutert. Hierzu werden dessen Bestandteile näher beschrieben. Für die Modellierung im Rahmen der Bewertung sowie des in der Netzsteuerung verwendeten Fahrer Fahrzeugmodells nach WIEDEMANN [1974] wird das Messkonzept dargelegt. In der Auswertung werden Wunschgeschwindigkeitsverteilungen sowie Beschleunigungs- und Verzögerungsfunktionen kalibriert und validiert.

Im 7. Kapitel erfolgt eine Bewertung des Systems mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation anhand der Abbildung eines realen Verkehrsnetzes in München. Neben den Ergebnissen wird auch das zur Bewertung genutzte Hardware-in-the-Loop System umrissen, bei dem die entwickelten Applikationen direkt an die Simulation angebunden werden.

Abschließend wird die vorliegende Arbeit in Kapitel 8 zusammengefasst. Es wird zudem das Verbesserungspotential des Systems aufgezeigt sowie auf Potential weiterer Forschung hingewiesen.

2. Stand der Technik

Zu Beginn der Arbeit wird im folgenden Kapitel der Stand der Technik zu den für diese Arbeit relevanten Themengebieten beschrieben. Abschnitt 2.1 beschreibt die Lichtsignalsteuerung in Netzen und geht dabei auch auf die dazu nötigen Komponenten ein. In Abschnitt 2.2 werden bekannte Umsetzungen von Netzsteuerungsverfahren dargestellt. Abschnitt 2.3 geht auf kooperative Lichtsignalsteuerung und deren Komponenten ein. Dies beinhaltet sowohl die erweiterte Fahrerinformation als auch die Nutzung erweiterter Fahrzeuginformationen zur Lichtsignalsteuerung. In Abschnitt 2.4 werden schließlich Pilotanwendungen der kooperativen Lichtsignalsteuerung beschrieben.

2.1 Netzsteuerung von Lichtsignalanlagen

Die Grundlagen der verkehrstechnischen Bestimmungen zur Steuerung von Lichtsignalanlagen sind in Deutschland in der *Richtlinie zur Lichtsignalsteuerung* (RiLSA) [FGSV, 2010a] und im *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* (HBS) [FGSV, 2009] zusammengefasst. Für das Jahr 2014 ist eine überarbeitete Version des HBS angekündigt. Da die Steuerung am Knotenpunkt nicht Teil dieser Arbeit ist, wird im Folgenden nur die Netzsteuerung beschrieben.

In der RiLSA [FGSV, 2010a] wird die Netzsteuerung unter dem Begriff Koordinierung von Lichtsignalanlagen geführt. Die Koordinierung wird dabei in die Koordinierung am Knotenpunkt, im Straßenzug und im Netz unterteilt.

In den *Hinweisen für die Lichtsignalsteuerung in Straßennetzen* wird die Netzsteuerung als „... die netzbezogene Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Zusammenhänge der Bewegung der Fahrzeuge in einem Straßennetz bezeichnet. „Netzsteuerung“ wird damit als abstrakter Begriff und unabhängig von der Unterscheidung in Zentral- und Lokalsteuerung betrachtet. Entscheidend ist die Herangehensweise des Verkehrsplaners.“ [FGSV, 2014]

2.1.1 Klassifizierung von Netzsteuerungen

Für einen besseren Überblick können Steuerungen in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Die Kategorien sind nicht vollständig voneinander unabhängig.

Steuerungsmethodik

Die RiLSA [FGSV, 2010a] unterscheidet die Steuerung von Lichtsignalanlagen in Festzeitsteuerungen sowie regelbasierte und modellbasierte Steuerungen:

- Die Festzeitsteuerung stellt die einfachste Art der Steuerung von Lichtsignalanlagen dar. Bei ihr wird ein vorab definiertes Signalprogramm abgearbeitet. Es hat eine feste Umlaufzeit, Phasenfolge und Phasendauer und Versatzzeit zu den Signalprogrammen der Nachbarknotenpunkte und wiederholt sich zyklisch. In der Regel wird es in Kombination mit einer zeitlichen Bedingung geschaltet, da für die unterschiedlichen Verkehrsbelastungen im Tagesverlauf verschiedene Signalprogramme versorgt werden.
- Regelbasierte Steuerungen prüfen meist sekundlich Bedingungen anhand einer Ablauflogik. Sie nutzen dazu direkt aus dem Verkehrsfluss erhobene Messgrößen (z.B. Zeitlücken, Belegungsgrade). Aus diesen werden über Vergleichs- und Schwellenwerte Rückschlüsse auf den Verkehrszustand geschlossen und entsprechende Entscheidungen in der Steuerung veranlasst.
- Modellbasierte Steuerungen nutzen für die Anpassung der Steuerung nicht direkt die erhobenen Messwerte, sondern in einem Modell auf Grundlage der erhobenen Messwerte weiterverarbeitete Kenngrößen. Die Steuerungen benötigen neben dem Verkehrsmodell auch ein Steuerungsmodell, das die Steuerungsvariablen systematisch durchsucht und ein Wirkungsmodell, das die Steuerungsvariablen bewertet und in einer Zielfunktion zusammenfasst und gewichtet. Eine modellbasierte Lichtsignalsteuerung ist allgemein für Knotenpunkte beziehungsweise Verkehrsnetze beschrieben und wird durch Konfigurationsdateien der individuellen Umgebung angepasst.

Nach BOLTZE ET AL. [2010] sind die Bezeichnungen regelbasiert und modellbasiert allerdings unscharf, da auch regelbasierte Steuerungen von Modellvorstellungen ausgehen, und modellbasierte Steuerungen auch Regeln beinhalten können. Eine modellbasierte Netzsteuerung definiert sich daher durch Optimierung einer Zielfunktion. Dazu ist es nötig die Steuerungsvariablen unter Verwendung eines Verkehrsflussmodells und eines Verkehrswirkungsmodells zu bewerten.

Abb. 2-1 stellt die regelbasierte und modellbasierte Umsetzung einer Netzsteuerung gegenüber.

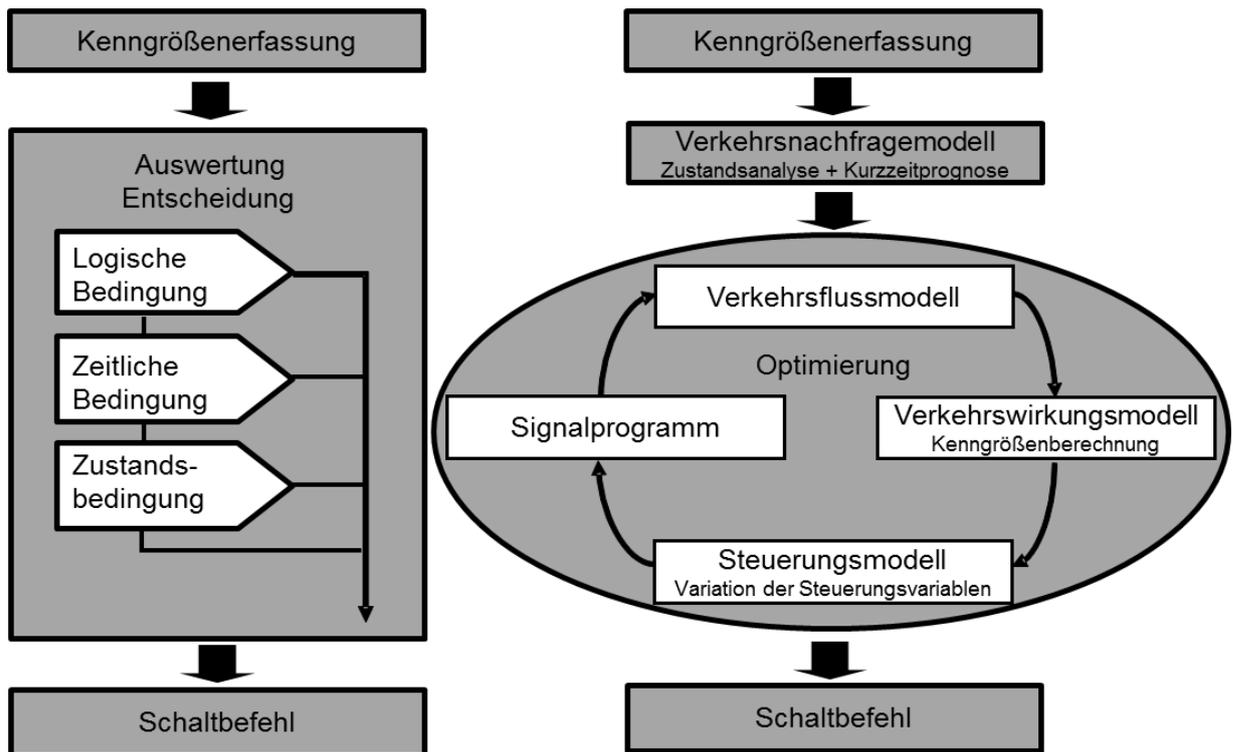


Abb. 2-1 Regelbasierte Umsetzung und modellbasierte Umsetzung einer Steuerung [FGSV 2010a]

Aggregation

Die RiLSA [FGSV, 2010a] unterscheidet die Steuerung von Lichtsignalanlagen zudem in mikroskopische und makroskopische Steuerungen:

- Mikroskopische Steuerungen reagieren auf Einzelfahrzeugdaten (z.B. Zeitlücken, Geschwindigkeiten). Sie werden in der Regel zu kurzfristigen Anpassungen der Steuerung verwendet.
- Makroskopische Steuerungen nutzen aggregierte Kenngrößen zur Steuerung (z.B. Verkehrsstärken, mittlere Staulängen). Sie werden in der Regel zur Anpassung der Steuerung auf langfristige Verkehrsnachfrageänderungen verwendet.

Häufig werden mikroskopische und makroskopische Steuerungen miteinander kombiniert. Die makroskopische Steuerung bildet dabei den Rahmen für die mikroskopische Steuerung.

Zeitbasis

Für die Steuerung mehrerer Knotenpunkte lässt sich unterscheiden, ob diese auf Grundlage einer gemeinsamen Zeitbasis arbeiten:

- Zyklische Steuerungen verfügen über eine gemeinsame Zeitbasis, die Umlaufzeit. Die Verknüpfung der Knotenpunkte erfolgt dabei oft über sogenannte Rahmenpläne, die der Steuerung Zeitbereiche für die einzelne Phasen oder Signalgruppen vorgeben. Für

vordefinierte Koordinierungen von Knotenpunkten bieten zyklische Steuerungen Vorteile.

- Azyklische Steuerungen haben keine gemeinsame Zeitbasis und damit auch keinen festen Versatz zwischen den Knotenpunkten. Sie verfügen damit über mehr Freiheitsgrade, da lediglich minimale beziehungsweise maximale Freigabezeiten für Phasen oder Signalgruppen festgelegt sind.

Steuerungsdefinition

Die zeitgleiche Freigabe von Verkehrsströmen der Steuerungen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen:

- Phasenorientierte Steuerungen greifen auf vordefinierte Phasen zurück. Diese beinhalten jeweils Signalgruppen, die zueinander verträglich Verkehrsströme steuern und zusammen freigegeben werden. Die Steuerung setzt sich aus den Phasen und den ebenfalls vordefinierten Phasenübergängen zusammen.
- Signalgruppenorientierte Steuerungen gehen von einzelnen Signalgruppen aus. In Abhängigkeit der Belastung der Verkehrsströme können die Signalgruppen verträglicher Verkehrsströme miteinander kombiniert werden.

Systemarchitektur

Schließlich können sich die Systeme auch noch hinsichtlich ihrer Systemtechnik unterscheiden. Die Systemtechnik spielt zwar für die Methodik der Steuerung keine Rolle, ist aber für die Einführung eines konkreten Netzsteuerungsverfahrens von großer Bedeutung, da eine Verwendung bestehender Schnittstellen und bestehender Systemarchitekturen Kosteneinsparungen bedeuten und das Umsetzungshemmnis minimieren:

- Bei zentralen Steuerungen werden die Daten aller Steuergeräte an einen Zentralrechner weitergeleitet. Im Zentralrechner werden die Steuerungsentscheidungen getroffen und vom Steuergerät nur noch umgesetzt.
- Dezentrale Steuerungen treffen ihre Steuerungsentscheidungen in den lokalen Knotenpunktsteuergeräten. Ein Datenaustausch findet dabei meist mit den Steuergeräten der Nachbarknotenpunkte statt.

Häufig werden zentrale und dezentrale Steuerung kombiniert. Die zentrale Steuerung gibt der dezentralen Steuerung dabei Rahmenbedingungen vor. Dies geschieht meist in Form eines Rahmensignalzeitenplans.

2.1.2 Verkehrssteuerungsmodelle (Optimierung)

Im Verkehrssteuerungsmodell werden die Freiheitsgrade der Steuerung beschrieben und systematisch nach ihrem Optimum durchsucht.

Die Optimierung der Steuerungsvariablen erfolgt über eine Zielfunktion, die die im Verkehrswirkungsmodell ermittelten Kenngrößen, die jeweils auf Grundlage eines Satzes festgelegter Steuerungsvariablen ermittelt werden, mit einer festzulegenden Wichtung zu einem Wert der Zielfunktion zusammenfasst. Die Zielfunktion wird dabei entweder minimiert (z.B. Halte, Fahrzeit, Emissionen) oder maximiert (z.B. Abfluss).

In Abhängigkeit der Anzahl der Steuerungsvariablen und ihrer Anzahl möglicher Werte kann der zu durchsuchende Lösungsraum sehr groß werden. Eine Möglichkeit den Lösungsraum zu reduzieren, ist das Optimierungsproblem nicht als Ganzes zu betrachten, sondern es zu parallelisieren. Dies kann zum Einen funktional geschehen, also getrennt nach Steuerungsvariablen der lokalen Steuerung (z.B. Freigabezeiten, Phasenfolge) und der Netzsteuerung (z.B. Versatzzeiten), und zum Anderen geographisch (z.B. Optimierung von Teilnetzen, Optimierung der Versatzzeit von Sektoren). Es werden daher Optimierungsalgorithmen eingesetzt, um eine möglichst gute Lösung, im Idealfall das Minimum, zu finden.

PAPAGEORGIU ET AL. [2012] beschreiben eine Vielzahl vorhandener Optimierungsalgorithmen. MERTZ [2001] und BRAUN [2008] gehen auf ihre Anwendbarkeit für die Optimierung der Lichtsignalsteuerung ein. Für die Optimierung der Steuerung von Lichtsignalanlagen lassen sich mathematisch exakte Verfahren, mathematische Näherungsverfahren und heuristische Verfahren verwenden. Im Folgenden werden diese mit jeweils einem Beispiel kurz erläutert:

- Mathematisch exakte Verfahren finden in der Regel das globale Optimum. Das einfachste mathematisch exakte Verfahren ist die vollständige Enumeration. Sie ist aufgrund ihres Rechenaufwands allerdings nur für kleine Suchräume einsetzbar.
- Mathematische Näherungsverfahren gehen zur Lösungssuche iterativ vor. Ein Beispiel für ein einfaches mathematisches Näherungsverfahren ist der sogenannte Down-Hill-Algorithmus (auch Hill-Climb-Algorithmus wenn ein Maximum gesucht wird). Der Algorithmus geht von einem Startpunkt aus in einer bestimmten Schrittweite zu einer Nachbarlösung. Ist diese besser als die bisherige Lösung, wird sie der neue Startpunkt, andernfalls wird von der bisherigen Lösung aus weitergesucht, wobei die Schrittweite verkleinert werden kann. Nachteil des Algorithmus ist, dass er sehr schnell in ein lokales Optimum laufen kann und dieses nicht mehr verlässt.
- Heuristische Verfahren versuchen mit begrenztem Wissen eine Lösung zu finden (die optimale Lösung ist in der Regel nicht bekannt) und übertragen oft Prozesse aus anderen Bereichen auf eine bestimmte Problemstruktur. Für die Optimierung der Lichtsignalsteuerung sind in den letzten Jahren oft evolutionäre Algorithmen (auch geneti-

sche Algorithmen genannt) verwendet worden (z.B. CEYLAN UND BELL [2004], STEVANOVIC ET AL. [2007], BRAUN [2008], POHLMANN [2010]). Evolutionäre Algorithmen versuchen den biologischen Evolutionsprozess nachzubilden, indem sie ihre natürlichen Prozesse wie zum Beispiel Selektion, Mutation oder Rekombination nutzen. Evolutionäre Algorithmen eignen sich, um sehr große Lösungsräume zu durchsuchen. Die Gefahr, dass sich der Algorithmus in ein lokales Optimum verläuft, ist gering.

2.1.3 Verkehrsflussmodelle

Das Verkehrsflussmodell bildet aus den Eingangsdaten des Verkehrsnachfragemodells und den aktuellen Werten der Steuerungsvariablen aus dem Verkehrsteuerungsmodell den Verkehrsablauf innerhalb des Steuerungsgebietes nach.

Das verwendete Verkehrsflussmodell hängt stark mit dem im Verkehrswirkungsmodell zu bewertenden Kenngrößen zusammen. Verkehrsflussmodelle lassen sich in makroskopische und mikroskopische Modelle unterscheiden. Modelle, die beide Ansätze kombinieren, zum Beispiel indem sie auf Strecken makroskopisch modellieren und am Knotenpunkt mikroskopisch, werden mesoskopisch genannt.

Makroskopische Verkehrsflussmodelle

Makroskopische Verkehrsflussmodelle arbeiten mit makroskopischen Kenngrößen (Verkehrsdichte, mittlere Geschwindigkeit, Verkehrsstärke). Einen Überblick über makroskopische Verkehrsflussmodelle stellt beispielweise WILLIAMS [2001] vor. Im Folgenden wird nur näher auf einige Verkehrsflussmodelle eingegangen, die in der Steuerung von Lichtsignalanlagen Anwendung finden.

Das am weitesten verbreitete Pulkauflösungsmodell ist von ROBERTSON [1969]. Es propagiert einen, mittels halteliniennaher Detektoren gemessenen, bekannten Fahrzeugpulk mit einer durchschnittlichen Fahrtzeit zur stromaufwärts gelegenen Haltelinie und schätzt so seine Ankunftsverteilung. Über einen Glättungsfaktor wird die Auflösung des Pulks modelliert. Ergebnis des Modells ist der Verlauf der Verkehrsstärke an der stromaufwärtsgelegenen Haltelinie über die Zeit. Das Modell wurde sehr häufig für verschiedene Randbedingungen kalibriert (vgl. z.B. FARZANEH [2005] und AXHAUSEN [1987]).

Auch BÖTTGER [1972] verschiebt bekannte Pulks mit einer durchschnittlichen Fahrtzeit zur stromaufwärtsliegenden Haltelinie. Über die Intensivitätsverteilung der Zuflüsse wird der Pulk des Verkehrsstroms der Hauptrichtung bestimmt. Die Pulkauflösung wird durch einen Prozentsatz verspäteter Fahrzeuge abgebildet. Diese werden im Pulk um einen bestimmten Zeitversatz verschoben und dort zu den nicht verspäteten Fahrzeugen aufaddiert. Auch hier ist das Ergebnis ein Verlauf der Verkehrsstärke an der stromaufwärtsgelegenen Haltelinie über die Zeit.

Das Cell Transmission Model (CTM) [Daganzo, 1994] [Daganzo, 1995] ist ein raum- und zeitdiskretes Modell. Das Netz wird in Zellen aufgeteilt. Jede Zelle verfügt über eine maximale Verkehrsdichte und einen maximalen Zu- und Abfluss, sowie eine freie Geschwindigkeit. Die Zusammenhänge zwischen Verkehrsdichte, Verkehrsstärke und Geschwindigkeit werden über ein vereinfachtes trapezförmiges Fundamentaldiagramm [LIGHTHILL UND WITHAM, 1955] abgebildet. Das Modell wurde ursprünglich für Autobahnen entwickelt. Durch Erweiterungen des Modells durch FLOTTERÖD UND NAGEL [2005], ALMASRI [2006] ist inzwischen aber auch eine innerstädtische Modellierung und Bewertung möglich.

Alle aufgeführten Modelle verwenden vertikale Rückstaumodelle, das heißt der Rückstau verfügt über keine Ausdehnung. Eine Erweiterung des CTM durch ZENG [2012] erlaubt auch die Modellierung horizontaler Rückstaus.

Mikroskopische Verkehrsflussmodelle

Mikroskopische Verkehrsflussmodelle bilden das Verhalten einzelner Fahrzeuge nach. Mikroskopische Verkehrsflussmodelle lassen sich nach HOOGENDOORN UND BOVY [2001] in Zellulare Automaten und Fahrzeugfolgemodelle unterteilen.

Zellulare Automaten [NAGEL, 1996] beschreiben das Netz als aneinandergereihte Zellen, die jeweils ein Fahrzeug fassen können. Die Beschreibung der Bewegung ist räumlich und zeitlich diskret. Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sind diskret. Die Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Fahrzeugs kann nur das Vielfache der Zellenlänge annehmen, womit das Modell keine realitätsnahen Fahrzyklen erzeugt.

Fahrzeugfolgemodelle lassen sich unterteilen in Sicherheits-Abstands-Fahrzeugmodelle, Reiz-Reaktions-Fahrzeugmodelle und psycho-physische Fahrzeugfolgemodelle. Die Beschreibung der Fahrzeugbewegung der theoretischen Modelle ist räumlich und zeitlich kontinuierlich. In der softwaretechnischen Umsetzung sind die Modelle allerdings zeitdiskret. Sicherheits-Abstandsmodelle (z.B. PIPES [1953] und GIPPS [1981]) beschreiben das Fahrverhalten anhand des Abstands zum Vorderfahrzeug, wobei ein gewisser Sicherheitsabstand nicht unterschritten wird. Verzögerungsprozesse werden dabei berücksichtigt. Bei Reiz-Reaktionsmodellen (z.B. GAZIS ET AL. [1961] und NEWELL [1961]) versucht das Fahrzeug sein Verhalten an das Vorderfahrzeug anzupassen. Die Reaktion hängt dabei von der Reizstärke des Vorderfahrzeugs, also seiner Beschleunigung oder Verzögerung, und der Sensibilität des Folgefahrzeugs ab. Psycho-physische Modelle (z.B. WIEDEMANN [1974] und KRAUS ET AL. [1999]) begrenzen den Reiz des Vorderfahrzeugs durch das Setzen von Wahrnehmungsgrenzen. Des Weiteren werden auch Fahrstreifenwechsel und Überholvorgänge im Modell berücksichtigt.

Durch die Abbildung einzelner Fahrzeuge, inklusive ihrer räumlichen Ausdehnung, haben mikroskopische Verkehrsflussmodelle horizontale Rückstaus.

2.1.4 Verkehrswirkungsmodelle

Im Verkehrswirkungsmodell erfolgt die Ermittlung der Kenngrößen der Verkehrseffizienz und der Emissionen. Dies geschieht auf Grundlage des Verkehrsablaufs, der anhand der Steuerungsgrößen im Verkehrsflussmodell ermittelten wird.

Bewertung der Verkehrseffizienz

Da Ankunftsrate und Servicerate bekannt sind, ist die Ermittlung der Kenngrößen Wartezeit und Anzahl der Halte möglich. ROBERTSON [1969] berechnet die Wartezeit etwa nach der Formel von WEBSTER [1958]. Um stochastische Schwankungen und Überlastungen abzubilden kann auch das makroskopische Warteschlangenmodell nach KIMBER UND HOLLIS [1979] verwendet werden.

Im CTM wird die Wartezeit über die Summe der Fahrzeuge berechnet, die eine Zelle während eines Zeitintervalls nicht verlassen können. Die Anzahl der Halte kann nach LIN UND WANG [2004] berechnet werden, indem die abfließenden Fahrzeuge des aktuellen Zeitintervalls mit den zugeflossenen des letzten Zeitintervalls verglichen werden.

Das Ergebnis mikroskopischer Verkehrsflussmodelle sind Fahrzyklen. Für die Berechnung der Wartezeit wird hier meist die realisierte Fahrtzeit mit einer idealen Fahrtzeit verglichen. Für die Berechnung der Anzahl der Halte wird meist ein sogenanntes Staukriterium in Form einer Hysterese gesetzt. Das Fahrzeug muss für einen Halt eine festgelegte Geschwindigkeit unterschreiten und anschließend wieder eine festgelegte Geschwindigkeit überschreiten.

Bewertung der Emissionen

Die Bewertung der Emissionen auf Grundlage makroskopischer Kenngrößen wird meist über eine Aggregation mikroskopischer Eingangsgrößen realisiert (vgl. Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [INFRAS, 2010] und KLUNDER ET AL. [2013]). Als makroskopische Kenngrößen im HBEFA werden Fahrzeugkategorie, die Verkehrssituation (in Abhängigkeit der Auslastung), Steigungen und das Bezugsjahr verwendet. Eingangsdaten sind Fahrzyklen mit unterschiedlichen Fahrern und Fahrzeugen aus dem Abgasprüfstand der Technischen Universität Graz [HAUSBERGER ET AL., 2009]. KLUNDER ET AL. [2013] verwenden Fahrzeugkategorie, Schwerlastanteil, Straßenkategorie und die durchschnittliche Geschwindigkeit. Eingangsdaten sind hier Fahrzyklen aus VISSIM [PTV, 2012a]. Eine Unterscheidung verschiedener Versatzzeiten scheint aufgrund der Aggregation nicht möglich, da eine geringe Änderung der Versatzzeit nicht zu entscheidenden Änderungen der makroskopischen Kenngrößen des Verkehrsflusses führen würde, die bei der Aggregation berücksichtigt werden könnten und somit hinsichtlich der Emissionen nicht bewertet werden können.

Es gibt zahlreiche Modelle zur Berechnung verkehrsbedingter Emissionen, basierend auf mikroskopischen Fahrzyklen. Diese beruhen im Grunde alle auf einer mehr oder weniger großen Stichprobe von realitätsnahen Fahrzyklen, die auf Abgasprüfständen erhoben wurden. Über

eine Sensitivitätsanalyse wird geprüft, welche Eingangsdaten einen Einfluss auf die Emissionen haben.

Eines der ersten mikroskopischen Emissionsmodelle ist in der, von der Volkswagen AG und der PTV System GmbH entwickelten, Simulationssoftware ADVANCE enthalten [Kohoutheek et al., 1999a][Kohoutheek et al., 1999b]. Es verwendet sekundliche Geschwindigkeits-/Beschleunigungswerte aus VISSIM und berechnet aus diesen, basierend auf aggregierten Motorkennfeldern, sekundlich die Emissionen. Das Motorkennfeld basiert auf Messfahrten im Abgasprüfstand der Technischen Universität Graz. Der Aufwärm- und Abkühlprozess des Motors wird über ein thermodynamisches Teilmodell berücksichtigt. Das Modell ist als Modul für VISSIM 5.40 verfügbar.

Eine Weiterentwicklung dieses Modells ist das **Passenger car and Heavy duty Emission Model (PHEM)**. Es handelt sich hierbei um die Rohdaten der Faktoren des aktuellen HBEFA [INF-RAS, 2010]. Als Eingangsdaten verwendet es Fahrzeugeigenschaften wie Masse, Fahrwiderstand und die Getriebeübersetzung und Schadstoffklasse, Motorkennfelder und Geschwindigkeitsprofile mit einer Auflösung von einem Hertz. Die Motorkennfelder stammen aus dem Abgasprüfstand der Technischen Universität Graz [HAUSBERGER ET AL., 2009]. Das Modell beinhaltet zudem Teilmodelle zur Berücksichtigung von Motortemperaturen, Katalysatoren und Getriebe.

VERSIT+ [SMIT ET AL, 2007] basiert auf einer großen Anzahl (12.000) an Messfahrten, die auf dem Abgasprüfstand von TNO durchgeführt wurden. Das Modell enthält 264 verschiedene Fahrzeugmodelle unterschiedlicher Schadstoffklassen und Kraftstofftypen. Eingangsdaten des Modells sind Geschwindigkeitsprofile, die Fahrzeugklasse, Beschleunigungen und Fahrwiderstände. Das Modell beinhaltet weitere Teilmodelle, zum Beispiel zur Berücksichtigung von Motortemperaturen.

Weitere Modelle sind unter anderem COPERT [NTZIACHRISTOS, L. ET AL., 2009], VT-Micro [AHN ET AL., 2002], CMEM (Comprehensive Modal Emissions Model) [Barth et al., 2000] und MODEM [Park et al., 2001].

2.2 Netzsteuerungsverfahren

„Ein Netzsteuerungsverfahren ist die konkrete Ausprägung einer Netzsteuerung, also die Hardware, Software und Planung, die zur Netzsteuerung eines Gebiets konkret eingesetzt wird.“ [FGSV, 2014] Im Folgenden werden Netzsteuerungsverfahren näher beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf weiter verbreiteten Netzsteuerungsverfahren. Aufgrund der Vielzahl von Umsetzungen wird nicht auf einzelne Bewertungen eingegangen.

2.2.1 SCATS

SCATS (**Sydney Coordinated Adaptive Traffic System**) [SIMS UND DOBINS, 1980] ist ein regelbasiertes, zentral gesteuertes Verfahren mit einer dezentralen Modifikation der Signalpläne. Es wurde vom Verkehrsministerium von Neu Süd Wales entwickelt und wurde 1964 eingeführt. Seit 1972 wird es rechnergestützt betrieben. Es wird in insgesamt über einhundert Städten weltweit eingesetzt.

SCATS arbeitet mit regionalen Einheiten, die jeweils über einen kritischen Knotenpunkt und beliebig viele nicht kritische Knotenpunkte verfügen. Diese regionalen Einheiten haben die gleiche Umlaufzeit. Regionale Einheiten können sich verbinden, wenn die, durch die kritischen Knotenpunkte bestimmten, Umlaufzeiten benachbarter Einheiten über mehrere Umläufe übereinstimmen. [STEVANOVIC, 2010]

SCATS arbeitet mit Detektoren direkt an der Haltlinie. Für jedes Verkehrsnachfrageszenario sind zentral im sogenannten Gebietsrechner in einer Datenbasis Signalprogramme, mit ihrer Versatzzeit, Umlaufzeit und Freigabezeitaufteilung, für jeden Knoten als strategische Vorgaben hinterlegt. Für diese werden, über die makroskopische Kenngröße des Auslastungsgrades, Freigabezeiten und Umlaufzeit einmal pro Umlauf zyklisch modifiziert und an die Steuergeräte geschickt.

Auf lokaler Ebene kann die Steuerung aufgrund von Anforderungen der Nebenrichtung oder Zeitlückensteuerung angepasst werden.

2.2.2 SCOOT

SCOOT (**Split Cycle Offset Optimization Technique**) [HUNT ET AL., 1981] ist ein modellbasiertes, rein zentrales Steuerungsverfahren, das auf lokaler Ebene keine verkehrsabhängige Steuerung berücksichtigt. Die Entwicklung wurde 1973 vom Transport Research Laboratory (TRL) begonnen. Die aktuelle SCOOT Version ist SCOOT MC3 (Managing Congestion, Communications and Control) [SCOOT, 2014]. Neben SCATS ist es das weltweit verbreitetste Netzsteuerungsverfahren [STEVANOVIC, 2010].

SCOOT arbeitet mit Detektoren, die am Beginn einer Zufahrt liegen und damit auf der Knotenpunktausfahrt des stromaufwärts liegenden Knotenpunkts. Es optimiert Freigabezeitverteilung, Versatzzeit und Umlaufzeit getrennt. Phasenanzahl und Phasenfolge sind vordefiniert.

Die Umlaufzeit wird in einem Fünfminutenintervall anhand des Auslastungsgrades des am stärksten belasteten Knotens optimiert, wobei die Auslastung 90 Prozent betragen soll. Die Anpassung der Freigabezeit geschieht wenige Sekunden vor jedem Phasenende, indem geprüft wird, ob die Auslastung der belastetsten Zufahrt am Knotenpunkt durch einen Abbruch oder eine Verlängerung der Freigabezeit geringer wird. [FRIEDRICH, 2002]

Die Versatzeit wird zyklisch einmal pro Umlauf mit dem, auf dem offline Optimierungsmodell TRANSYT [ROBERTSON 1969] (vgl. Abschnitt 2.1.3) basierenden, Verkehrsflussmodell optimiert. SCOOT misst dabei den Abfluss des stromaufwärts liegenden Knotenpunktes und bestimmt so den Zufluss der jeweiligen Knotenpunktzufahrt. Zusätzlich werden Daten aus vorangegangenen Umläufen bei der Berechnung der Ankunftsverteilung berücksichtigt. Als Ergebnis liefert das Verkehrswirkungsmodell aus den makroskopischen Ankunftsverteilungen Wartezeiten und Anzahl der Halte, die über eine Zielfunktion gewichtet werden. Die Optimierung erfolgt über einen Down-Hill-Algorithmus. Abb. 2-2 stellt das Modell zur Optimierung der Versatzeit dar.

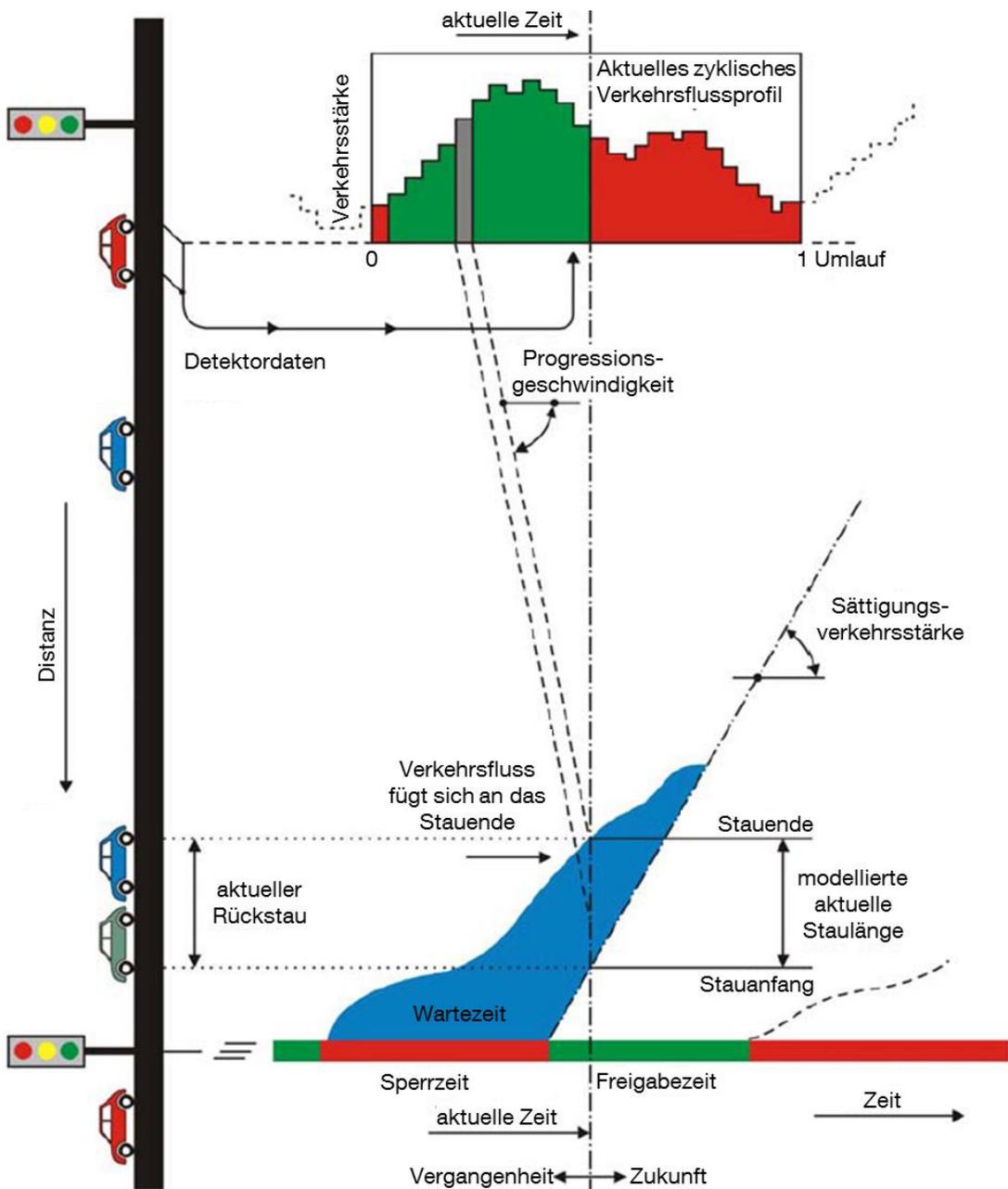


Abb. 2-2 Funktion des in SCOOT verwendeten Pulkauflösungsmodell nach ROBERTSON [1969] (in Anlehnung an SCOOT [2014])

Die Priorisierung des ÖPNV wird durch eine Freigabezeitverlängerung oder den Wechsel in die entsprechende Phase umgesetzt. „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]

2.2.3 UTOPIA

UTOPIA (**U**rban **T**raffic **O**ptimization by **I**ntegrated **A**utomation) [DONATI ET AL., 1984] ist ein hierarchisch-dezentralisiertes, modellbasiertes Steuerungsverfahren. Es wurde von MIZAR Automation, Centro Ricerche Fiat (CRF) und ITAL TEL entwickelt. Auf lokaler Ebene wird es meist mit SPOT (System for Priority and Optimisation of Traffic) kombiniert, wobei beide Verfahren inzwischen unter dem Namen UTOPIA laufen. Die erste Umsetzung erfolgte 1985 in Turin und ist bis heute in Betrieb. Weitere Implementierungen befinden sich vornehmlich in Italien, den Niederlanden und Skandinavien.

UTOPIA nutzt Detektoren an den Abflüssen der Knotenpunkte. Das Verfahren arbeitet sowohl auf zentraler, als auch auf lokaler Ebene mit einem gleitenden Zeithorizont.

Auf zentraler Ebene wird mit einem Planungshorizont von 30-60 Minuten gearbeitet, der alle fünf Minuten aktualisiert wird. Es wird hier ein makroskopisches Verkehrsflussmodell verwendet. Dazu werden basierend auf einer Quelle/Ziel-Schätzung Rahmenvorgaben für jeden Knotenpunkt berechnet, indem die Fahrzeit im Netz minimiert wird. Die Rahmenvorgaben enthalten minimale und maximale Phasenlängen, Versatzzeiten und Gewichte für die lokale Zielfunktion.

Auf lokaler Ebene werden die Fahrzeugankünfte an der Haltelinie durch die Detektoren in den Abflüssen der Nachbarknoten mit einem gleitenden Zeithorizont von 120 Sekunden prognostiziert. Der Zeithorizont wird dabei alle 3 Sekunden aktualisiert. Dazu werden eine konstante Sättigungsverkehrsstärke während der Freigabezeit und eine konstante mittlere Progressionsgeschwindigkeit der Fahrzeugpulks angenommen. Anhand der makroskopischen Ankunftsverteilungen wird die Phasenlänge über eine Zielfunktion, basierend auf Fahrzeit, Anzahl der Halte und Staulängen, optimiert. Das Verfahren arbeitet damit azyklisch.

2.2.4 Motion

Motion (**M**ethod for the **O**ptimization of **T**raffic **S**ignals In **O**nline **C**ontrolled **N**etworks) [BUSCH UND KRUSE, 1993][BUSCH UND KRUSE, 2002] ist ein zentrales, modellbasiertes Steuerungsverfahren. Es wurde von Siemens entwickelt. Umsetzungen des Netzsteuerungsverfahrens finden sich im Wesentlichen in Deutschland. Die aktuelle Version ist SITRAFFIC Motion MX 4.0 [Mück, 2008].

Motion benötigt Detektoren an möglichst allen Zu- und Abflüssen des zu optimierenden Netzes. In der Regel sind diese Bemessungsdetektoren circa 40 Meter vor der Haltelinie. Die

Optimierung der Umlaufzeit, Freigabezeitanteile, Phasenfolge und Versatzzeit erfolgt zyklisch in einem Optimierungsintervall von 5-20 Minuten und ist zweigeteilt. Grundlage für die Optimierung ist eine Schätzung der Abbiegeraten, wobei das Netz in möglichst viele, und damit einfach zu berechnende, Teilnetze zerlegt wird.

Im ersten Schritt werden Umlaufzeit, Freigabezeit und Phasenfolge über den Auslastungsgrad bestimmt, wobei die Umlaufzeit des am stärksten belasteten Knoten für die übrigen maßgebend ist. Es wird dazu das Verfahren von GE [2010] verwendet. Im zweiten Schritt wird die Versatzzeit optimiert. Dies geschieht abschnittsweise jeweils für zwei benachbarte Knotenpunkte nach einem Optimierungsplan über den Ansatz von Böttger [1972]. Der Ansatz wurde von MÜCK UND POSCHINGER [2009] erweitert. Da die Ankunftsverteilung für die Fahrtrichtung entgegen dem Optimierungsplan erst nach der Optimierung des nächsten Sektors bekannt ist, kann diese nun a priori geschätzt und im Gegensatz zu BÖTTGERS [1972] Ansatz, der nur eine Ankunftsverteilung verwendet, entsprechend parametrisiert werden.

Ergebnis der Optimierung sind Rahmensignalpläne, die von einer lokalen regelbasierten Steuerung abgeändert werden können.

2.2.5 BALANCE

BALANCE (**BAL**ancing **Ad**aptive **N**etwork **C**ontrol **m**ethod) [FRIEDRICH, 1999] ist ein zentrales, modellbasiertes Steuerungsverfahren. Es wurde in Zusammenarbeit von GEVAS software und dem Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München im Rahmen der Forschungsprojekte Munich COMFORT [MERTZ, 1996] und TABASCO [Friedrich, 1999] entwickelt. Eingesetzt wird es vorwiegend in Deutschland und Polen. Es ist herstellernunabhängig und kann mit allen europäischen Steuergeräten betrieben werden [STEVANOVIC, 2010].

BALANCE benötigt Detektoren in möglichst allen Zu- und Abfahrten des zu steuernden Netzes. Es können dazu die Bemessungsdetektoren der meist bereits vorhandenen lokalen Steuerungen verwendet werden. Optimierte werden Umlaufzeit, Phasenfolge, Freigabezeitanteile und Versatzzeit. Die Optimierung ist zyklisch in einem 5-20 Minutenintervall. Grundlage dafür ist ein makroskopisches Verkehrsflussmodell, das für das zu optimierende Netz aus den gemessenen Zu- und Abflüssen eine Quelle-Ziel-Beziehung berechnet [WILLUMSEN, 1981] und mittels einer Verkehrsumlegung die Verkehrsströme auf den Netzkanten bestimmt.

Über eine Signalprogrammauswahl kann die Umlaufzeit und Phasenfolge bestimmt werden, in den bisherigen Umsetzungen wird dies allerdings nicht realisiert. Die Optimierung von Freigabezeit und Versatzzeit erfolgt über ein Verkehrsflussmodell, das über die Verkehrsströme aus dem Verkehrsnachfragemodell zyklische Verkehrsflussprofile erzeugt, die Pulkauflösung und Fahrtzeiten berücksichtigt. Mittels der Warteschlangentheorie nach KIMBER UND HOLLIS [1979] werden in der Zielfunktion Wartezeiten, Anzahl der Halte und Rückstaulängen berücksichtigt. Die Optimierung der Zielfunktion erfolgt parallel für alle Steuerungsvariablen mittels eines genetischen Algorithmus [Braun et al., 2009].

Ergebnis der Optimierung sind Rahmensignalpläne, die von lokalen regel- oder modellbasierten Steuerungen auf lokale stochastische Schwankungen in der Verkehrsnachfrage angepasst werden können.

2.2.6 InSync

InSync [RHYTHM, 2014] ist ein hierarchisch-dezentralisiertes, modellbasiertes Steuerungsverfahren. Es wird von der Firma Rhythm Engineering vertrieben und wird in Nordamerika eingesetzt.

Detektoren werden in InSync genutzt um Fahrzeuge, vornehmlich im Rückstau, zu zählen, dazu können neben der herkömmlichen Detektionstechnologie auch Kameras und Bilderkennungssoftware genutzt werden.

Auf zentraler Ebene wird die Koordinierung vordefinierter Streckenzüge festgelegt. Dazu werden ausgehend von einem leitenden Knotenpunkt Grünbänder für die Hauptrichtung anhand einer durchschnittlichen Fahrtzeit und der Knotenpunktsentfernungen realisiert. Die Steuerung des leitenden Knotenpunkts entscheidet, wann die Hauptrichtung freigegeben wird und meldet dies den übrigen Knotenpunkten. Die Weite der Grünbänder wird über die Auslastung berechnet. Durch die Grünbänder haben alle Knotenpunkte eine zyklische Umlaufzeit, die verlängert werden kann, falls ein Knotenpunkt mehr Freigabezeit benötigt um die übrigen Verkehrsströme abzuwickeln.

Auf lokaler Ebene kann die nicht von den Grünbändern genutzte Freigabezeit an die Verkehrsströme verteilt werden. Für die Berechnung der Phasenfolge werden Rückstaus, Anforderungen anderer Verkehrsteilnehmer, wie zum Beispiel Fußgänger, und geplante Grünbänder berücksichtigt. Rückstaulängen und Anforderungen werden dazu in einen Zeitbedarf umgewandelt, der den Phasenwechsel mit beinhaltet. Die geplanten Grünbänder stellen Randbedingungen dar. Auf dieser Grundlage wird sekundlich die Phasenfolge und Phasendauer optimiert. Optimierungskriterien sind Wartezeit und Rückstaulänge.

2.2.7 Weitere Netzsteuerungsverfahren

TUC (Traffic-responsive **U**rban **C**ontrol) [DIAKAKI ET AL., 2002] ist ein modellbasiertes Steuerungsverfahren. Es nutzt ein Regelungssystem zur Optimierung der Freigabezeit auf Basis des letzten Umlaufs. Versatzzeit und Umlauf, ebenso die Beschleunigung des ÖPNV werden in separaten Modulen optimiert. Die Phasenfolge ist fest.

PRODYN (**D**ynamic **P**rogramming) [HENRY ET AL., 1983] ist ein dezentrales, modellbasiertes Steuerungsverfahren. Es optimiert anhand der Verlustzeit im Netz und arbeitet azyklisch, und entscheidet alle 5 Sekunden anhand der Verkehrslage, ob es die Phase wechselt.

RHODES (**Real-Time Hierarchical Optimized Distributed Effective System**) [HEAD UND MIRCHANDANI, 1998] ist hierarchisch-dezentrales, modellbasiertes Steuerungsverfahren. Es arbeitet azyklisch und entscheidet von Sekunde zu Sekunde über Phasenwechsel. Zur Optimierung nutzt es eine dynamische Programmierung.

OPAC (**Optimized Policies for Adaptive Control**) [GARDNER, 1983] ist hierarchisch-dezentrales, modellbasiertes Steuerungsverfahren. Es nutzt einen gleitenden Prognosehorizont, der einem Umlauf entspricht, und enumeriert den Lösungsraum. Die Optimierung erfolgt zyklisch mittels einer Zielfunktion, die Verlustzeiten und die Anzahl der Halte verwendet.

ACS LITE (**Adaptive Control Software Lite**) [LUYANDA ET AL., 2003] ist ein zentral-hierarchisches, regelbasiertes Steuerungsverfahren. Hauptziel der Entwicklung, die durch die Federal Highway Administration (FHWA) angestoßen wurde, war ein kostengünstiges und einfach zu bedienendes Verfahren zu entwickeln. Das Verfahren wird ausschließlich in den USA eingesetzt.

ImFlow [VAN VLIET UND TURKSMA, 2013] ist ein dezentrales, modellbasiertes Steuerungsverfahren. Es legt den Fokus auf die politischen Vorgaben der Entscheidungsträger und ermöglicht über das Setzen von Gewichten der Wartezeit für unterschiedlichen Verkehrsträger neben dem motorisierten Individualverkehr, wie Fußgänger, Radfahrer oder den öffentlichen Verkehr Möglichkeiten, diese umzusetzen.

2.3 Kooperative Lichtsignalsteuerung

Die kooperative Lichtsignalsteuerung erweitert die in Abschnitt 2.1 vorgestellten Ansätze um den Austausch von Informationen zwischen Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen, der über stationäre Detektion beziehungsweise die kollektive Information der Fahrer mittels Signalgebern hinausgeht. Dazu wird im Folgenden auf den Weg des Informationsaustauschs zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage, sowie das sich daraus ergebende Potential für die Lichtsignalsteuerung, sowie im Besonderen auf die Information des Fahrers eingegangen. Mit der Rückstaulängenschätzung und der Schaltzeitprognose werden zudem zwei Komponenten aufgegriffen, die eine zuverlässigere Geschwindigkeitsempfehlung des Fahrers ermöglichen sollen, um so langfristig eine größere Akzeptanz und damit eine bessere Befolgung der Empfehlungen beim Fahrer zu erreichen.

2.3.1 Kommunikationssysteme

Die Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander, sowie zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (C2X-Kommunikation) kann in Rundfunkübertragung, zellulare und lokale Kommunikation unterschieden werden.

Rundfunkübertragung

Die erste Form der Kommunikation zwischen der Infrastruktur und Fahrzeugen, meist Navigationsgeräten, wurde mittels Rundfunkübertragung realisiert. Die heute gebräuchlichen Standards sind Digital Audio Broadcasting (DAB) und Digital Video Broadcasting (DVB). Die Kommunikation ist dabei einseitig von der Zentrale zum Fahrzeug. Sie wird hauptsächlich zur kollektiven Störungsmeldung eingesetzt.

Für die Übertragung der Information wird als Nachrichtenformat **Traffic Message Channel** (TMC) oder **Transport Protocol Experts Group** (TPEG) verwendet. Die Datenmenge und Übertragungsgeschwindigkeit ist gering. Aufgrund der kollektiven Information und großen Reichweite sind die Inhalte der Nachrichten wenig spezifisch sondern allgemein. [TISA, 2014]

Zellulare Kommunikation

Zellulare Kommunikation erfolgt über ein Mobilfunknetz und hat damit eine quasi unbegrenzte Reichweite. Über sie kann Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur verwirklicht werden. Das Mobilfunknetz besteht aus einem Kernnetz und mehreren Zugangsnetzen. Das Kernnetz verbindet die Zugangsnetze miteinander. Über das Zugangsnetz erlangt der Anwender Zugang auf das Netz, falls er sich in Reichweite einer Basisstation befindet.

Standards der ersten Generation für die zellulare Kommunikation sind **Global System for Mobile Communications** (GSM) und **General Packet Radio Service** (GPRS). Die Bandbreite und Übertragungsgeschwindigkeit dieser Standards sind lokaler Kommunikation unterlegen. Die dritte und vierte Generation der zellularen Kommunikation **Universal Mobile Telecommunications System** (UMTS) beziehungsweise **Long Term Evolution** (LTE) sind laut NIEUWLAND ET AL. [2012] hinsichtlich Bandbreite und Übertragungsgeschwindigkeit der lokalen Kommunikation ebenbürtig. MENIG [2012] berichtet allerdings von Verbindungsabbrüchen im Rahmen des Projektes TRAVOLUTION, die einer zuverlässigen Übertragung im Weg stehen.

Für die Übertragung wird das Nachrichtenformat TPEG verwendet. Im Gegensatz zur Rundfunkübertragung können aber auch individuelle Nachrichten auf Anfrage versendet werden. Dazu wird vom Fahrzeug ein Service abonniert. Für unterschiedliche Informationsinhalte sind verschiedene Nachrichten definiert. Die Information zu Schaltzeitständen heißt TPEG Traffic Signal Information (TPEG-TSI). [TISA, 2014]

Lokale Kommunikation

Die lokale Kommunikation nutzt direkte ad-hoc-Verbindungen. Die Verbindung erfolgt mittels Wireless Local Area Network (WLAN). Für das System werden neben den fahrzeugseitigen Kommunikationseinheiten auch infrastrukturseitige Kommunikationseinheiten (Road Side

Units (RSU)) benötigt. Die Datenmenge und Übertragungsgeschwindigkeit ist hoch. Die Reichweite beträgt circa 500 Meter. Sie hängt allerdings, vor allem im innerstädtischen Bereich, stark von der Umgebung ab.

Für die Kommunikation wird der IEEE Standard 802.11p genutzt. Die Einführung dieses Standards wird in Europa vom Car to Car Communication Consortium (C2CCC) und dem European Telecommunications Standards Institute (ETSI) verfolgt.

Für den Austausch von Informationen vom Fahrzeug zur Infrastruktur ist die sogenannte Cooperative Awareness Message (CAM) [ETSI, 2013] definiert. Sie dient auch zum Austausch von Informationen unter Fahrzeugen. Für Informationen von der Infrastruktur zum Fahrzeug werden Signal Phase and Timing (SPaT), Geometric Intersection Description (GID) und Decentralized Environmental Notification Message (DENM) [SAE, 2014] verwendet. Eine Beschreibung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Nachrichtenformate erfolgt in Abschnitt 5.4.

2.3.2 Verkehrslageerfassung

Mit Einführung der zivilen Nutzung des Global Positioning System (GPS) Anfang der 1980er Jahre besteht die Möglichkeit fahrzeugseitiger Positionierung mittels sogenannter Floating Car Data (FCD) [Huber, 2001]. Durch die in Abschnitt 2.3.1 beschriebene Kommunikation ist zudem ein Austausch dieser Information möglich. Zusätzlich verfügen die Fahrzeuge heutzutage auch über eine Reihe von Sensoren, mittels der die Umgebung erfasst werden kann (extended FCD (xFCD)). Im Folgenden werden diese Informationen im Hinblick auf die Steuerung von Lichtsignalanlagen besprochen.

Makroskopische Verkehrslage

„Verfahren der makroskopischen Steuerungsebene reagieren auf makroskopische Kenngrößen“ [FGSV, 2010a]. Auf makroskopischer Ebene können fahrzeuggenerierte Daten zur Verbesserung der Schätzung der Verkehrskenngrößen des Verkehrsnachfragemodells dienen. Die makroskopische Verkehrslage schätzt die makroskopische Verkehrskenngrößen auf Grundlage aggregierter Daten. Neben der stationären Detektion, die hauptsächlich Verkehrsstärken und vereinzelt auch lokale mittlere Geschwindigkeiten erfasst, können über FCD auch Fahrtzeiten in eine Verkehrslage einfließen. Eine Aggregation macht hier Sinn, da die Fahrtzeit eines einzelnen Fahrzeugs für einen Verkehrsstrom nicht repräsentativ sein muss.

Für die Anpassung der Freigabezeit wird die Verkehrsstärke verwendet. Eine direkte Verwendung von gemessenen Fahrtzeiten findet in den sich im Markt befindlichen Steuerungsverfahren hingegen selbst für die Koordinierung keine Anwendung, da die erfassten Fahrtzeiten in der Regel stark von der Steuerung abhängen. Auf diese Weise kann, mit der derzeit zur Verfügung stehenden Durchdringung der FCD-Flotten, keine ausreichend genaue Aussage über, für die Steuerung relevante, Verkehrskenngrößen (wie zum Beispiel die Rückstaulängen vor Haltelinien, siehe folgender Abschnitt) ermittelt werden, um eine Versatzzeit anzupassen.

Für die Netzsteuerung von Lichtsignalanlagen ist in der Regel eine Erfassung aller Zu- und Abflüsse der im Verkehrsfluss verwendeten Netzmodelle nötig. Fahrzeuggenerierte Daten könnten beispielsweise für eine Multi-Sensor-Datenfusion verwendet werden (z.B. SCHMIDT ET AL. [2008]; LEONHARDT [2008]; MAIER [2010]). So können beispielsweise die Fahrtzeiten als zusätzliche Quelle zur Schätzung der Verkehrsstärke von nicht gemessenen Kanten verwendet werden und mit bereits vorhandenen Verkehrsstärken anderer Kanten fusioniert werden, um so für diese eine Schätzung vorzunehmen. Aufgrund der geringen Durchdringung vorhandener FCD-Flotten findet eine solche Anwendung in der Praxis allerdings bisher keine Anwendung.

Mikroskopische Verkehrslage

Nicht aggregiert können fahrzeuggenerierte Daten räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsprofile liefern und so zur Schätzung von Ankunftsverteilungen dienen.

WAGNER ET AL. [2009] zeigen für eine verkehrsabhängige Zeitlückensteuerung, die ausschließlich auf C2X-Kommunikation beruht, indem sich die Fahrzeuge an virtuellen Detektoren erfassen lassen, dass mindestens eine Ausstattungsrate von 50 Prozent nötig ist, um eine Verbesserung gegenüber einer optimierten Festzeitsteuerung zu erzielen. Ab einer Ausstattungsrate von 85 Prozent können Ergebnisse einer konventionellen verkehrsabhängigen Steuerung erreicht werden.

LÄMMER ET AL. [2009] zeigen, dass mit einer Vollerfassung aller Verkehrsteilnehmer (ÖPNV, MIV, NIV) eine deutliche Verringerung der Verlustzeiten (ÖPNV 56 Prozent, MIV 9 Prozent, NIV 36 Prozent) gegenüber heutigen adaptiven lokalen Lichtsignalsteuerungen möglich ist.

MENIG [2012] optimiert neben der lokalen Lichtsignalsteuerung auch die Annäherungsgeschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge. Er zeigt, dass sich die Fahrtzeiten bei einer 100 prozentigen Ausstattungsrate bei hoher Verkehrsnachfrage um bis zu 14 Prozent und bei niedriger Verkehrsnachfrage um bis zu 20 Prozent reduzieren lassen. Halte lassen sich in beiden Fällen sogar fast vollständig vermeiden.

Rückstaulängenschätzung

Neben der direkten Erfassung einzelner Fahrzeuge können fahrzeuggenerierte Daten auch zur Verbesserung der Schätzung mikroskopischer Verkehrskenngrößen genutzt werden. Im Kontext der Lichtsignalsteuerung ist dies die Rückstaulänge, welche zum einen als Verkehrskenngröße des Verkehrsnachfragemodells dienen kann, zum anderen aber auch für eine mikroskopische Steuerung der Lichtsignalanlage. Einerseits ist die Rückstaulängenschätzung ungenauer als eine reine mikroskopische Verkehrslage, da sie eine Aggregation der einzelnen Fahrzeuge zu einem Rückstau vornimmt, die eine Anzahl an Fahrzeugen beinhaltet, damit aber über keine Informationen zur Ankunftsverteilung mehr verfügt, auf die eine lokale Lichtsignalsteuerung direkt regeln kann. Andererseits ist dadurch eine geringere Detektion beziehungsweise Ausstattungsrate nötig, um verwendbare Kenngrößen zu erlangen.

Besonders für eine verbesserte Information des Fahrers in Form einer Geschwindigkeitsempfehlung ist die Anzahl der Fahrzeuge vor der Haltelinie wichtig, um dem Fahrer eine umsetzbare Empfehlung zu geben, die nicht alleine auf der Schaltzeit beruht. Für die Geschwindigkeitsempfehlung können nur Verfahren genutzt werden, die den Rückstau a priori, also im Gegensatz zu posteriori Verfahren, im Voraus schätzen. Posteriori Verfahren schätzen den Rückstau im Nachhinein und können zum Beispiel zur Störungserkennung verwendet werden.

Bisherige Ansätze, die in der Realität Anwendung finden, arbeiten aufgrund der geringen Ausstattungsdaten mit der C2X-Kommunikation ausschließlich mit infrastrukturseitiger Detektion. Neben der direkten Erfassung über Videodetektion, welche in ihrer Qualität stark von den Umfeldbedingungen (Wetter, Tageszeit aufgrund von Lichtverhältnissen) abhängt, gibt es für die Rückstaulängenschätzung in der realen Echtzeitanwendungen im Wesentlichen drei Ansätze, die ausschließlich LSA-Detektoren verwenden. Auch diese erfassen den Verkehr in unterschiedlicher Qualität und sollten daher hinsichtlich ihrer Erfassungsqualität überwacht werden (vgl. LEHNHOFF [2005], MAIER UND FINKE [2013]).

Der erste Ansatz ist die Bilanzierung der Zu- und Abflüsse. WEBSTER [1958] nutzt Zu- und Abflussraten um Wartezeiten und Rückstaulängen zu ermitteln. KIMBER UND HOLLIS [1979] erweitern diesen Ansatz um stochastische Ansätze der Verkehrsnachfrage. Eine in der Praxis angewandte Methode ist das sogenannte Roteinzählen. Dazu werden die gezählten Fahrzeuge nach Rotzeitbeginn hochgezählt, bis der Stauraum zwischen Haltelinie und Detektor belegt ist. BERNARD UND RIEDEL [1999] verwenden den Ansatz der Bilanzierung und verknüpfen ihn mit möglichen Eingriffen in die Lichtsignalsteuerung.

Die Bilanzierung funktioniert nicht mehr, sobald der Rückstau länger als die Entfernung zwischen Haltelinie und Detektor ist. Durch die in Deutschland übliche Anwendung von Zeitlückensteuerungen [FGSV, 2010a] werden meist Bemessungsdetektoren in circa 40 Meter von der Haltelinie verwendet. MÜCK [2002] entwickelte daher einen zweiten Ansatz, indem er messbare Kenngrößen auf Korrelation mit der Rückstaulänge überprüft. Sein Verfahren arbeitet in Echtzeit und schätzt Rückstaulängen bis zum 5-10fachen des Abstands zwischen Bemessungsdetektor und Haltelinie. Der Rückstau wird dazu in zwei Anteile aufgeteilt, einen gesicherten Anteil, zwischen Haltelinie und Detektor, sowie einen zu schätzenden Anteil, der den Rückstau ab dem Detektor beschreibt. Zur Schätzung wird die sogenannte Füllzeit verwendet, die als das Zeitintervall zwischen Sperrzeitbeginn und Dauerbelegung des Bemessungsdetektors definiert ist. Die gemessene Füllzeit wird mit einer Referenzzeit verglichen, welche für jede Zufahrt einzeln über eine Erhebung bestimmt werden muss. Wird die Referenzzeit unterschritten, wird ein gesättigter Verkehrsfluss angenommen. Über eine lineare Regressionsanalyse weist MÜCK [2002] eine Korrelation zwischen der geglätteten Anzahl der Unterschreitungen und der maximalen Staulänge nach.

Der dritte Ansatz versucht den Rückstau über die Stoßwellentheorie zu schätzen [LIGHTHILL UND WHITHAM, 1955], indem Unterschiede im Verkehrsfluss analysiert werden. LIU ET AL.

[2009] vergleichen dazu die Zeitlücken nach Grünzeitbeginn. Wird der Grenzwert einer Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen überschritten, nimmt das Verfahren an, dass die Fahrzeuge nicht mehr aus einem gestauten Zustand anfahren, sondern sich im freien Fluss befinden. Das Verfahren arbeitet damit nach einem ähnlichen Prinzip, das auch der, in der RiLSA [FGSV, 2010a] beschriebenen, regelbasierten Zeitlückensteuerung zugrunde liegt.

Durch die in Abschnitt 2.3.1 beschriebene Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur ist es möglich weitere Quellen in die Rückstaulängenschätzung einfließen zu lassen. Die Verwendung von fahrzeugseitigen Daten zur Verbesserung der Rückstaulängenschätzung ist in Echtzeit allerdings bisher nur simulativ erprobt worden.

Eine offline Schätzung zur Unterstützung der Planung von Lichtsignalanlagen kann dagegen bereits mit geringen Ausstattungsraten erfolgen, da über einen längeren Zeitraum Daten gesammelt werden können. NEUMANN UND WAGNER [2012] schätzen auf diese Weise die mittlere und maximale Rückstaulänge vor Lichtsignalanlagen auf Grundlage von Positions- und Geschwindigkeitsmeldungen einzelner Fahrzeuge.

BELZNER [2009] nutzt ausschließlich fahrzeuggenerierte Daten von Einzelfahrzeugen zur Stauerkennung auf Autobahnen durch die Erfassung von Änderungen im Geschwindigkeitsniveau dieser. Die Genauigkeit des Verfahrens ist für eine Stauendwarnung ausreichend, für eine Übertragbarkeit auf innerstädtische Anwendungen und zur Anwendung im Rahmen der Lichtsignalsteuerung allerdings zu ungenau.

Auch COMERT UND CETIN [2008] verwenden ausschließlich fahrzeuggenerierte Daten zur Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen. In Abhängigkeit einer bekannten Ausstattungsrate und des letzten ausgestatteten Fahrzeugs im Rückstau wird heuristisch eine Rückstaulänge geschätzt. Die Güte des Verfahrens steigt mit der Rückstaulänge und der Ausstattungsrate. Nach Aussage der Autoren ist ab einer Rückstaulänge von etwa zehn Fahrzeugen ist die Ausstattungsrate nicht mehr entscheidend.

PRIEMER UND FRIEDRICH [2008] fusionieren stationäre Detektion und fahrzeuggenerierte Daten um den Rückstau zu schätzen. Ein stehendes, mit C2X-Kommunikation ausgestattetes, Fahrzeug wird dazu als virtueller Detektor definiert. Über die Füllzeit des Stauraums zwischen Halteleinie und realen beziehungsweise virtuellen Detektoren wird dazu eine Ankunftsrate der Fahrzeuge ermittelt.

2.3.3 Schaltzeitprognose

Während eine Rückstaulängenschätzung für eine in Festzeit geschaltete Lichtsignalanlage noch ausreicht, muss bei lokalen, verkehrsabhängigen Steuerungen, um eine verlässliche Geschwindigkeitsempfehlung geben zu können, auch die Schaltzeit der einzelnen Signalgruppen prognostiziert werden. Aufgrund der oft sehr komplexen Logiken ist für die in Deutschland weitverbreiteten regelbasierten Knotenpunktssteuerungen, die von den in Echtzeit gemessenen Detektorkenngrößen (in Deutschland sind dies in der Regel Bemessungsdetektoren zur

Zeitlückensteuerung) abhängen, eine Schaltzeitprognose aus dem Verfahren selbst heraus kaum möglich. Für das Steuerungsverfahren ist es nicht möglich abzuschätzen, ob beispielsweise bei einer Zeitlückensteuerung das nächste Fahrzeug den Detektor gerade noch vor der definierten Abbruchzeitlücke erreicht oder knapp danach. Für die Steuerung ist dieser Unterschied von minimal einer Zehntelsekunde (der Wert hängt von der Taktung der Lichtsignalanlage ab) allerdings entscheidend. Auch Anmeldungen an der Lichtsignalanlage zur Priorisierung des öffentlichen Verkehrs (ÖV) spielen eine Rolle, da diese Eingriffe in die Steuerung meist stärker sind. Sie sind aber aufgrund ihrer längeren Vorlaufzeit besser vorherzusagen. Aufgrund dessen kann die Schaltzeitprognose mittels aktueller und historischer Daten wie den Signal- und Detektordaten geschehen. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass eine Steigerung der Freiheitsgrade der Steuerung der Vorhersagbarkeit dieser entgegenläuft.

MENIG ET AL. [2008] prognostizierten im Rahmen des Projektes TRAVOLUTION den Signalzustand für die nächsten 30 Sekunden mittels der Beschreibung des Signalprogramms als Markow-Kette. Die Beschreibung ist möglich, da die Signalprogramme in der Regel phasenorientiert sind und damit der Wechsel in den nächsten Systemzustand, also die nächste Phase, nur vom aktuellen Systemzustand, also der aktuellen Phase, abhängt. Diese Übergänge werden von den Markow-Ketten beschrieben. Das Verfahren ist damit für jede phasenorientierte Steuerung geeignet. Die Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten der Ketten erfolgte basierend auf einem Expertenzustand selbstlernend anhand der Anlagensekunde, der Phasenübergänge, der Detektoren des Individualverkehr (IV) und der Meldepunkte des ÖV. Anhand des aktuellen Zustandvektors kann dann eine Schaltzeit prognostiziert werden. Das Verfahren arbeitet mit Daten des aktuellen Umlaufs, weshalb bei der Datenübertragung eine kurze Latenzzeit nötig ist. Eine Bewertung der Schaltzeitprognose wurde nicht vorgenommen.

KRUMNOW ET AL. [2014] schätzen die Schaltzeiten signalgruppenfein ausschließlich aufgrund der Schaltinformationen, sowie ÖV Anmeldungen für circa 180 Knotenpunkte in Dresden. Die Prognose erfolgt aufgrund eines Basisvektors. Dieser enthält die Freigabezeitenwahrscheinlichkeiten einer Signalgruppe für jede Umlaufsekunde. Das Verfahren ist damit nur für Steuerungsverfahren mit fester Umlaufzeit und festen Signalprogrammen geeignet. Die Wahrscheinlichkeiten des Basisvektors werden aus den historischen Schaltinformationen mehrerer Tage für jedes Signalprogramm erzeugt. Das Verfahren ist damit nicht auf kurze Latenzzeiten angewiesen. Mittels eines Vergleichs der Schaltzeitprognose mit den realen Schaltungen wird zudem ein Güteindex der Prognose ermittelt. Eine Validierung des Verfahrens fand bisher noch nicht statt.

KOUKOU MIDIS ET AL. [2011] entwickelten eine Smartphoneapp namens SignalGuru, die eine Schaltzeitprognose und eine daraus resultierende Geschwindigkeitsempfehlung berechnet. Für die Schaltzeitprognose werden nur die historischen Zustände der Signalgeber verwendet, ohne dass Informationen über die Steuerung selbst vorliegen. Die Zustände der Signalgeber werden dazu über die Kameras der Smartphones, die in der Windschutzscheibe platziert sind, mittels Bilderfassung detektiert und die erfassten Zustände mit anderen Smartphones ausge-

tauscht, um eine historische Datenbank der Schaltzeiten aufzubauen. Die eigentliche Schaltzeitprognose erfolgt schließlich über eine Support Vector Machines Regression für jede Signalgruppe. Die historischen Daten werden dabei als Trainingsdaten verwendet, wobei sich die Daten einer Woche als ausreichend erwiesen haben. Die Schaltzeitprognose wurde in Cambridge für eine Festzeitsteuerung, sowie in Singapur für zwei Steuerungsgebiete der Netzsteuerung SCATS getestet. Für die Festzeitsteuerung ergab sich eine durchschnittliche Abweichung der Schätzung vom realen Wert von 0,66 Sekunden. Für SCATS lag die Abweichung bei durchschnittlich 2,45 Sekunden. Die Prognose verbessert sich hier, wenn zur Schätzung neben der eigenen Signalgruppe auch weitere Signalgruppen berücksichtigt werden. Aggregierte Detektorwerte verbessern die Schätzung hingegen nicht, da diese bereits über die Signalschaltung der Netzsteuerung indirekt von der Schaltzeitprognose berücksichtigt werden. Auch zeigt sich, dass die Schaltzeitprognose sich schleichend verschlechtert, wenn die Trainingsdaten nicht aktualisiert werden. Das heißt, dass es sinnvoll ist nicht zu weit zurückliegende historische Daten für die Prognose zu verwenden. Grundsätzlich ist zu beobachten, dass sich die mittlere Abweichung der Schaltzeitprognose von den realen Schaltungen für die Untersuchungsgebiete, auch diejenigen mit demselben Steuerungsverfahren, stark voneinander unterscheiden. Dies lässt darauf schließen, dass die Qualität der Schaltzeitprognose neben dem Steuerungsverfahren selbst auch noch von anderen lokalen Randbedingungen abhängig ist.

WEISHEIT [2014] nutzt ebenfalls Support Vector Machines Regression um die Schaltzeit zu prognostizieren. Er unterscheidet dabei zwischen einer Prognose für Eingangsdaten mit hohen Latenzzeiten, wie Schaltzeitinformationen, aggregierte Detektorwerte und Signalprogramm der letzten Umläufe, und Eingangsdaten mit niedriger Latenzzeit, wie Einzelfahrzeugdetektionen. Eine Validierung des Verfahrens wurde für das Grünzeitende eine Signalgruppe an einem Knotenpunkt in Kassel demonstriert. Für Eingangsdaten mit hoher Latenzzeit konnte hiermit der Schaltzeitpunkt in 83 Prozent der Fälle exakt geschätzt werden. Unter Hinzunahme der Daten mit niedriger Latenzzeit konnte der Schaltzeitpunkt in 93 Prozent der Fälle exakt geschätzt werden. Basierend auf prognostizierten und realen Schaltzeiten wird zudem ein Güteindex berechnet.

Bei modellbasierten Steuerungsverfahren ist auch eine Prognose aus dem Verfahren selbst heraus möglich, da die Verfahren mit einem sogenannten rollenden Horizont, bestehend aus einem Prognose- und einem Regelhorizont, arbeiten (vgl. Abb. 2-3). Im Prognosehorizont wird dazu auf Basis des aktuellen Zustands eine Schaltung geplant und bewertet. Diese wird in jedem Fall im aktuellen Regelhorizont umgesetzt. In diesem wird die Steuerung nicht mehr verändert und kann dem Fahrzeug mit einer hundertprozentigen Prognosegüte übermittelt werden. Nach Ablauf des Regelhorizonts wird wieder eine Prognose durchgeführt. Falls sich der Zustand vom Zeitpunkt t_n zum Zeitpunkt t_{n+1} nicht verändert hat, zum Beispiel weil kein neues Fahrzeug detektiert wurde, bleibt der Prädiktionshorizont t_n für den Zeitraum zwischen t_{n+1} und t_{n+2} bestehen und wird ebenfalls umgesetzt. Wenn sich der Ursprungszustand ändert, wird sich hingegen auch die geplante Schaltung ändern.

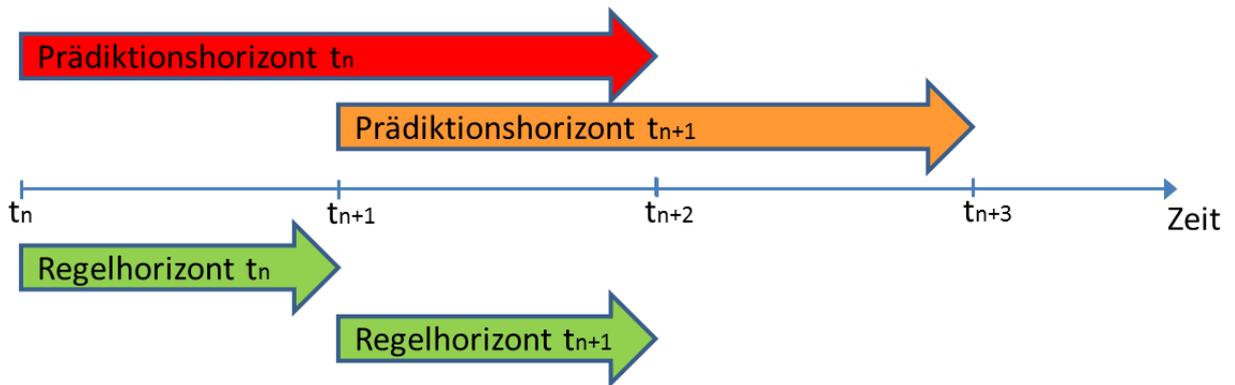


Abb. 2-3 Beispiel für Prädiktions- und Regelhorizont einer modellbasiert Steuerung mit rollendem Horizont

Eine für Geschwindigkeitsempfehlungen ideale Randbedingung wäre, dass der Regelhorizont in etwa der Fahrtzeit der Fahrzeuge auf der Zufahrt zur stromabwärts liegenden Lichtsignalanlage entspricht, da sich dadurch eine sehr zuverlässige Schaltzeitprognose zur Verfügung stellen ließe. In der Regel ist der Regelhorizont allerdings wesentlich kürzer, um die Steuerung schneller und genauer dem aktuellen Zustand anpassen zu können.

2.4 Pilotanwendungen der erweiterten Fahrerinformation

Im Folgenden werden einige Pilotanwendungen erweiterter Fahrerinformation besprochen, die zumindest technisch auch in realen Testfeldern verifiziert wurden. Die Anzahl der Anwendungsfälle ist sehr groß, so dass der Fokus vor allem auf Pilotanwendungen in Deutschland gelegt wird.

2.4.1 Düsseldorfer Trichter

Der erste Versuch Fahrern eine erweiterte Information zu gegeben wurde 1954 im Rahmen des sogenannten „Düsseldorfer Trichters“ erprobt [VON STEIN, 1961]. Die Fahrer wurden dabei kollektiv auf zwei Zufahrten eines Knotenpunktes über Vorsignale informiert. In der ursprünglichen Form wurden als Vorsignale reguläre Rot-Gelb-Grün Signalgeber verwendet, die den Pulk über die letzten 500 Meter vor der Haltelinie leiteten, indem der Beginn des Pulks in Abhängigkeit des Hauptsignals verzögert wurde. Im nächsten Schritt wurde der Trichter um die, in der RiLSA [FGSV, 2010a] aufgeführten, Geschwindigkeitssignalgeber erweitert. Auf diese Weise konnte auch das Pulkende beeinflusst werden. Die Anzahl der haltenden Fahrzeuge konnte von circa 35 Prozent auf 5 Prozent gesenkt werden. Der Versuch stellt damit das erste Pulkmanagement dar, da neben der Vermeidung von Halten durch die Einführung der Geschwindigkeitssignalgeber auch dichte Pulks geschaffen wurden. Abb. 2-4 stellt das Prinzip des Düsseldorfer Trichters mit den Geschwindigkeitssignalgebern dar.

In Detroit wurde das Prinzip des Düsseldorfer Trichters 1961 auf einem 6,5 Kilometer langen Streckenabschnitt mit zehn signalisierten Knotenpunkten in einem Großversuch getestet [VON STEIN, 1978]. Die ursprüngliche Steuerung zeigte für alle Signale der Hauptrichtung zeitgleich

grün. Durch die Einführung einer progressiven Koordination konnte durchschnittlich die Anzahl der Halte wie auch die Verlustzeit abends um 65 und morgens um 83 Prozent an den Knotenpunkten gesenkt werden. Durch die Installation der Geschwindigkeitsempfehlung konnten für die bereits optimierte Koordination nochmals 44 Prozent der Halte und der Verlustzeit in der Morgenspitze und 38 Prozent der Halte und der Verlustzeit in der Abendspitze eingespart werden. Die Gesamtfahrtzeit auf der Gesamtstrecke reduzierte sich morgens um 13 Prozent und abends um 11 Prozent.

Neben dem Großversuch beschreibt VON STEIN [1978] auch weitere internationale Anwendungen der Geschwindigkeitssignale. Als wichtigstes Kriterium für den Erfolg des Systems wird die Wahrnehmung der Geschwindigkeitsanzeige und deren Akzeptanz gesehen.

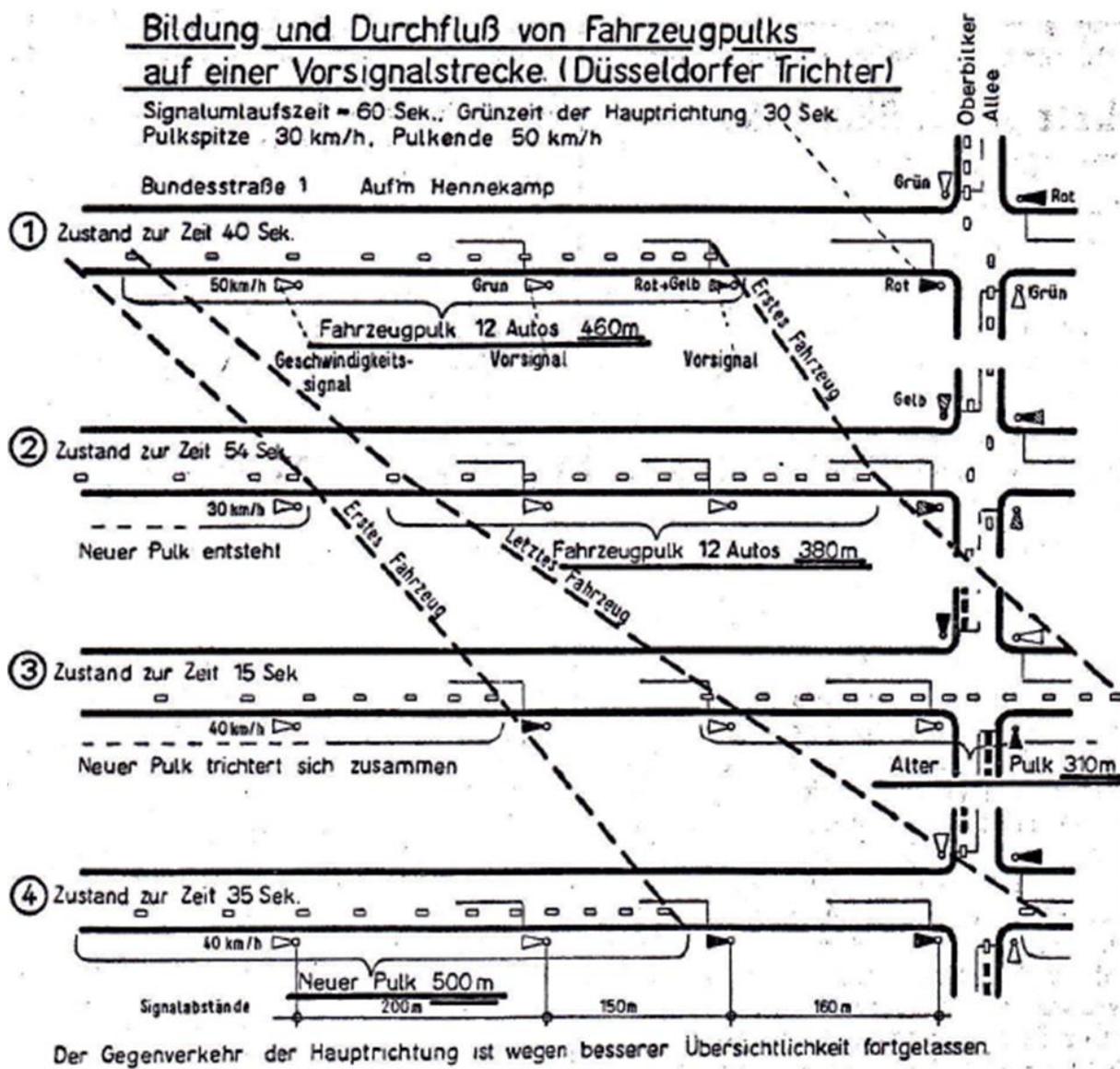


Abb. 2-4 Prinzip des Düsseldorfer Trichters [VON STEIN, 1961]

2.4.2 Wolfsburg Welle

Mit der sogenannten „Wolfsburger Welle“ wurden 1983 zum ersten Mal Informationen von der Lichtsignalanlage ins Fahrzeug übertragen [ZIMDAHL, 1983]. Der Pilot wurde von der VW-Forschung initiiert. Dem Fahrer wurde dazu seine Lage im Grünband angezeigt. Die Position des Fahrzeugs relativ zur nächsten stromabwärtsliegenden Lichtsignalanlage wurde mittels Wegimpulszählern festgestellt. Die Übertragung der Daten von der Lichtsignalanlage zum Fahrzeug wurde mittels Infrarot realisiert. Da die Übertragungreichweite nur circa 70 Meter betrug, wurden entlang der Strecke 16 Baken mit etwa 100 Infrarotsendern aufgestellt. Abb. 2-5 zeigt die Anzeige für den Fahrer, sowie die Übertragung mittels Infrarotempfänger.

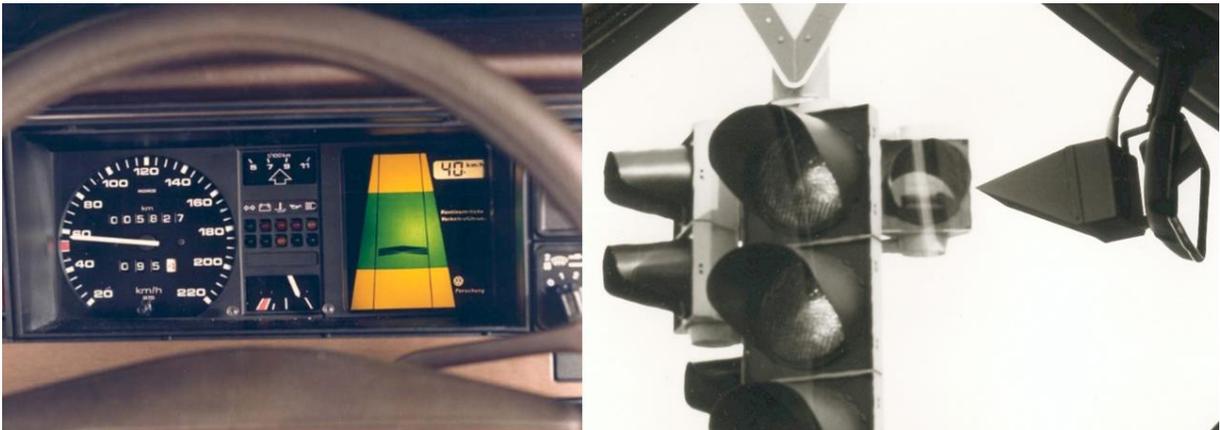


Abb. 2-5 Human Machine Interface (HMI) (links) und Infrarotempfänger (rechts) der Wolfsburg Welle [ZIMDAHL, 1983]

HOFFMANN [1989] untersuchte den 3,6 Kilometer langen Straßenzug mit 11 lichtsignalgeregelten Knotenpunkten 1985 mittels 560 Messfahrten. Für die Schwachverkehrszeit entgegen der Koordinierungsrichtung konnte eine Reduzierung der Fahrtzeit um 2,7 Prozent, der Halte um 17,4 Prozent und des Kraftstoffverbrauchs um 5,7 Prozent erreicht werden. Für Starkverkehrszeiten konnte keine Reduzierung der Kenngrößen festgestellt werden.

2.4.3 TRAVOLUTION

Im Rahmen des Forschungsprojekts TRAVOLUTION wurde in Ingolstadt erstmals lokale Kommunikation über den WLAN IEEE Standard 802.11p eingesetzt um Informationen zwischen Lichtsignalanlage und Fahrzeug auszutauschen (vgl. Abschnitt 2.3.1) [MENIG ET AL., 2008]. Wie in Abb. 2-1 zu sehen wurde der Fahrer über das Display im Armaturenbrett zum einen über die Restrotzeit informiert und zum anderen wurde ihm die ideale Geschwindigkeit zum Erreichen der Freigabezeit an der stromabwärtsliegenden Lichtsignalanlage gezeigt. Neben der Geschwindigkeitsanzeige wurde auch die bereits in Rahmen der Wolfsburg Welle getestete Lage im Grünband angezeigt. Aufgrund der lokalen regelbasierten Verkehrsabhängigkeit enthält die Geschwindigkeitsempfehlung eine Schaltzeitprognose. Im ersten Schritt wur-

den drei Lichtsignalanlagen ausgestattet, die später auf 50 Anlagen erweitert wurden [TRAVOLUTION, 2014]. Eine Bewertung der Geschwindigkeitsempfehlung fand im Rahmen von TRAVOLUTION nicht statt.

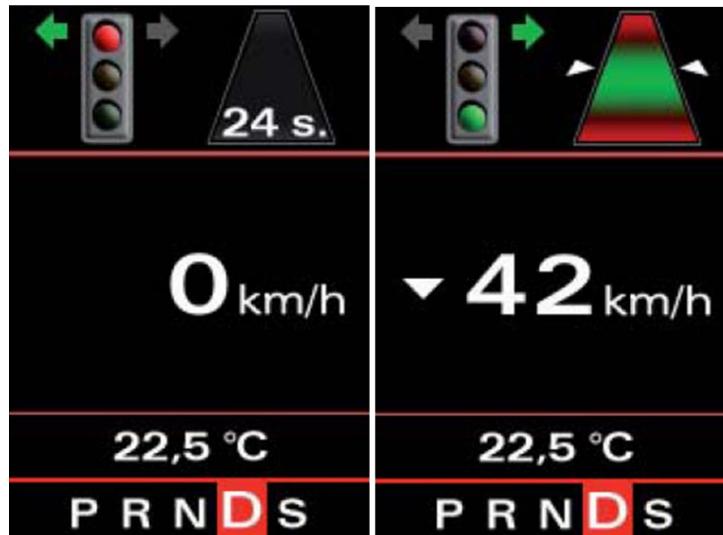


Abb. 2-6 HMI-Anzeige zur Information über die Restrotzeit (links) und HMI-Anzeige für die ideale Progressionsgeschwindigkeit. [MENIG ET AL., 2008]

2.4.4 Forschungsinitiative AKTIV

Im Rahmen der Forschungsinitiative AKTIV-Verkehrsmanagement wurden in Hattersheim am Main vier lichtsignalgeregelter Knotenpunkte ausgerüstet [HOYER ET AL., 2012]. Die Knotenpunkte liefen in Festzeitsteuerung. Für die Kommunikation wurde der auch privat verwendete IEEE Standard 802.11 b/g verwendet. Als mobiles Endgerät wurden PDAs (Personal Digital Assistant), Vorgänger heutiger Smartphones, verwendet. Es wurden Restrotzeiten angezeigt und Geschwindigkeitsempfehlungen gegeben. Die Anzeige für die Geschwindigkeitsempfehlung gleicht der in der Wolfsburger Welle verwendeten Anzeige. Zusätzlich wurde über fahzeuggenerierte Daten eine verbesserte Rückstaulängenschätzung entwickelt [PRIEMER UND FRIEDRICH, 2008] (vgl. Abschnitt 2.3.2). Die Bewertung erfolgt mittels Simulation [OTTO, 2011], allerdings ohne die verbesserte Rückstaulängenschätzung, indem den Fahrzeugen die empfohlene Geschwindigkeit als Wunschgeschwindigkeit gesetzt wird. Damit findet keine Modellierung der Akzeptanz und Befolgung der Empfehlungen statt. Es wurden dazu unterschiedliche Randbedingungen wie Ausstattungsrate, Koordinierungsqualität, Anzahl der Richtungsfahrstreifen, die minimale akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung, geometrische und zeitliche Randbedingungen im Straßennetz und Fahrrelationen anhand theoretischer Beispiele untersucht und folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Ausstattungsgrad: Mit steigendem Ausstattungsgrad verbessert sich die Wirkung der Geschwindigkeitsempfehlung. Dieser Effekt ist auch für nicht ausgestattete Fahrzeuge zu beobachten, da diese von den ausgestatteten Fahrzeugen verzögert werden können.

- Koordinierungsqualität: Bei einer guten Koordinierung zeigt eine Geschwindigkeitsempfehlung kaum Wirkungen. Bei unkoordinierter zufälliger Ankunftsverteilung ist der Nutzen groß.
- Anzahl der Richtungsfahrestreifen: Je geringer die Anzahl der Richtungsfahrestreifen ist, desto größer ist der Effekt bereits bei geringen Ausstattungsraten. Mit steigender Anzahl der Fahrestreifen ergibt sich die Möglichkeit, beeinflusste Fahrzeuge zu überholen (vgl. auch [LÜßMANN ET AL., 2014]).
- Minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung: Mit der unteren Grenze der vom Fahrer akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlungen steigt die Wirkung auf die untersuchten Kenngrößen. Je niedrigeren die gefahrene Geschwindigkeit, desto geringer kann der Knotenpunktabstand sein, der zu einer garantierte Ankunft zur Freigabezeit führt.
- Fahrrelationen: Geschwindigkeitsempfehlungen für Abbieger führen zu negativen Einflüssen, wenn diese nicht zeitgleich mit der Signalgruppe des Hauptstroms signalisiert werden.

2.4.5 Koline

Im Forschungsprojekt Koline [FRIEDRICH ET AL., 2013] (**Kooperativ**e und **optimierte Lichtsignalsteuerung** in städtischen **Netzen**) wurden in Braunschweig eine zentralenseitige Optimierung einer Festzeitsteuerung, eine Rückstaulängenschätzung sowie ein Fahrerassistenzsystem basierend auf teil- beziehungsweise vollautomatisiertem Fahren kombiniert (auf diese Weise kann die Befolgung des Fahrers außer Acht gelassen werden, womit die gefahrene Geschwindigkeit exakt zur Geschwindigkeitsempfehlung passt) . Die zentrale Optimierung erfolgt modellbasiert anhand einer Zielfunktion, die nicht näher erläutert wird, im 15-Minutenintervall (für das reale Testfeld wurden die Festzeitprogramme offline optimiert). Als Verkehrsmodell wird ein Cell Transmission Model verwendet. Steuerungsparameter sind Versatzzeit und Progressionsgeschwindigkeit. Für die optimierten Festzeitprogramme ergab sich eine Verbesserung der Fahrtzeiten um circa 25 Prozent (bei leicht erhöhter Verkehrsnachfrage im IST-Zustand) für den Gesamtverkehr. Für die Rückstaulängenschätzung wurde das Verfahren nach MÜCK [2002] für stationäre Detektion mit dem Verfahren nach PRIEMER UND FRIEDRICH [2008] für mobile Detektion fusioniert. Mittels lokaler Kommunikation konnten sowohl Schaltzeit als auch Rückstaulänge an das Testfahrzeug übertragen werden. Hieraus wurde im Fahrzeug eine energieeffiziente Annäherungsstrategie berechnet. Auf diese Weise konnte für das autonome Fahren im Mittel 14 Prozent Energie eingespart werden. Das Gesamtsystem wurde mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation für drei Knotenpunkte und Ausstattungsraten von 10 und 35 Prozent unter anderem mittels einer Kosten-Nutzen-Analyse bewertet. Zwar erzielen alle untersuchten Varianten einen Nutzen, allerdings schneidet das Szenario mit der Optimierung der Steuerung ohne Fahrerbeeinflussung am besten ab.

2.4.6 Kolibri

Im Rahmen des Projektes KOLIBRI (Kooperative Lichtsignaloptimierung – Bayerisches Pilotprojekt) [DINKEL ET AL., 2013] wurde die Fahrerbeeinflussung auf Außerortsstraßen mit lichtsignalgeregelten festzeitgesteuerten Knotenpunkten getestet. Zum Informationsaustausch wurde zellulare Kommunikation mittels TPEG-TSI verwendet. Ein wesentlicher Fokus lag dabei auf der Gestaltung des HMI. Im Fahrsimulator konnten Kraftstoffeinsparungen bis zu 20 Prozent nachgewiesen werden.

2.4.7 ODYSA

Im Projekt ODYSA (Optimization of traffic flow through **D**ynamic and individual **S**peed **A**dvice) [VAN KATWIJK ET AL., 2013] wurde in der niederländischen Provinz Zuid-Holland eine Außerortsstraße mit in Wechselverkehrszeichen integrierten Geschwindigkeitsempfehlungen ausgestattet. Über ein An- und Ausschalten der Wechselverkehrszeichen wurde versucht den Fahrern individuelle Geschwindigkeitsempfehlungen auf einer drei Kilometer langen Zufahrt auf einen Knotenpunkt zu geben. Zudem wurde diese Information auf einer Außerortsstraße in der Nähe von Eindhoven auch mittels lokaler Kommunikation ins Fahrzeug übertragen [BEZEMER ET AL., 2009]. Eine Bewertung wurde für das Testfeld in der Provinz Zuid-Holland durchgeführt. Ihr Fokus lag auf der Bewertung der Fahrerreaktionen und nicht verkehrlicher Kenngrößen. So verleitet das System zu einer langsameren Fahrerweise, was dazu führt, dass vor allem zum Ende der Freigabezeit mehr Fahrzeuge ankommen und eventuell Fahrzeuge am Pulkende den Knotenpunkt nicht mehr passieren können. Zudem wurde herausgefunden, dass die Geschwindigkeitsempfehlung erst in Sichtweite der Signalgeber der Lichtsignalanlage akzeptiert wird.

2.4.8 SignalGuru

Die auf der in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Schaltzeitprognose der Smartphoneapp Signalguru basierende Geschwindigkeitsempfehlung wurde in Cambridge an einem Streckenzug mit drei Knotenpunkten getestet [KOUKOU MIDIS ET AL., 2012]. Hierbei konnte der Kraftstoffverbrauch im Mittel um 20,3 Prozent reduziert werden. Halte konnten nahezu ganz vermieden werden.

2.5 Zusammenfassung

Sowohl für die Netzsteuerung von Lichtsignalanlagen, als auch für die erweiterte Fahrerinformation gibt es bereits eine Vielzahl von Ansätzen. Für ein echt kooperatives System zur Optimierung des Emissionsausstoßes müssen die Bausteine, die in diesem Kapitel beschriebenen vorhandenen Ansätzen, entsprechend kombiniert werden. Das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten wird in Kapitel 3. *Gesamtsystem* erläutert. Auf die aus dem Stand der Technik folgenden Zielsetzungen und Anforderungen an die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten

Komponenten wird dazu jeweils zu Beginn der Kapitel 4. *Netzsteuerung* und 5. *Infrastrukturseitiges Pulkmanagement* eingegangen.

3. Gesamtsystem

Im folgenden Kapitel wird das Konzept des Gesamtsystems der kooperativen Lichtsignalsteuerung beschrieben. Abschnitt 3.1 geht dabei auf die Gesamtarchitektur des Systems ein. Abschnitt 3.2 geht auf die am System beteiligten Einzelkomponenten ein. Die Beschreibung bezieht sich dabei auf eine reale Umsetzung. Die detaillierte Beschreibung der im Rahmen der Arbeit umgesetzten beziehungsweise modellierten Komponenten erfolgt in den Kapiteln 4. *Netzsteuerung* und 5. *Infrastrukturseitiges Pulkmanagement* beziehungsweise 6. *Fahrzeugseitige längsdynamische Fahrerassistenzsysteme und deren Modellierung*. Einschränkungen aus der Bewertung des Gesamtsystems mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation werden in Kapitel 7. *Bewertung* beschrieben.

3.1 Architektur

Abb. 3-1 zeigt den schematischen Aufbau des Gesamtsystems der entwickelten kooperativen Lichtsignalsteuerung. Die in grün dargestellten Komponenten sind zentraler Bestandteil des im Rahmen dieser Arbeit umgesetzten Systems, wogegen die grau dargestellten Komponenten im Wesentlichen nur über ihre Schnittstellen am entwickelten System beteiligt sind. Auf die Schnittstellen und den Datenaustausch zwischen den Komponenten wird jeweils bei der Beschreibung der einzelnen Komponenten in Abschnitt 3.2 eingegangen.

Das System ist hierarchisch aufgebaut. Das heißt, die Steuerung des Gesamtsystems erfolgt nicht parallel sondern von oben nach unten - von zeitlich längerfristigen Steuerungsendscheidungen zu kurzfristigen Eingriffen. Das strategische Verkehrsmanagement setzt dazu Parameter für die taktische Ebene der Netzsteuerung und diese wiederum für die operationale Ebene einer lokalen Knotenpunktsteuerung oder der Beeinflussung der Fahrer mittels C2X-Kommunikation.

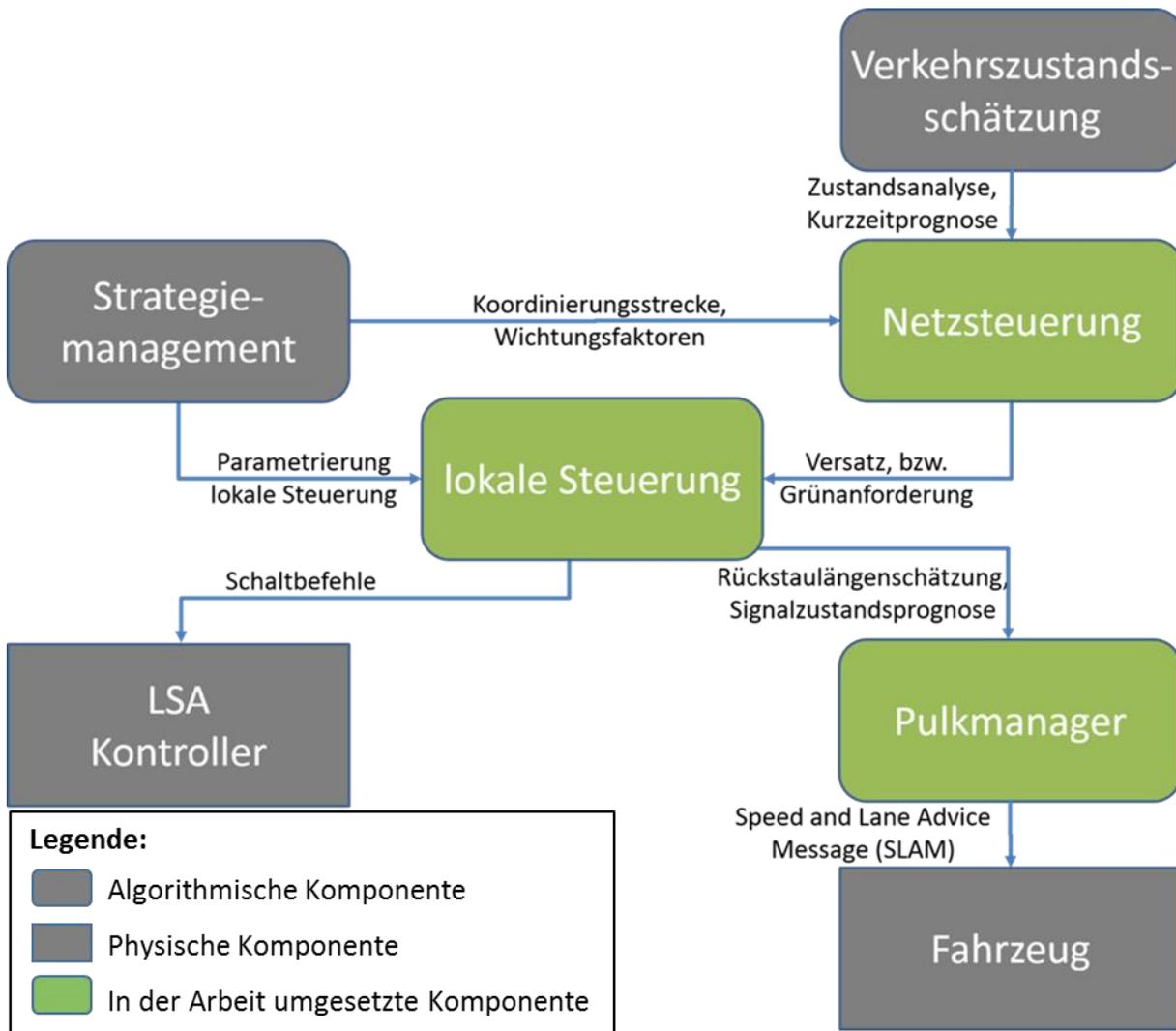


Abb. 3-1 Übersicht über die Komponenten der kooperativen Lichtsignalsteuerung (in Anlehnung an [LÜBMAN ET AL., 2012b])

3.2 Komponenten

Im Folgenden werden die am Gesamtsystem der kooperativen Lichtsignalsteuerung beteiligten Komponenten kurz beschrieben.

3.2.1 Verkehrsmanagement

Das Verkehrsmanagement ist definiert als "Beeinflussung des Verkehrsgeschehens durch ein Bündel von Maßnahmen mit dem Ziel die Verkehrsnachfrage und das Angebot an Verkehrssystemen optimal aufeinander abzustimmen" [FGSV, 2010b]. Es lässt sich zudem nach statischem und dynamischem Verkehrsmanagement differenzieren. Beim statischen Verkehrsmanagement fließen vor allem lang- bis mittelfristig wirksame Maßnahmen ein. Das dynamische Verkehrsmanagement ist dagegen auf kurzfristige und spezifische Maßnahmen begrenzt, um

die Steuerung an das vorhandene Verkehrsaufkommen anzupassen, und findet permanent statt. Bei der Lichtsignalsteuerung kann das Verkehrsmanagement beispielsweise in Echtzeit Programmparameter beeinflussen. [vgl. FGSV, 2003]

Im Rahmen der kooperativen Lichtsignalsteuerung ist es möglich sowohl die Parameter der lokalen Knotenpunktsteuerung als auch der Netzsteuerung im laufenden Betrieb zu ändern. Dies erfolgt in Form von Textdateien, die eingelesen werden. Für die Netzsteuerung umfassen die Parameter, die zu optimierenden Streckenabschnitte, das Optimierungsintervall, mögliche Progressionsgeschwindigkeiten auf den Streckenabschnitten sowie die Wichtungsfaktoren der Zielfunktion.

Ein Strategiemangement, zum Beispiel zur Beseitigung eingetretener Störungen, ist nicht Bestandteil der Umsetzung.

3.2.2 Verkehrszustandsschätzung

Für die Optimierung der Netzsteuerung ist eine Bewertung einzelner Lösungen notwendig. Die Bewertung erfolgt auf Grundlage von Wirkungskenngrößen, die zum einen auf Grundlage der zu optimierenden Steuerungsgrößen und zum anderen auf Grundlage der zu erwartenden Verkehrsnachfrage ermittelt werden.

Für die Verkehrszustandsschätzung wird im Rahmen dieser Umsetzung das sogenannte ecoStrategic Model (eStraM) [ECOMOVE, 2012d] verwendet. Das für das Testfeld genutzte Modell baut auf dem Produkt MAT.Netstate der Firma MAT.Traffic auf.

Das Modell basiert auf einer Verkehrsumlegung, die ein rekurrentes neuronales Netz (RANN) verwendet. Es bildet das Straßennetzwerk als neuronales Netz ab und ahmt somit die Informationsverarbeitung biologischer Prozesse nach. Die Neuronen sind dabei von Eingangs- und Ausgangsschichten umgeben. Als Aktivierungsfunktionen dieser Schichten dienen Zu- und Abflüsse, welche über vorhandene Detektoren erfasst werden. Die Informationsverteilung (Verkehrsverteilung) im Netz wird über historische Daten erlernt [MATHIAS, 1999].

Die Netzsteuerung nutzt dabei die Kurzzeitprognose des Modells für den Zeithorizont des nächsten Optimierungsintervalls. Verwendet werden Verkehrsstärken und Routenaufteilungen.

3.2.3 Netzsteuerung

Die Netzsteuerung optimiert die Versatzzeiten und die Progressionsgeschwindigkeiten beider Fahrtrichtungen unter der Annahme, dass diese durch das Pulkmanagement beeinflusst werden können. Dies geschieht abschnittsweise, jeweils für zwei benachbarte Knotenpunkte. Über das Verkehrsmanagement kann der Streckenzug der Koordinierung festgelegt werden. Voraussetzung ist, dass für alle Abschnitte ein Verkehrsflussmodell vorhanden ist. Eine An-

passung der Umlaufzeit, der Freigabezeitanteile oder der Phasenfolge ist nicht Teil der Optimierung. Da diese Parameter der Steuerung im Wesentlichen Einfluss auf die Kapazität am Knotenpunkt haben und aus diesem Grund zum Beispiel von einer lokalen Steuerung vorgegeben und für die Optimierung der Netzsteuerung berücksichtigt werden können (siehe Abschnitt 3.2.4).

Die Optimierung erfolgt dabei, nicht wie bei bisherigen Netzsteuerungen, auf Grundlage der Minimierung von Halten und Wartezeiten, sondern der CO₂ Emissionen. Um dies zu ermöglichen, wird ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell verwendet, welches mit einem Emissionsmodell gekoppelt ist. An die lokale Steuerung werden dann Freigabezeitanforderungen versendet. Die detaillierte Beschreibung der Netzsteuerung inklusive der Begründung der bereits erwähnten Entwurfsentscheidungen erfolgt in Kapitel 4. Netzsteuerung.

Die Verwendung eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells und eines Emissionsmodells hat hierbei Vorteile in der Genauigkeit der Abschätzung der Emissionen, die eine reine Betrachtung der Halte nicht bieten kann.

So ist in den bisher zur Optimierung der Lichtsignalsteuerung verwendeten makroskopischen Verkehrsflussmodellen ein Halt darüber definiert, das sich ein Fahrzeug in einem Rückstau befindet. Das heißt, dass nur Halte erfasst werden können die einen kompletten Zyklus aus Abbremsen aus der erlaubten Geschwindigkeit bis hin zum Stillstand und anschließendem Beschleunigen erfasst werden. Eine Differenzierung ob ein Fahrzeug nur leicht abbremst, etwa wenn es sich einem Rückstau nähert, ist nicht möglich, weshalb ein Anteil der resultierenden Emissionen von einem makroskopischen Model über die Anzahl der Halte gar nicht erfasst werden können.

Bei mikroskopischen Verkehrsflussmodellen ist ein Halt in der Regel durch die Unterschreitung einer Grenzggeschwindigkeit definiert. Das heißt auch hier bleibt durch die reine Betrachtung der Halte ein Anteil Emissionen unberücksichtigt. Zudem kann durch ein kurzes Anfahren, etwa zum Schließen eine Lücke diese Geschwindigkeit wieder überschritten und anschließend unterschritten werden, wodurch sich die Anzahl der Halte erhöht und die Emissionen überschätzt werden.

3.2.4 Lokale Steuerung

Als Kopplung zwischen Netzsteuerung und lokaler Knotenpunktsteuerung können sogenannte Freigabezeitanforderungen verwendet werden. Wie folgend dargestellt kann der Faktor der Wichtungsfunktion mit der Grünanforderung multipliziert werden. Abhängig vom Wert der Freigabezeitanforderung und ihrem zeitlichen Verlauf hat die lokale Steuerung unterschiedliche Freiheitsgrade. Ist der Faktor beispielsweise eine Boolesche Variable (1 mit Freigabezeitanforderung und 0 ohne Freigabezeitanforderung), kann der lokalen modellbasierten Steuerung durch die Freigabezeitanforderung ein Rahmenplan aufgezwungen werden. [LÜBMANN ET AL., 2012]

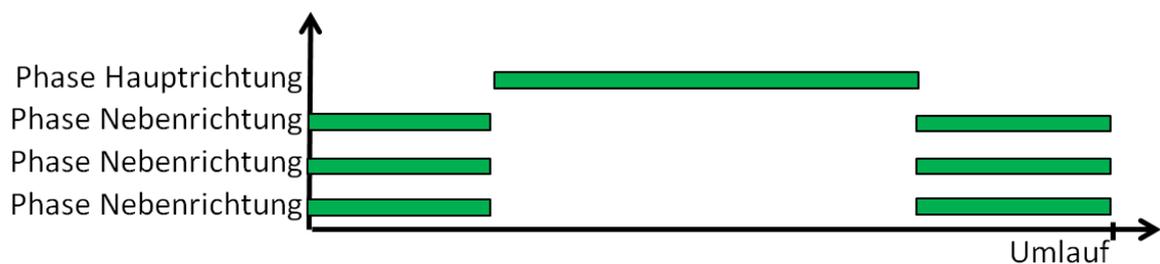
$$PI_{SG/P} = (\sum \text{Wartezeit} * W_W + \sum \text{Halt} * W_H) * GW \quad (\text{Formel 3-1})$$

mit:

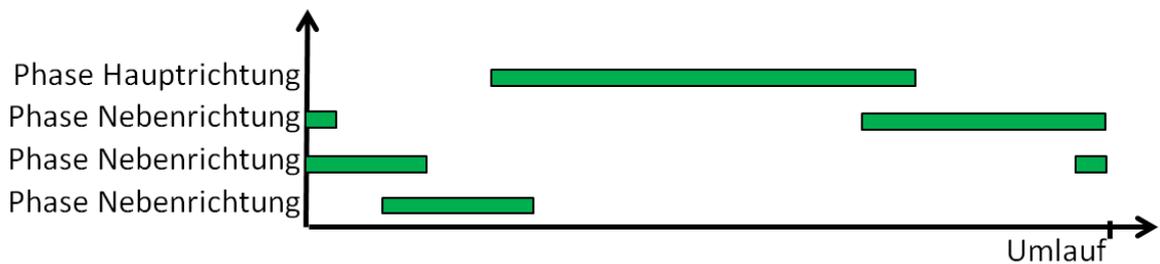
$PI_{SG/P}$	Performance Index der Signalgruppe oder der Phase
W_W	Wichtung der Wartezeit [1/s]
W_H	Wichtung der Halte
GW	Faktor der Freigabezeitanforderung

Die in Abb. 3-2 dargestellten zeitlichen Verläufe der Freigabezeitanforderungen repräsentieren unterschiedliche Steuerungsverfahren auf der mikroskopischen Ebene – Signalprogrammbildung mit garantierter Koordinierung, Rahmensignalprogramme zur Signalprogrammanpassung sowie Festzeitsteuerung. [vgl. RiLSA, 2010a]

Signalprogrammbildung mit garantierter Koordinierung



Rahmenplan



Festzeitprogramm

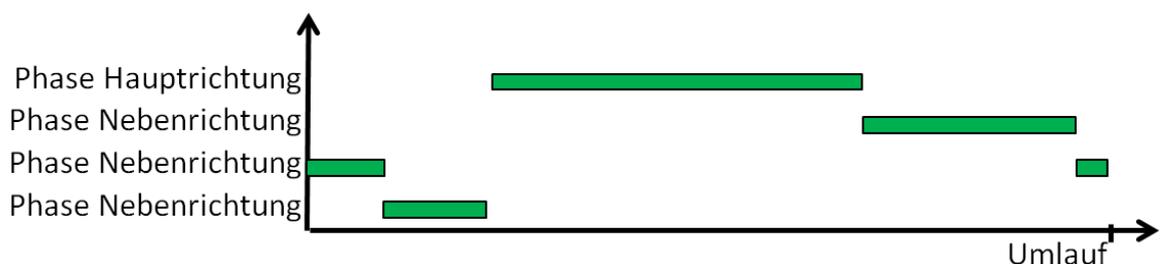


Abb. 3-2 Freigabezeitanforderungen unterschiedlicher Steuerungsverfahren auf mikroskopischer Ebene

Die Umsetzung der verkehrsabhängigen Steuerungen kann entweder regelbasiert oder modellbasiert geschehen.

Wie bereits in Abschnitt 2.3.3 erläutert, sind lokale regelbasierte Steuerungen, aufgrund der schlechten Vorhersagbarkeit der Schaltzustände, für Systeme mit Fahrerinformation schlecht geeignet (vgl. STEVANOVIC [2013]). Dies gilt vor allem für kurzfristige Anpassungen des Sig-

nalplans, wie etwa eine Freigabezeitverlängerung. Längerfristige Anpassungen, wie Freigabezeitforderungen des ÖPNV oder von Fußgängern, können auch besser vorausgesagt werden. Besondere Wirkungen aus dem Umstand der schlechten Vorhersagbarkeit der Schaltzustände sind zu erwarten, wenn nicht nur der Fahrer informiert werden soll, sondern auch positive Effekte des Pulkmanagements für die Lichtsignalsteuerung genutzt werden sollen.

Bei lokalen modellbasierten Steuerungen ist eine Schaltzeitprognose genauer möglich, da der zeitliche Verlauf der Wichtungsfunktionen der einzelnen Signalgruppen oder Phasen bekannt ist. In der Regel ist für solche Verfahren aber auch eine genauere Erfassung der lokalen Verkehrslage durch zusätzliche Detektion nötig. Eine exakte Schätzung der Schaltzeiten und eine hundert Prozent zuverlässige Geschwindigkeitsempfehlung ist allerdings auch damit nicht möglich, da Signalprogrammanpassungen und Geschwindigkeitsempfehlungen zu Instabilitäten des Systems führen können. [vgl. LÜßMANN ET AL., 2014]

Ein weiterer Punkt ist, dass lokale verkehrsabhängige Steuerungen keineswegs immer vorteilhaft gegenüber der Festzeitsteuerung sind. Lokale verkehrsabhängige Steuerungen sind „... für den jeweiligen Knotenpunkt logisch erstellt Im Zusammenhang mit dem restlichen Netz verfehlen sie jedoch ihre Wirkung. So wird z.B. eine Verlängerung stark belasteter Ströme zugelassen. Dadurch wird aber die Pfortnerwirkung der Festzeitsteuerung zerstört und die Verkehrsqualität des gesamten Netzes sinkt.“ [BRILON ET AL., 2007]

Zu einer ähnlichen Schlussfolgerung kommen auch BOLTZE ET AL. [2010]: „Lokale regelbasierte Steuerungsverfahren wirken bei der Anpassung an die Verkehrsnachfrage eher kontraproduktiv, können jedoch auf spezielle Anforderungen am besten reagieren.“ Spezielle Anforderungen können dabei eine Freigabe auf Anforderung aus der Nebenrichtung und, ohne Alternative, die Bevorrechtigung des ÖPNV sein.

Aufgrund dessen wird im Rahmen dieser Arbeit auf lokaler Ebene eine Festzeitsteuerung verwendet, bei der nur der Versatz variabel ist. Dies kann verlässliche Geschwindigkeitsempfehlungen und damit einen höheren Befolgungsgrad bewirken, sowie ein Pulkmanagement ermöglichen. Da die Steuerung lokal nicht geändert wird, bleibt die Koordinierung an den Knotenpunkten garantiert erhalten. Anstatt die Steuerung lokal an die Fahrzeuge anzupassen, werden die Fahrzeuge durch das Pulkmanagement an die lokale Steuerung angepasst. Eine Anpassung der Freigabezeiten auf taktischer Ebene, wie etwa bei den in Deutschland angewendeten zentralen Netzsteuerungen Motion und BALANCE (vgl. Abschnitt 2.2.4 und 2.2.5), kann einen zusätzlichen Nutzen bringen. Dies ist aber, wie bereits in Abschnitt 3.2.3 erwähnt, nicht Teil der Arbeit.

3.2.5 Pulkmanager

Der sogenannte Pulkmanager ist dafür verantwortlich, die von der Netzsteuerung festgelegten Progressionsgeschwindigkeiten umzusetzen. Außerdem soll er an der Haltelinie für dichte Pulks sorgen, um so die Kapazität der Freigabezeit optimal zu nutzen. Im Gegensatz zur bereits definierten sogenannten *Traffic Signal Phase Data Message (TSPDM)* wird dazu eine sogenannte *Speed and Lane Advice Data Message (SLAM)* (siehe Abschnitt 5.4) verwendet

(Die Informationen beider Meldungen sind inzwischen in der SPaT (Signal Phase and Timing) standardisiert). Sie enthält keine Informationen über die gesamte Freigabezeit der relevanten Signalgruppe, sondern übermittelt dem Fahrzeugsystem ein kurzes Zeitfenster und einen Fahrstreifen, zu dem das Fahrzeug die Haltelinie passieren sollte. Mittels dieser, im Vergleich zur reinen Information über die Schaltzeit, exakteren Information wird versucht den Pulkauflöschungseffekt aufzuheben, beziehungsweise sogar umzukehren. Für die Berechnung der Zeitfenster benötigt der Pulkmanager eine fahrstreifenfeine Rückstaulängenschätzung sowie eine Schaltzeitprognose. Je nach Umsetzungsgebiet (einschließlich Detektorausstattung und lokalem Steuerungsverfahren) können unterschiedliche Module diese Informationen liefern. Diese Module müssen nicht zwangsläufig Teil der lokalen Steuerung sein.

Die tatsächliche Umsetzung der Geschwindigkeitsempfehlung erfolgt im Fahrzeug selbst, da angenommen wird, dass die energieeffizienteste Annäherungsstrategie im Fahrzeug berechnet werden sollte. Nur dem Fahrzeug stehen einige fahrzeugspezifische Daten (z.B. das Motorkennfeld) zur Verfügung, die eine fahrzeugeitige Optimierung ermöglichen. Eine detaillierte Beschreibung des Pulkmanagements inklusive der Begründung der bereits erwähnten Entwurfsentscheidungen erfolgt in Kapitel 5 *Infrastrukturseitiges Pulkmanagement*.

3.2.6 LSA-Steuergerät

Im Gegensatz zu den bisherigen Komponenten handelt es sich beim LSA-Steuergeräte um Hardware. Die Hardware ist für die Umsetzung der Schaltbefehle der lokalen Steuerung zuständig. In der Regel beinhaltet dies auch die Synchronisation der Signalprogramme [vgl. RILSA, 2010a]. Für das entwickelte System der Netzsteuerung müssen Festzeitsteuerungen versorgt werden. Das Steuergerät muss nur in der Lage sein die Versatzzzeiten aufgrund von Schaltbefehlen einer Zentrale anzupassen. Aufgrund der benötigten Daten für das Pulkmanagement ist eine Verarbeitung und Weiterleitung von an das Steuergerät angeschlossenen Detektoren nötig.

3.2.7 Fahrzeug

Im Fahrzeug wird aus der SLAM ein Hinweis für den Fahrer berechnet und ihm über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human Machine Interface (HMI)) übermittelt. Für die verschiedenen Fahrzeuge gibt es verschiedene Implementierungen. Dies betrifft im Wesentlichen die Umsetzung des HMI.

Im Fahrzeug können für diese Berechnung weitere Informationen berücksichtigt werden, wie zum Beispiel Daten der Fahrzeugsensoren aber auch persönliche Präferenzen des Fahrers. Auf diese Weise kann der Hinweis an den Fahrer den umgebenden Verkehr berücksichtigen und dadurch sowohl die Akzeptanz als auch den Grad der Befolgung erhöhen.

Gleiches gilt für die Übermittlung dieses Hinweises an den Fahrer - hier gibt es je Implementierung unterschiedliche Ansätze. Im einfachsten Fall wird dem Fahrer einfach eine Zielge-

schwindigkeit in der Anzeige des Armaturenbretts beziehungsweise im Navigationsgerät angezeigt. Eine Anzeige im Headup-Display reduziert die Ablenkung vom Verkehrsgeschehen. Da eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen vor allem über ein verändertes Beschleunigungsverhalten erreicht werden kann, geben andere Implementierungen keine Zielgeschwindigkeit an, sondern teilen dem Fahrer mit, ob er beschleunigen oder verzögern soll. Dies geschieht so lange, bis die Zielgeschwindigkeit erreicht ist. Neben der visuellen Anzeige wird auch ein haptischer Reiz über das Gaspedal übermittelt, indem ein Gegendruck aufgebaut wird (dieser kann allerdings vom Fahrer übersteuert werden). Zusätzlich werden auch Schaltempfehlungen gegeben. [vgl. BROCKMANN UND LÖWENAU, 2012]

Eine detailliertere Beschreibung der unterschiedlichen Implementierungen im Rahmen des eCoMove Projekts erfolgt in Kapitel 6 *Fahrzeugseitige längsdynamische Fahrerassistenzsysteme und deren Modellierung*.

4. Netzsteuerung

In diesem Kapitel wird die Netzsteuerung beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und implementiert wurde. In Abschnitt 4.1 werden die wesentlichen Entwurfsentscheidungen für die Steuerung beschrieben. Die Abschnitte 4.2, 4.3 und 4.4 beschreiben detailliert, analog zur Einteilung der modellbasierten Umsetzung eines Steuerungsverfahrens in der RiLSA [FGSV, 2010a], das Steuerungsmodell, das Verkehrsflussmodell und das Verkehrswirkungsmodell. In Abschnitt 4.5 wird schließlich auf die Umsetzung des Verfahrens eingegangen. Das Verkehrsnachfragemodell ist nicht Teil der eigentlichen Arbeit und wird daher in diesem Kapitel nicht näher beschrieben.

4.1 Konzeption der Netzsteuerung

Basierend auf der in Kapitel 2 aufgeführten Übersicht über vorhandene Netzsteuerungen und den in der Verkehrstechnik aktuell geführten Diskussionen werden im Folgenden Zielsetzungen und die daraus abgeleiteten Anforderungen an die entwickelte Netzsteuerung formuliert.

4.1.1 Zielsetzungen der Netzsteuerung

Die Ziele der entwickelten Steuerungsverfahren lassen sich in den folgenden vier wesentlichen Punkten zusammenfassen:

- Das Verfahren soll der in Deutschland gängigen Planungsphilosophie genügen. Grundlage für diese Planungsphilosophie sind in der Regel die Anforderungen aus dem jeweiligen Verkehrsentwicklungsplan, den Verkehr auf dem Primär- und Sekundärnetz, also auf Straßenklassen mit Verbindungsfunktion, zu bündeln und zufriedenstellend abzuwickeln (vgl. [FGSV, 2001; LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN, 2006]). In Deutschland, zumindest in größeren Städten, werden vorwiegend lokale verkehrsabhängige Steuerungen eingesetzt. Diese sind meist regelbasiert. Sie haben auf taktischer Ebene eine Koordinierung entlang der Verkehrsachsen, auf denen der Verkehr gebündelt werden soll, in Form von Rahmensignalplänen [vgl. BOLTZE ET AL., 2011; FAKLER ET AL., 2014]. Eine Anlehnung an die bestehende Planungsphilosophie kann das Hemmnis einer Umsetzung minimieren [vgl. BOLTZE ET AL., 2011].
- Die Steuerung soll die bestehende Systemarchitektur verwenden, um ein Re-Design des technischen Gesamtsystems unnötig zu machen und die Verwendung bestehender Schnittstellen und der Systemarchitektur zu erlauben. Auch hier kann durch das Verwenden bestehender Systemtechnik und der damit verbundenen Kosteneinsparungen das Umsetzungshemmnis minimiert werden [vgl. BOLTZE ET AL., 2011].
- Bisherige Systeme nutzen die C2X-Kommunikation meist nur zum reinen Informationsaustausch, sie interagieren also genaugenommen nur. Eine echte Kooperation, also

ein zweckgerichtetes Einwirken, findet nicht statt. Die Lichtsignalsteuerung sollte den immer mehr aufkommenden Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur berücksichtigen. Das heißt, sie soll zum einen dem Fahrzeug für die Fahrerinformationssysteme genaue und zuverlässige Informationen zur Verfügung stellen und zum anderen sich die aus dieser Information resultierenden veränderten Randbedingungen zu Nutze zu machen. Die daraus resultierende Befolgung der Fahrer kann durch eine Kalibrierung im Verkehrsflussmodell der Steuerung abgebildet und somit berücksichtigt werden.

- Im Rahmen der allgemeinen Diskussion zur Reduzierung von Emissionen spielt der Straßenverkehr eine entscheidende Rolle. „Aktuelle modellbasierte Netzsteuerungsverfahren können im Netz oder im Streckenzug bei entsprechender Parametrierung eine Reduzierung der NO_x-, der PM_x- und der CO₂-Emissionen im unteren zweistelligen Prozentbereich im Vergleich zu optimierten regelbasierten Verfahren erreichen [BRAUN ET AL., 2009; KRUSE, 2003; HIRSCHMANN UND FELLENDORF, 2009; BOLTZE ET AL., 2011]“ [FGSV, 2014]. Die Optimierung beruht aber bei bisherigen Steuerungen nicht direkt auf Emissionen sondern in der Regel auf der Reduzierung der Halte. Dieser Ansatz ist wie in Abschnitt 3.2.3 erläutert allerdings wesentlich ungenauer. Angestrebt ist im Rahmen der Arbeit eine direkte Optimierung auf Basis von Emissionen.

4.1.2 Anforderungen an die Netzsteuerung

Aus den Zielsetzungen lassen sich folgende Anforderungen an die entwickelte Netzsteuerung formulieren:

- Um der in Deutschland gängigen Planungsphilosophie zu genügen, muss die Netzsteuerung dem planenden Ingenieur die Möglichkeit geben eine Koordinierung auf vordefinierten Verkehrsachsen festzulegen.
- Die Übermittlung der optimierten Signalprogrammparameter muss bestehende Schnittstellen nutzen. Dies ist zum Beispiel bei Rahmensignalplänen der Fall. Diese können von einer Vielzahl neuerer Steuergeräte verarbeitet werden. Wenn auf lokaler Ebene keinerlei Anpassungen des Signalprogramms vorgenommen wird, können selbst wesentlich ältere Steuergeräte verwendet werden, da Festzeitsignalprogramme immer verarbeitet werden können. Auf diese Weise kann im Grunde jedes Steuergerät, also auch ältere, mit Anbindung an die Verkehrsmanagementzentrale verwendet werden.
- Wie in 2.3.3 gezeigt, sind verlässliche Schaltzeitprognosen mit regelbasierten lokalen Steuerungen nur in einem sehr groben Rahmen möglich. Für eine zuverlässige Geschwindigkeitsempfehlung ist eine genaue Schaltzeitprognose aber nötig. Das entwickelte Steuerungsverfahren soll daher auf eine lokale Anpassung der Lichtsignalsteuerung verzichten. Im Gegenzug sollen dafür hundertprozentig genaue Schaltzeiten garantiert werden, und die Fahrzeuge können so an die Steuerung angepasst werden.

- Mit der Geschwindigkeitsempfehlung für Fahrer ändert sich auch die Progressionsgeschwindigkeit der Pulks. Das Verkehrsflussmodell muss diese Änderung abbilden können. Außerdem wird die Progressionsgeschwindigkeit als Parameter in das Steuerungsmodell aufgenommen.
- Eine direkte Bewertung hinsichtlich der Emissionen ist bei einem makroskopischen Verkehrsflussmodell nicht möglich, beziehungsweise wie im HBEFA [INFRAS, 2010] zu grob, um etwa verschiedene Versatzzeiten unterschiedlich zu bewerten. Für eine direkte Bewertung hinsichtlich Emissionen muss daher ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell verwendet werden. Diskrete mikroskopische Verkehrsflussmodelle, wie beispielsweise zellulare Automaten [NAGEL, 1996], verfügen zwar über Geschwindigkeitsprofile einzelner Fahrzeuge, allerdings ist ihr Fahrverhalten aufgrund der nicht kontinuierlichen Eigenschaften, wie etwa der Geschwindigkeiten, für eine Bewertung hinsichtlich der Emissionen zu ungenau. Kontinuierliche Verkehrsflussmodelle können realitätsnahe Geschwindigkeitsprofile liefern und sind somit für die Emissionsberechnung geeignet. Um die Pulkauflösung und Überholvorgänge realitätsnah abbilden zu können, ist zudem die Berücksichtigung mehrerer Richtungsfahrestreifen eine Voraussetzung für das Modell. Nach HOOGENDORN UND BOVY [2001] werden diese Eigenschaften nur von psycho-physischen Fahrzeugfolgmodellen erfüllt.

4.2 Steuerungsmodell

Um der, im vorherigen Abschnitt 4.1 beschriebenen, in Deutschland gängigen Planungsphilosophie zu genügen, arbeitet die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte adaptive Netzsteuerung auf der taktischen Steuerungsebene und damit als zyklische Steuerung.

4.2.1 Steuerungsvariablen

Die Netzsteuerung optimiert ausschließlich auf Netzebene, das heißt, dass als Steuerungsvariablen nur netzrelevante Parameter verwendet werden. Dies sind die Versatzzeiten sowie die Progressionsgeschwindigkeiten der Hauptströme.

Eine Veränderung der Umlaufzeit, der Freigabezeitanteile und der Phasenfolge ist nicht Teil des Steuerungsmodells. Diese Steuerungsvariablen dienen im Wesentlichen der Kapazitätsanpassung am einzelnen Knoten und haben somit, unter der Annahme einer guten Planung, nur bei hohen Auslastungen und damit verbundener Rückstaubildung einzelner Signalgruppen einen netzrelevanten Einfluss. Eine Anpassung der Kapazitäten am Knotenpunkt kann zudem, wenn im Verkehrsnachfragemodell keine Rückkopplung zur Nachfrage aufgrund veränderter Freigabezeiten angenommen wird (dies ist bei allen bisherigen Netzsteuerungsverfahren der Fall), auch lokal, direkt am Knotenpunkt durch eine lokale Komponente, durchgeführt werden. Eine Optimierung des Signalzeitenplans muss somit nicht Teil der Netzsteuerung sein. Die

Netzsteuerung kann vielmehr einen optimierten Signalzeitenplan von einer lokalen Komponente übernehmen. Lediglich ein Abgleich gleicher Umlaufzeiten unter den lokalen Komponenten ist zwingend nötig. Laut POHLMANN [2010] ist, zumindest für Verkehrsnachfragen unterhalb der Sättigungsverkehrsstärken, eine getrennte Optimierung lokaler Parameter (Phasenfolge, Umlaufzeit und Freigabezeiten) und der Netzparameter (Versatzzeit) ausreichend und zuverlässig.

Im Rahmen dieser Arbeit werden auf der lokaler Steuerungsebene, die als Rückfallebene zu den regelbasierten Knotenpunktsteuerungen dienenden, Festzeitsignalprogramme verwendet.

Wie schon HOFFMANN [1989] beschreibt, werden Geschwindigkeitsempfehlungen von unter 40 km/h bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h beziehungsweise 35 km/h bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h nicht mehr befolgt, da nicht informierte Fahrer zu dicht auffahren. Auch im Projekt TRAVOLUTION [BRAUN ET AL., 2009] werden, um den übrigen Verkehr nicht zu sehr zu behindern und um die Akzeptanz zu steigern, nur Geschwindigkeitsempfehlungen zwischen 30 km/h und 50 km/h gegeben. Dies entspricht jeweils circa 70 Prozent der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Aus diesem Grund sind auch für die Optimierung nur Progressionsgeschwindigkeiten zulässig, die zwischen 70 und 100 Prozent der zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegen. Die Steuerungsvariable Progressionsgeschwindigkeit wird dabei in 5 km/h-Schritten variiert. Eine kleinere Schrittweite ist nicht sinnvoll, da sich die tatsächlich realisierten Geschwindigkeiten um die im Verkehrsflussmodell angenommene Progressionsgeschwindigkeit verteilen werden und sich daraus größere Überschneidungen ergeben würden. Daher werden auch, zum Beispiel aufgrund der Variabilität der Verkehrsnachfrage und damit einhergehender unterschiedlicher Rückstaulängen, die jeweils niedrigste Progressionsgeschwindigkeiten je Richtung nicht verwendet. Damit werden Geschwindigkeitsempfehlungen unterhalb dieser niedrigsten Progressionsgeschwindigkeit für das Pulkmanagement vermieden.

4.2.2 Optimierungsalgorithmus

Eine Optimierung auf Netzebene kann parallel, also für alle Steuerungsvariablen auf einmal (vgl. FRIEDRICH [1999], BRAUN [2008]), oder abschnittsweise, das heißt die Steuerungsvariablen werden einzeln oder in mehreren Gruppen nacheinander optimiert (vgl. BÖTTGER [1972], MÜCK UND POSCHINGER [2009]), erfolgen. Für die in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Steuerungsvariablen macht bei der abschnittswisen Optimierung beispielsweise eine geographische Unterteilung Sinn, das heißt die Steuerungsvariablen werden jeweils für einen Sektor, bestehend aus zwei Knotenpunkten, optimiert. Beide Varianten sind in Abb. 4-1 dargestellt.

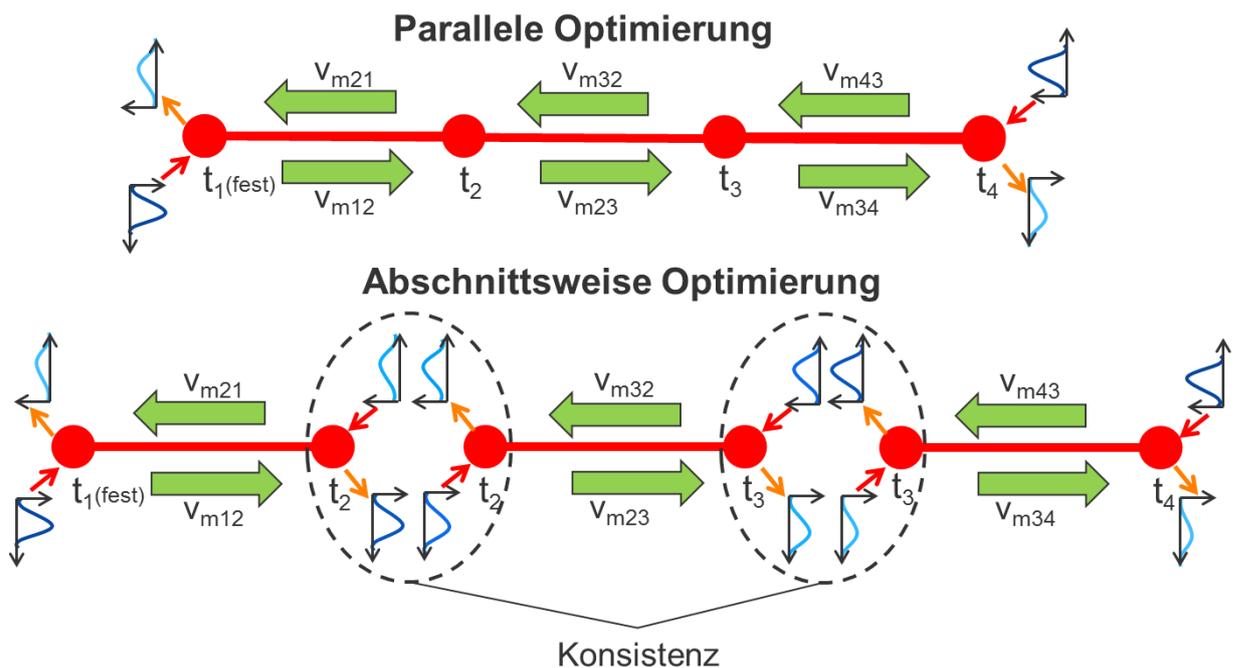


Abb. 4-1 Parallele und abschnittsweise Optimierung

Im ersten Fall wird der gesamte Lösungsraum durchsucht, womit garantiert auch das Systemoptimum Teil des Lösungsraums ist. Allerdings ist der Lösungsraum damit auch sehr groß und es können nicht alle möglichen Lösungen des Lösungsraums untersucht werden. Dies macht den Einsatz von Optimierungsverfahren nötig. MERTZ [2001] zeigt, dass sich für ein derartiges Steuerungsproblem aufgrund der NP-Vollständigkeit (das Problem lässt sich nicht deterministisch lösen) das Finden der optimalen Lösung nicht garantieren lässt. Allerdings bieten heuristische Verfahren die Möglichkeit eine dem Optimum nahe Lösung zu finden.

Für einen Streckenabschnitt mit vier Knotenpunkten, einem Geschwindigkeitslimit von 60 km/h (daraus folgen vier mögliche Progressionsgeschwindigkeiten (60, 55, 50, 45) je Abschnitt und einer Umlaufzeit von 90 Sekunden ergeben sich so 33.546.240 Lösungsmöglichkeiten (90^3 (Versatzzeiten) * 4^6 (Progressionsgeschwindigkeiten)) je Optimierungsintervall.

Ein Vorteil der parallelen Optimierung aller Steuerungsvariablen ist, dass im Verkehrsflussmodell alle Fahrzeugpuls durch das gesamte Netz propagiert werden können, so dass die Ankunftsverteilungen an den Haltelinien, die die wesentliche Grundlage der Bewertung der Lösung sind, im gesamten Netz konsistent sind.

Im zweiten Fall ist der Lösungsraum wesentlich kleiner. Somit ist, zumindest für eine offline Optimierung, eine komplette Enumeration des Lösungsraums möglich.

Für das oben genannte Beispiel enthält der Lösungsraum hier nur 4320 Lösungsmöglichkeiten (90 (Versatzzeit) * 4² (Progressionsgeschwindigkeiten) * 3 (Sektoren)) je Optimierungsintervall.

Allerdings ist die Ankunftsverteilung für die Fahrzeugpuls entgegen der Optimierungsrichtung nicht zwingend konsistent, da diese für den ersten Sektor erst nach der Optimierung des zweiten Sektors feststeht. Bei der Optimierung des ersten Sektors muss die Ankunftsverteilung daher geschätzt werden. Diese Schätzung kann sich allerdings bei der Optimierung des zweiten Sektors als falsch erweisen.

Durch den Einsatz des in Kapitel 5 beschriebenen infrastrukturseitigen Pulkmanagements lässt sich diese Inkonsistenz allerdings umgehen, da diese versucht dichte Puls zum Freigabezeitbeginn zu erzeugen, und die Ankunftsverteilung damit vorhersagbar ist. Auf diese Weise ist statt einer Optimierung nach Optimierungsplan (also nacheinander) auch eine zeitgleiche Optimierung der Sektoren möglich. POHLMANN [2010] zeigt, dass eine abschnittsweise Optimierung der Versatzzeit einer parallelen Optimierung sowohl hinsichtlich der Qualität als auch hinsichtlich der Effizienz überlegen sein kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine abschnittsweise Optimierung angewendet.

In Abb. 4-2 ist der Verlauf der Zielfunktion der Bewertung Individuen (ein Individuum stellt dabei eine Lösung mit bestimmten Eigenschaften dar) für die Kenngröße CO₂ Emissionen relativ zu ihrem Minimum für drei unterschiedliche Sektoren dargestellt. Es wurden jeweils 4 Umläufe bewertet. Innerhalb der roten Hilfslinien sind die Steuerungsvariablen der Progressionsgeschwindigkeit dabei jeweils unverändert. Für die Anzahl der Halte und die Fahrtzeit ergibt sich ein ähnlicher Verlauf.

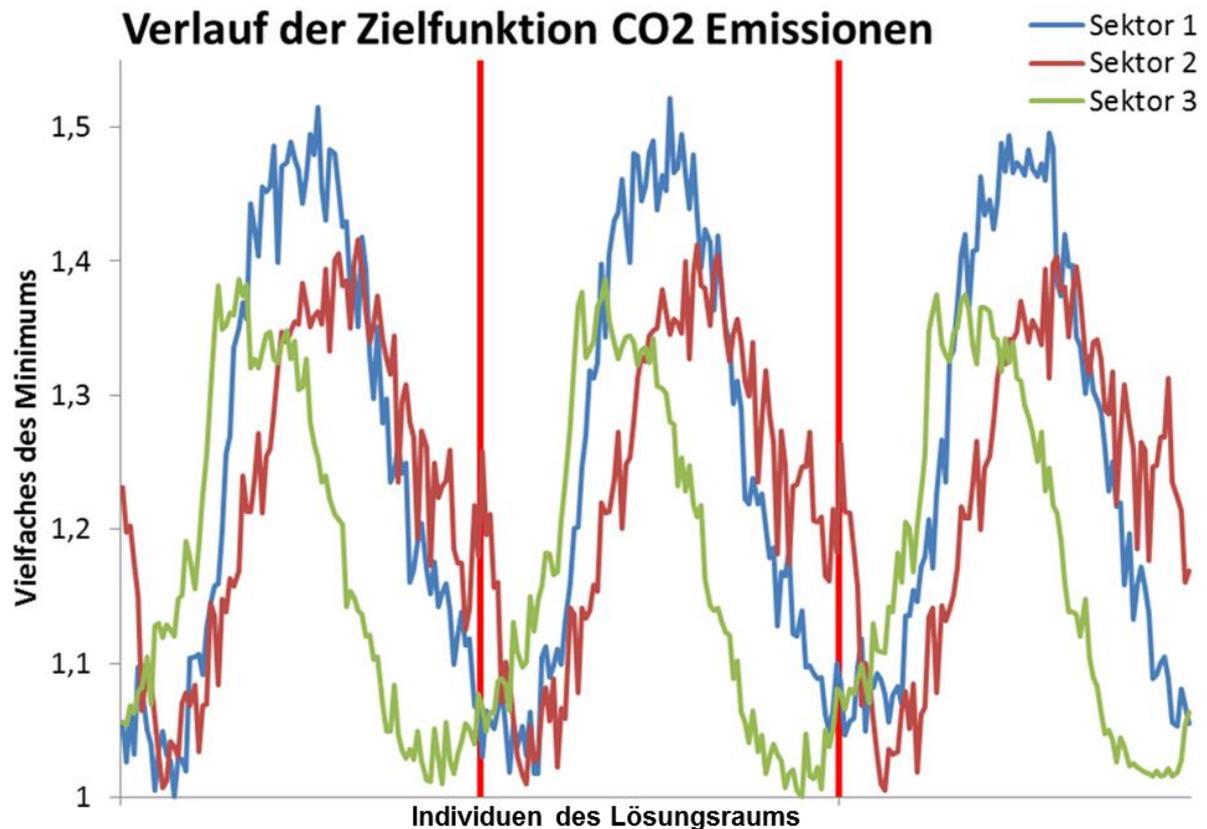


Abb. 4-2 Verlauf der Zielfunktion als Relation zum Minimum

Der Verlauf der Zielfunktion ist zwar nicht komplett stetig, allerdings scheint bereits der Einsatz eines mehrstufigen Down-Hill-Algorithmus für die Steuerungsvariable Versatzzeit mit unterschiedlichen Schrittweiten möglich, ohne sich in lokale Minima zu verlaufen. Mittels einer größeren Schrittweite kann der Bereich des Minimums gefunden werden, ehe dieser mit einer kleinen Schrittweite komplett durchsucht und das Minimum gefunden wird.

Für die Optimierung wird deshalb ein zweistufiger Down-Hill-Algorithmus verwendet. In der ersten Stufe wird eine Schrittweite von zehn Sekunden gewählt. Wird ein Minimum gefunden, wird im zweiten Schritt der Lösungsraum um dieses Minimum in Einzelschritten durchsucht.

Der Verlauf der Zielfunktion für das Bewertungskriterium Anzahl der Halte in Relation zum Minimum schwankt wesentlich stärker. Das gefundene Minimum stimmt dabei für das untersuchte Testfeld nicht mit dem der Zielfunktion basierend auf CO₂ Emissionen überein. Der Abstand der gefundenen Minima der beiden Zielfunktionen hängt dabei im Wesentlichen vom jeweiligen Sektor und nur in geringem Maße von der Verkehrsnachfrage ab.

4.3 Verkehrsflussmodell

Da die Bewertung auf Emissionen erfolgt, wird ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell verwendet. Als Verkehrsflussmodell wird das psycho-physische Fahrzeugfolgemodell nach WIEDEMANN [1974] gewählt. Dies hat folgende Gründe:

- Mit VISSIM 5.40 [PTV, 2012a] gibt es eine weitverbreitete Umsetzung des Modells, wodurch eine Implementierung nicht nötig ist.
- Mit der COM-Schnittstelle [PTV, 2011] in VISSIM besteht die Möglichkeit im Verlauf der Optimierung von Extern Änderungen am Modell vorzunehmen.
- Mit EnViVer 3.0 [EIJK ET AL., 2011] steht ein Emissionsmodell zur Verfügung, das Daten aus VISSIM auswerten kann und über eine Schnittstelle an VISSIM angebunden ist.
- Durch die Verbreitung der Software VISSIM besteht ein großer Erfahrungsschatz zur Kalibrierung des Modells. Wie in Abschnitt 6.5.1 gezeigt wird ist dies auch hinsichtlich der Bewertung von Emissionskenngrößen der Fall. Durch die in Kapitel 6. *Fahrzeugseitige längsdynamische Fahrerassistenzsysteme und deren Modellierung* durchgeführte Kalibrierung kann zudem die Befolgung der erweiterten Fahrerinformation durch die Fahrer abgebildet werden.

4.3.1 Netzmodell

Für jeden Sektor zwischen zwei lichtsignalgeregelten Knotenpunkten, der von der Netzsteuerung optimiert werden soll, muss vorab ein Netzmodell inklusive der Signalgeber, Wunschgeschwindigkeitsentscheider und Routenentscheidungen erstellt werden. Um bestimmte Straßenzüge zu koordinieren, werden mehrere Sektoren aneinander gereiht.

Um Rechenzeit zu sparen, ist das Netzmodell vereinfacht. Es enthält nur signalgeregelte Knotenpunkte, sowie Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage mit relevanten Zu- oder Abflüssen. Es enthält keine Querverkehrsstörungen oder Langsamfahrbereiche. Separate Abbiegefahrstreifen werden nur berücksichtigt, wenn sie eine eigene Signalgruppe haben. Das heißt zum Beispiel, dass Mischfahrstreifen vereinfacht als Geradeausfahrstreifen modelliert werden. Die Fahrstreifen der Zuflüsse werden nur modelliert, wenn die Fahrzeuge den zu bewertenden Abschnitt auch durchfahren würden. Bei der Modellierung ist zudem darauf zu achten, dass für jeden Fahrstreifen ein Verbinder vorhanden ist, da die Fahrzeuge sonst am Streckenende aus dem Netz fahren. Zudem ist bei den Verbindern darauf zu achten, dass ein ausreichend großer Beginn des Fahrstreifenwechselwunsches eingestellt wird, da es sonst bei der Simulation höherer Verkehrsnachfragen zu unrealistischem Fahrstreifenwechselverhalten und damit zu Überlastungen kommt.

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, beeinflusst das in Kapitel 5 beschriebene infrastrukturseitige Pulkmanagement die Ankunftsverteilung der Fahrzeuge an der jeweils ersten Lichtsignalanlage. Das Pulkmanagement versucht dabei einen dichten Pulk am Freigabezeitbeginn zu erzeugen. Um diesen Effekt im Verkehrsflussmodell abzubilden, wird ein Vorsignal verwendet. Die Fahrzeuge werden während der Sperrzeit am Vorsignal aufgestaut und vor Freigabezeitbeginn des eigentlichen Signals freigegeben. Auf diese Weise kommen im Verkehrsflussmodell die Fahrzeuge am Rand des zu optimierenden Sektors in beide Richtungen am ersten Signal als dichter Pulk zum Freigabezeitbeginn an und damit so, wie es vom infrastrukturseitigen Pulkmanager versucht wird. Für ein Geschwindigkeitslimit von 60 km/h hat sich nach Tests ein Abstand von 85 Metern zwischen Vorsignal und eigentlichem Signal sowie eine Freigabe von 11 Sekunden vor dem Freigabezeitbeginn als geeignet erwiesen, damit die Fahrzeuge die eigentliche Signalgruppe zum Freigabezeitbeginn erreichen. Grundsätzlich können durch ein verändertes Vorsignal auch andere Ankunftsverteilungen erzeugt werden. So steht zum Beispiel ein Dauergrün für eine zufällige gleichverteilte Ankunft, wie sie ohne Pulkmanagement am Netzrand auftritt.

Der Beschleunigungsvorgang spielt für die Emissionen eine wesentliche Rolle. Um angehaltene Fahrzeuge bewerten zu können, ist das Netz daher nach dem zweiten Signalgeber des jeweiligen Sektors um eine Beschleunigungsstrecke erweitert, zu deren Anfang die Wunschgeschwindigkeit wieder auf die des Geschwindigkeitslimits gesetzt wird. Aus Tests hat sich für ein Geschwindigkeitslimit von 60 km/h eine Verlängerung des Netzes nach dem Signalgeber um 150 Meter als geeignet erwiesen.

In Abb. 4-3 ist ein realer Sektor, sein schematischer Aufbau sowie seine Umsetzung in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation VISSIM dargestellt. Daten werden für alle Stecken und Verbinder ausschließlich der Zuflüsse erhoben.

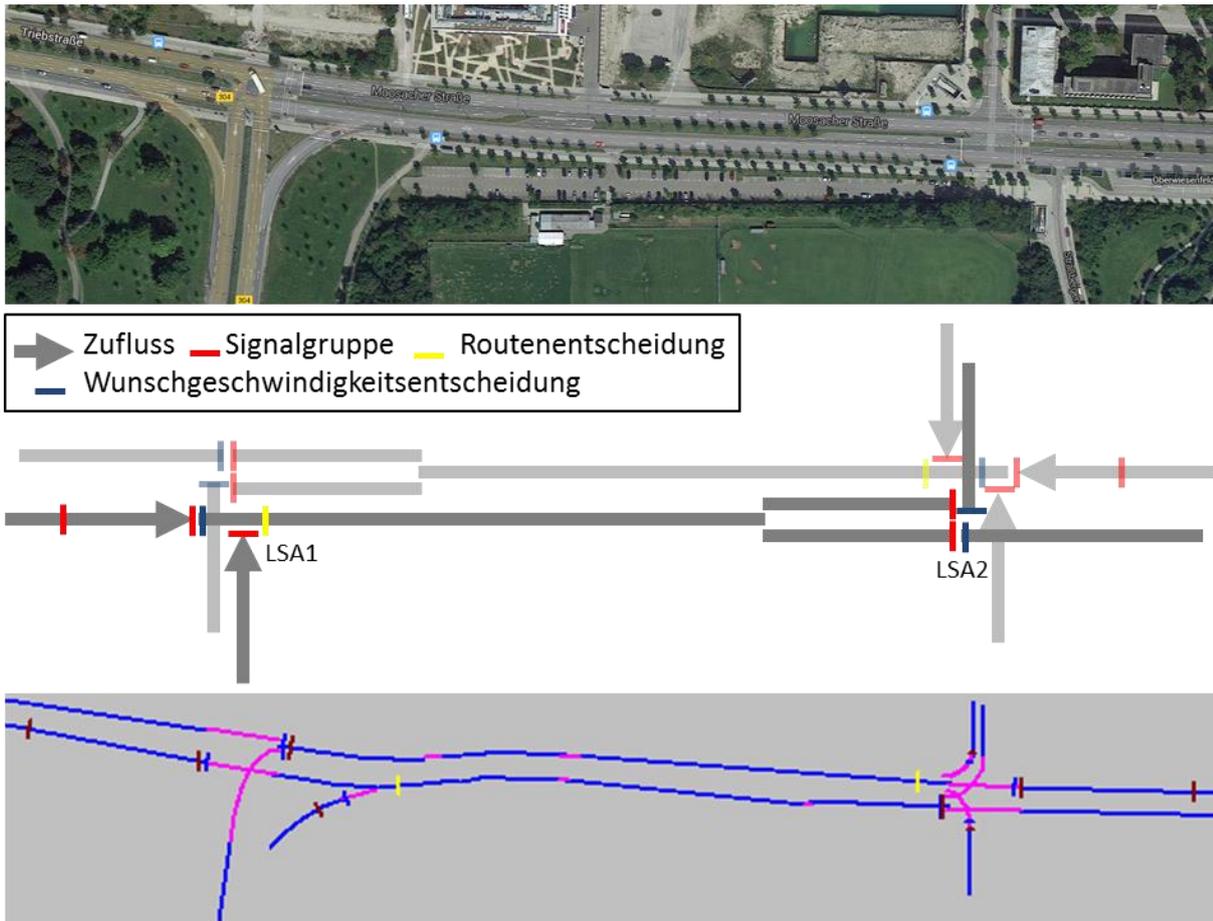


Abb. 4-3 Sektor als Karte (Quelle: Openstreetmap), schematische Darstellung (Gegenrichtung hellgrau) und Umsetzung als VISSIM Modell (von oben nach unten).

4.3.2 Fahrer-Fahrzeugmodell

WILMINK ET AL. [2009] und SONG ET AL. [2013] zeigen, dass das psycho-physische Fahrzeugfolgemodell nach WIEDEMANN [1974] mit den in VISSIM verwendeten Standardparametern von Realdaten abweichende Emissionswerte liefert. Aus diesem Grund werden für das Verkehrsflussmodell die in Kapitel 6 beschriebenen kalibrierten Parameter verwendet.

Wunschgeschwindigkeitsverteilungen werden dabei je bewertetem Lauf des Verkehrsflussmodells über die COM-Schnittstelle geändert. Nach der Haltelinie des zweiten Knotenpunkts des jeweiligen Sektors wird die Wunschgeschwindigkeitsverteilung der Fahrzeuge wieder auf die des Geschwindigkeitslimits gesetzt.

4.3.3 Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsstärken werden zu Beginn der Optimierung jedes Sektors mittels der COM-Schnittstelle geändert. Berücksichtigt werden dabei nur Verkehrsströme, die den Sektor durchfahren. Auf die gleiche Weise werden die Routenentscheidungen versorgt. Hierbei werden jeweils Ströme, die dieselbe Signalgruppe nutzen, zusammengefasst. Als Grundlage für diese

Eingangsgrößen kann grundsätzlich jedes Verkehrsnachfragemodell mit Prognose verwendet werden.

Für den Schwerlastanteil sowie die Ausstattungsrate kommunikationsfähiger Fahrzeuge wird ein konstanter Anteil angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass diese Anteile tagsüber keinen relevanten Schwankungen unterliegen. Eine Erfassung der Anteile kann beispielsweise aus historischen Detektor- beziehungsweise Kommunikationsdaten erfolgen. Über einen längeren Zeitraum können diese Anteile allerdings angepasst werden.

4.3.4 Datenausgabe

Die Datenausgabe des Verkehrsflussmodells an das Verkehrswirkungsmodell besteht aus einer Fahrzeugprotokolldatei (*.fzp) und beinhaltet folgende Kenngrößen:

- Fahrzeugnummer
- Fahrzeugtyp
- Weltkoordinate Vorderkante X
- Weltkoordinate Vorderkante Y
- Weltkoordinate Vorderkante Z
- Geschwindigkeit [m/s]
- Beschleunigung [m/s²]

Die Daten werden in der Frequenz von einem Hertz aufgezeichnet. Aufgezeichnet werden die Daten auf allen Strecken und Verbindern nach dem jeweils ersten Signalgeber, also ohne die in Abb. 4-3 dargestellten Zuflüsse. Die Datenaufzeichnung beginnt nach dem ersten vollständigen Umlauf. Der Vorlauf dient dazu das Netz mit einer Grundbelastung zu füllen.

4.4 Verkehrswirkungsmodell

Das Verkehrswirkungsmodell arbeitet auf Grundlage des im Verkehrsflussmodell erzeugten Fahrzeugprotokolls. Eine Bewertung erfolgt hinsichtlich Verkehrseffizienz und Emissionen. Im Rahmen der Arbeit werden für die Optimierung allerdings nur die CO₂ Emissionen herangezogen, da diese direkt mit dem Kraftstoffverbrauch und damit mit dem Energieverbrauch korrelieren.

4.4.1 Bewertung der Verkehrseffizienz

Verkehrliche Kenngrößen des Verkehrswirkungsmodells sind Fahrtzeit und die Anzahl der Halte.

Eine Bewertung auf Verlustzeiten, wie sie in Verkehrswirkungsmodellen mit makroskopischen Verkehrsflussmodellen in der Regel zur Anwendung kommt, ist aufgrund der unterschiedlichen Progressionsgeschwindigkeiten und damit der unterschiedlichen Wunschgeschwindigkeitsverteilungen nicht möglich. Dies liegt daran, dass die Verlustzeit immer in Abhängigkeit der, aus der Wunschgeschwindigkeit berechnete, ideale Fahrtzeit ermittelt wird. Dies würde bei geringeren Wunschgeschwindigkeiten auch zu geringeren Verlustzeiten führen.

Als Halt wird definiert, wenn ein Fahrzeug eine Geschwindigkeit von 3 km/h unterschreitet und anschließend wieder auf mehr als 5 km/h beschleunigt.

4.4.2 Bewertung der Emissionen

Emissionskenngrößen des Verkehrswirkungsmodells sind CO₂, NO_x und PM₁₀ Emissionen.

Für die Emissionsbewertung wird das Emissionsmodell VERSIT+micro verwendet. Es basiert auf VERSIT+ für PKW und PHEM für LKW (vgl. Abschnitt 2.1.4) und wurde entwickelt, um Emissionen auf Basis von simuliert erzeugten Daten zu schätzen. Im Vergleich zu VERSIT+, werden in VERSIT+micro drei Vereinfachungen getroffen:

- Die über einhundert Fahrzeugmodelle werden zu 4 Fahrzeugklassen zusammengefasst (Pkw, Lastkraftwagen, Sattelschlepper und Busse). [LIGTERINK ET AL., 2008]
- Die Flottenzusammensetzung wird für zwei Umgebungen zusammengefasst (innerstädtisch und außerorts). [LIGTERINK ET AL., 2008]
- Die Daten aus der Simulation liefern, im Vergleich zu realen Daten, nur eine beschränkte Auswahl an Kenngrößen für die Emissionsmodellierung. So stehen für die Emissionen wichtige Informationen, wie beispielsweise zum gewählten Gang in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, nicht zur Verfügung. VERSIT+ micro verwendet daher zur Emissionsmodellierung ausschließlich Geschwindigkeitsprofile sowie die vom Nutzer festgelegte Situationsklasse (hier innerstädtisch). [LIGTERINK ET AL., 2008]

In der verwendeten Version steht nur eine niederländische Flottenzusammensetzung für das Jahr 2010 zur Verfügung. Die Flottenzusammensetzung für Pkw entspricht in etwa der deutschen (Niederlande: 68 Prozent Benzin, 30 Prozent Diesel, 2 Prozent Autogas; Deutschland: 67 Prozent Benzin, 28 Prozent Diesel, 5 Prozent Autogas [STATISTA, 2013]), für Lkw ist sie exakt dieselbe (100 Prozent Diesel). Die Version wird auch in Kapitel 7 zur Bewertung verwendet.

Genutzt wird dazu das Produkt EnViVer 3.0 [EIJK ET AL., 2011], das als Eingangsdaten direkt die VISSIM Fahrzeugprotokolle verwendet. Die Berechnung der Emissionen erfolgt hier über eine VERSIT+ Datenbankabfrage in Echtzeit.

4.5 Schaltbefehl

Nach Beendigung der Optimierung werden den Kontrollern die neuen Versatzzeiten übermittelt. Die optimierten Progressionsgeschwindigkeiten könnten einem lokalen Knotenpunktsteuerungsverfahren zur verbesserten Schätzung der Ankunftsverteilung übermittelt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Sie nicht weiter genutzt, da auf lokaler Ebene eine Festzeitsteuerung verwendet wird.

Für den Signalprogrammwechsel gibt es unterschiedliche Umschaltverfahren (vgl. COHEN ET AL. [2007] und POHLMANN [2010]). Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt der Signalprogrammwechsel nach einem Dehnverfahren (vgl. [FGSV, 2010a]) innerhalb eines Umlaufs. Der Umschaltzeitpunkt liegt jeweils 5 Sekunden nach Beginn der Phase für die Hauptströme.

Je kleiner das Optimierungsintervall ist, desto häufiger ist ein Signalprogrammwechsel nötig. Der Signalprogrammwechsel hat in der Regel einen großen Einfluss auf den Verkehrsablauf, weshalb der Signalprogrammwechsel bei kurzen Optimierungsintervallen Teil der Bewertung sein sollte. Da für Bewertung in Kapitel 7 die Verkehrsnachfrage nur in einstündlichen Intervallen zur Verfügung steht wurde der resultierende Effekt im Rahmen der Arbeit nicht näher untersucht.

4.6 Systemtechnische Umsetzung

Die Umsetzung der Komponenten der Netzsteuerung erfolgte in C++. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der entwickelte Algorithmus dazu in ein Framework der Firma MAT.Traffic implementiert [ECOMOVE, 2011b][ECOMOVE, 2012a]. Die einzulesenden Parameter sind in Form von Textdateien hinterlegt. Die Netzmodelle der Sektoren sind als VISSIM Inputdateien (*.inp) hinterlegt. In Abb. 4-4 ist die Systemarchitektur mit sämtlichen Komponenten mit den wesentlichen Datenflüssen dargestellt. Für die Versorgung der Netzsteuerung werden zwei Textdateien verwendet.



Abb. 4-4 Systemarchitektur der Netzsteuerung

Über die Konfigurationsdatei (EWG.config) kann die Verbindung zur Simulationsumgebung (vgl. Abschnitt 7.2) eingestellt werden. Außerdem wird das Optimierungsintervall festgelegt sowie die Anzahl und Schrittweite der zu untersuchenden Steuerungsvariablen der Progressionsgeschwindigkeiten der Hauptströme. Des Weiteren wird hier der Pfad zur Netzdatei und zur Versorgungsdatei des Verkehrsnachfragemodells versorgt.

Die Netzdatei (EWG.road) beinhaltet Informationen zur Geometrie. Im Einzelnen sind dies die Pfade zu den VISSIM Netzmodellen (*.inp) der Sektoren und ihre Signalsteuerungsdateien (*.sig), die IDs der Zuflüsse ins Netz und der Routenentscheider sowie die zulässige Höchstgeschwindigkeit jedes versorgten Sektors. Über die Reihung der Pfade zu den Netzelementen kann auch der Optimierungsplan festgelegt werden und an welchem der Knotenpunkte die Versatzzeit unverändert bleibt (etwa der Knotenpunkt, an dem sich zwei Koordinierte Streckenzüge kreuzen oder der am stärksten belastete).

Beim Start der Netzsteuerung werden diese Dateien eingelesen. Die Optimierung startet in Abhängigkeit des Zeitstempels und wenn Daten des Verkehrsnachfragemodells vorliegen. Die Daten des Verkehrsnachfragemodells werden ebenfalls als Textdatei eingelesen. Die Nachfrage-datei (EWG.demand) enthält den Zeitstempel, eine Sektor ID und die Zuflüsse und Routenanteile des jeweiligen Sektors.

Das Verkehrsflussmodell VISSIM [PTV, 2012a] wird über die COM-Schnittstelle [PTV, 2011] angesteuert. Dies betrifft die Versorgung der Verkehrsnachfrage, die Änderung der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen und das Starten der Simulation. Die Informationen zur Signalsteuerung sind seit Version 5.20 in die sogenannte Signalsteuerungsdateien (*.sig) ausgelagert, die ein XML Format haben. Die Versatzzzeit kann daher nicht über die COM-Schnittstelle geändert werden, sondern wird über einen Parser direkt in der Signalsteuerungsdatei geändert.

Das Verkehrswirkungsmodell arbeitet auf Grundlage der Fahrzeugprotokolldatei (*.fzp). Die Spracheinstellung in VISSIM muss Englisch sein, da die Fahrzeugprotokolldatei von der Netzsteuerung sonst nicht gelesen werden kann. Die verkehrliche Bewertung (Anzahl der Halte, Fahrtzeit) wird von der Netzsteuerung selbst vorgenommen. Für die Emissionsbewertung wird eine Datenbankabfrage über EnViVer [EIJK ET AL., 2011] verwendet. Die Anbindung erfolgt über eine Dynamik Link Library (DLL).

4.7 Technische Bewertung

Die technische Bewertung der Netzsteuerung geht einher mit deren Parametrierung. Im Gegensatz zur von BRAUN [2008] beschriebenen Optimierung liegt die Zufälligkeit nicht im Steuerungsmodell sondern im Verkehrsflussmodell, trotzdem lässt sich das Verfahren auf Grundlage ähnlicher Kriterien technisch bewerten. Es werden folgende Bewertungskriterien herangezogen:

- **Konsistenz:** Die Konsistenz beschreibt die Unterschiedlichkeit der Bewertung einer einzelnen Lösung mit unterschiedlichen Zufallszahlen bei sonst gleichen Randbedingungen.
- **Robustheit:** Die Robustheit der Steuerung beschreibt, wie zuverlässig das Verfahren das tatsächliche Optimum findet. Die Robustheit der Steuerung lässt sich beispielsweise am Verlauf der Zielfunktion erkennen. Je stetiger die Zielfunktion, desto robuster ist die Steuerung.
- **Qualität:** Die Qualität der Optimierung beschreibt, wie nahe die beste gefundene Lösung am tatsächlichen Optimum des verwendeten Verkehrsflussmodells liegt.
- **Effizienz:** Die Effizienz beschreibt den Zeitbedarf zum Finden der optimalen Lösung.

4.7.1 Konsistenz

Da das, in VISSIM verwendete, Verkehrsflussmodell nach WIEDEMANN [1974] stochastische Eigenschaften hat, ist für eine statistisch abgesicherte Bewertung der Steuerungsvariablen im Verkehrswirkungsmodell ein gewisser Stichprobenumfang nötig. Da eine Mehrfachsimulation

zu zeitaufwändig ist und damit die Effizienz des Verfahrens negativ beeinflusst, wird als Stichprobe die Bewertung eines einzelnen Umlaufs verwendet. Über die Anzahl der bewerteten Umläufe lässt sich sowohl die Rechenzeit des Verkehrsflussmodells im Besonderen als auch die Rechenzeit des Verkehrswirkungsmodells beeinflussen, die Auswahl der Anzahl der bewerteten Umläufe ist daher von großer Bedeutung für die Effizienz des Verfahrens.

Die Anzahl der zu bewertenden Umläufe ergibt sich aus folgender:

$$n \geq \frac{t(\alpha, n-1)^2 * s^2}{e_a^2} \quad (\text{Formel 4-1})$$

mit:

$t(\alpha, n-1)$	Wert aus der Student-Verteilung in Abhängigkeit von Konfidenzniveau und Stichprobenumfang
s^2	Streuung der Stichprobe der CO ₂ Emissionen der einzelnen Zufallszahlen
e_a^2	gewünschte absolute Genauigkeit (Konfidenzintervall)

Für die Bewertung der Konsistenz wurden Optimierungen mit 10 verschiedenen Startzufallszahlen des Verkehrsflussmodells für die Nachfrage von 6:00 Uhr bis 12:00 Uhr eines durchschnittlichen Wochentags durchgeführt. Es wurden für jede Kombination der Steuerungsvariablen Mittelwerte und Standardabweichung berechnet. Als Konfidenzniveau α wird ein Wert größer 90 Prozent festgelegt.

Aus der Stichprobe ergibt sich für eine gewünschte Genauigkeit der bewerteten Steuerungsvariablen von einem Prozent vom Mittelwert eine Mindeststichprobe von einem zu bewertenden Umlauf. Bei einer Genauigkeit von 0,5 Prozent vom Mittelwert müssen bis zu vier Umläufe bewertet werden.

Die Anzahl der zu bewertenden Umläufe hängt dabei stark von der Verkehrsnachfrage ab. Je höher die Verkehrsnachfrage eines Sektors ist, desto weniger Umläufe müssen bewertet werden, um ein konsistentes Ergebnis zu bekommen. Abb. 4-5 stellt den benötigten Stichprobenumfang für das zweite Beispiel für alle Lösungsindividuen dar.

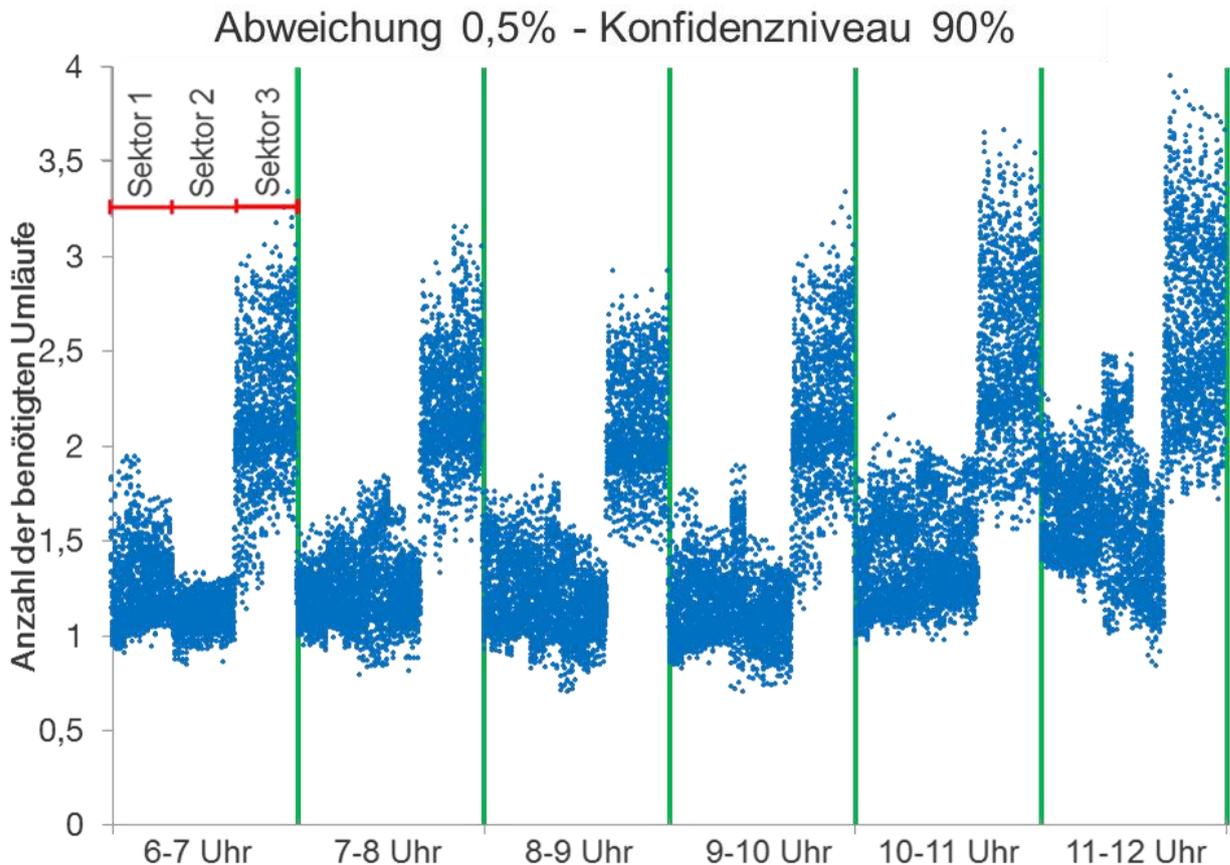


Abb. 4-5 Anzahl der zu bewertenden Umläufe bei einer maximalen Abweichung von 0,5 Prozent vom Mittelwert und einem Konfidenzniveau von 90 Prozent.

Die Konsistenz für Kenngrößen der Verkehrseffizienz fällt schlechter aus. So müssen bei einer gewünschten Genauigkeit von 0,5 Prozent vom Mittelwert für die Fahrtzeit bis zu 6 Umläufe bewertet werden. Für die Anzahl der Halte müssten bereits für eine gewünschte Genauigkeit von einem Prozent vom Mittelwert bis zu 1100 Umläufe bewertet werden. Eine Bewertung auf Grundlage der Anzahl der Halte erscheint daher mit einem stochastischen, mikroskopischen Verkehrsflussmodell nicht möglich.

4.7.2 Robustheit

Die Stetigkeit der Zielfunktion (vgl. Abb. 4-2) und die Konsistenz der Bewertung der unterschiedlichen Kombinationen (vgl. Abb. 4-5), also die Anzahl der zu bewertenden Umläufe, unterscheidet sich nach Sektor und Verkehrsnachfrage.

Die Robustheit des Verfahrens hängt damit im Wesentlichen vom zu optimierenden Netz ab. Die Verkehrsnachfrage spielt nur eine untergeordnete Rolle. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass eine schwächere Verkehrsnachfrage einen größeren Stichprobenumfang benötigt.

Allerdings kommt es bei höheren Auslastungen im Verkehrsflussmodell früher oder später zu Überlastungen, meist aufgrund von unrealistischem Fahrstreifenwechselfverhalten. Da diese

Überlastungen zufällig auftreten, führt hier eine zu große Stichprobe der bewerteten Umläufe zu einem unstetigeren Verlauf der Zielfunktion.

4.7.3 Qualität

Wird der Lösungsraum vollständig enumeriert, findet die Netzsteuerung garantiert das Optimum. Die Qualität der Steuerung ist in diesem Fall ideal. Auch für den eingesetzten zweistufigen Down-Hill-Algorithmus wurde die optimale Lösung, die mit der Enumeration bestimmt wurde, bei jeder Optimierung gefunden.

4.7.4 Effizienz

Über die Anzahl der Zeitschritte pro Simulationssekunde kann die Rechenzeit des Verkehrsflussmodells beeinflusst werden. Eine zu starke Reduzierung der Anzahl der Zeitschritte führt aber zu unrealistischem Fahrverhalten. Laut KRASCHL-HIRSCHMANN ET AL. [2011] sollten in VISSIM mindestens drei Zeitschritte pro Sekunde simuliert werden, um ein für die Emissionsberechnung realistisches Fahrverhalten zu bekommen.

Wie bereits in Abschnitt 4.7.1 erwähnt, spielt die Anzahl der bewerteten Umläufe eine entscheidende Rolle für die Rechenzeit sowohl des Verkehrsflussmodells als auch die des Verkehrswirkungsmodells. Für die Tests zur Effizienz wird mit einem Geschwindigkeitslimit von 60 km/h und einer Umlaufzeit von 90 Sekunden gerechnet. Das Beispiel stellt damit, zumindest für die Anwendung innerorts, eine Obergrenze der möglichen Anzahl an zu durchsuchenden Lösungsindividuen dar. Für vier bewertete Umläufe braucht die Optimierung im Durchschnitt etwas über eine Stunde Gesamtrechenzeit pro Verkehrsnachfrageszenario. Für einen bewerteten Umlauf beträgt die Gesamtrechenzeit pro Verkehrsnachfrageszenario circa 20 Minuten. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Effizienz kann es daher sein die Anzahl der Umläufe nicht global einzustellen, sondern in Abhängigkeit des jeweiligen Sektors.

Aufgrund der bekannten Ankunftsverteilungen an der jeweils ersten Lichtsignalanlage (vgl. Abschnitt 4.2.2) ist es denkbar, die Optimierung für die Sektoren parallel statt nach einem Optimierungsplan laufen zu lassen. Dies war im Rahmen der Arbeit aus Lizenzgründen (VISSIM, EnViVer) nicht möglich. Eine Parallelisierung bei der Berechnung für die Sektoren würde die Rechenzeit im getesteten Anwendungsfall noch einmal etwa dritteln, da dann der Sektor maßgebend wäre, der für die Optimierung die längste Rechenzeit benötigen würde. Theoretisch können sogar die Lösungen mit jeweils gleichen Progressionsgeschwindigkeiten parallel berechnet werden, wenn die Ergebnisse für einen Sektor anschließend verglichen werden. Dies würde nochmals zu einem Sechzehntel der Rechenzeit führen. Auch eine Hinzunahme weiterer Sektoren in die Optimierung würde in diesem Fall keine zusätzliche Rechenzeit bedeuten.

Bei einer parallelen Optimierung ist somit auch eine Online-Anwendung des Verfahrens denkbar. Besonders dann, wenn bei den rechenzeitintensiven Sektoren mit hoher Verkehrsnachfrage weniger Umläufe zur Bewertung herangezogen werden. Mit einer niedrigeren Höchstgeschwindigkeit und einer kleineren Umlaufzeit, als im verwendeten Beispiel, sinkt auch die Größe des Lösungsraums und damit die zur Optimierung benötigte Rechenzeit.

5. Infrastrukturseitiges Pulkmanagement

In diesem Kapitel wird das infrastrukturseitige Pulkmanagement beschrieben, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. In Abschnitt 5.1 werden die wesentlichen Entwurfsentscheidungen für das Pulkmanagement beschrieben. Die Abschnitte 5.2 und 5.3 beschreiben detailliert die am Pulkmanagement beteiligten Komponenten, die Rückstaulängenschätzung und den Fahrzeugdirigenten. Aufgrund der Verwendung von Festzeitsteuerungen auf lokaler Knotenpunktebene kann auf eine Signalzustandsprognose verzichtet werden. In Abschnitt 5.4 wird auf die Kommunikation zwischen dem infrastrukturseitigen Pulkmanagement und den Fahrzeugen eingegangen. In Abschnitt 5.5 wird schließlich die systemtechnische Umsetzung des Verfahrens beschrieben.

5.1 Konzeption des Pulkmanagements

Basierend auf der in Kapitel 2 aufgeführten Übersicht der vorhandene Systeme zur Geschwindigkeitsempfehlung werden im Folgenden Zielsetzungen und die daraus abgeleiteten Anforderungen an das entwickelte infrastrukturseitige Pulkmanagement formuliert.

5.1.1 Zielsetzungen des Pulkmanagements

Die Ziele des infrastrukturseitigen Pulkmanagement lassen sich in folgenden fünf wesentlichen Punkten zusammenfassen:

- Bisherige Systeme zur Geschwindigkeitsempfehlung sind in der Regel rein fahrzeugseitig (vgl. STEVANOVIC ET AL., 2013). Die Lichtsignalanlage dient dabei nur als Informationsgeber für Rückstaulängen und Signalzustände. Ein zweckgerichtetes Einwirken auf die Fahrzeuge, also eine echte Kooperation, zwischen dem Fahrzeug und der Lichtsignalanlage ist somit bisher nicht der Fall. Da das infrastrukturseitige Pulkmanagement die Schnittstelle zwischen diesen beiden Komponenten sein kann, muss das Ziel des Pulkmanagements daher sein, eine wirkliche Kooperation zwischen fahrzeugseitigem System und Netzsteuerung herzustellen.
- Die Kapazität des Knotenpunktes kann vom infrastrukturseitigen Pulkmanagement profitieren, wenn diese für kurze Zeitbedarfswerte der Fahrzeuge im herannahenden Pulk sorgt. Auf diese Weise kann die vorhandene Freigabezeit besser genutzt werden.
- Das Pulkmanagement soll die Grundlage für die in der Netzsteuerung angenommene Ankunftsverteilung der Fahrzeuge an der Haltelinie schaffen. Dies beinhaltet zum einen, dass die Fahrzeuge zum angenommenen Zeitpunkt an der Haltelinie ankommen, also die Beeinflussung der Progressionsgeschwindigkeit, und zum anderen in der richtigen Struktur, das heißt als dichter Pulk.

- Des Weiteren soll das Pulkmanagement Randbedingungen des Knotenpunktes berücksichtigen können, die den Verkehrsfluss an diesem beeinflussen, wie beispielsweise Mischfahrstreifen, Fußgänger- und Radfahrerströme oder Bushaltestellen.
- Sämtliche Ziele sollen auch bei einer nicht hundertprozentigen Ausstattungsrate verfolgt werden. Es ist daher nötig, dass das Pulkmanagement auch nicht ausgestattete Fahrzeuge berücksichtigen kann.

5.1.2 Anforderungen an das Pulkmanagement

Aus den Zielsetzungen lassen sich folgende Anforderungen an das entwickelte infrastrukturseitige Pulkmanagement formulieren:

- Die Aufteilung der Verantwortlichkeiten in der Annäherungsstrategie eines Fahrzeugs an die Haltelinie muss vernünftig zwischen den beteiligten Komponenten, der fahrzeugseitigen Fahrerassistenz und dem infrastrukturseitigem Pulkmanagement, aufgeteilt sein. Für die Kapazität der Lichtsignalsteuerung am Knotenpunkt ist nur die Ankunftsverteilung an der Haltelinie entscheidend. Das heißt, das Pulkmanagement versucht die Ankunftsverteilung an der Haltelinie zu optimieren, während das Fahrzeug eine geeignete Annäherungsstrategie wählt.
- Um dichte Pulks an der Haltelinie zu erzeugen wird jedem Fahrzeug eine Zeitlücke zugeteilt, an der es die Haltelinie überqueren soll. Die Umsetzung dieser Information in eine Geschwindigkeitsempfehlung erfolgt dann im fahrzeugseitigen System (vgl. Kapitel 6).
- Die Zeitlücken werden nur auf die Freigabezeit des Signalgebers des Hauptstroms verteilt. Dies geschieht für jedes Fahrzeug unabhängig von seiner geplanten Route. Auf diese Weise können zum einen auch ausgestattete Fahrzeuge anderer Verkehrsströme, die nicht zeitgleich mit dem Hauptstrom freigegeben werden (Linksabbieger haben beispielsweise häufig eine eigene Phase, die in der Regel im Nachlauf der Hauptphase geschaltet wird), zur Beeinflussung der Progressionsgeschwindigkeit des Pulks herangezogen werden. Zum anderen behindern diese Fahrzeuge den Hauptverkehrsstrom nicht, weil sie eine langsamere, an die Freigabezeit ihres Verkehrsstroms angepasste, Geschwindigkeit fahren und so den Pulk des Hauptverkehrsstroms aufhalten.
- Durch bedingt verträgliches Abbiegen oder eine Bushaltestelle in knotenpunktsnähe können zeitlich begrenzte Kapazitätseinschränkungen auftreten. Um dies zu berücksichtigen ist eine fahrstreifenfeine Anpassung der zu vergebenden Zeitlücken, also der Zeitbedarfswerte, nötig. Diese soll ereignisorientiert anpassbar sein.
- Da eine Ausstattung aller Fahrzeuge im Netz nicht schlagartig, sondern nach und nach geschehen wird (vgl. MATHEUS ET AL. [2005]; SIMTD [2011]; HILL UND GARETT [2011]),

ist es nötig, dass auch nicht ausgestattete Fahrzeuge vom Pulkmanagement erkannt und berücksichtigt werden. Dies ist selbst bei einer Ausstattungsrate von einhundert Prozent der Fall, wenn die Akzeptanz der Geschwindigkeitsempfehlung nicht vollständig ist. Im Rahmen des Pulkmanagements wird daher eine Rückstaulängenschätzung eingesetzt.

5.2 Rückstaulängenschätzer

Für die Rückstaulängenschätzung wird im Rahmen des Pulkmanagements das Verfahren aus der Dissertation von SANTA [2014] verwendet. Es handelt sich um ein lernendes Verfahren und unterteilt sich in die Schätzung der Rückstaulänge und die nachträgliche Erkennung der tatsächlichen Rückstaulänge. Da die Zeitbedarfswerte für jeden Fahrstreifen unterschiedlich sein können, und damit auch die Auflösung des Rückstaus, arbeitet das Verfahren fahrstreifenfein. Voraussetzung dafür ist, dass sowohl die stationäre als auch die fahrzeugeitige Detektion Fahrstreifen unterscheiden kann. Das Verfahren wird aktuell weiterentwickelt und ist daher noch nicht validiert, das heißt, es gibt bisher noch keine Aussage zur Güte des Verfahrens. Erfahrungen bestehen allerdings aus Vorarbeiten sowie Tests in Ingolstadt (vgl. DITTRICH UND BUSCH [2011]).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Rückstaulänge als Anzahl der Fahrzeuge definiert, die die Haltelinie nicht während der Freigabezeit erreichen können oder in den bereits bestehenden Rückstau fahren. Bei ausgestatteten Fahrzeugen berücksichtigt dies auch eine eventuell angepasste Annäherungsgeschwindigkeit an die Haltelinie, das heißt Fahrzeuge, die mit angepasster Geschwindigkeit die Haltelinie zur Freigabezeit erreichen und nicht in den Rückstau fahren, zählen damit nicht zum Rückstau dazu.

5.2.1 Rückstaulängenschätzung

Die Staulängenschätzung beruht auf einem statistischen Verfahren. Es nutzt eine Korrelationsanalyse auf Grundlage historischer Daten der stromaufwärtsliegenden Zuflüsse eines Fahrstreifens einerseits und die Rückstaulänge des Fahrstreifens andererseits. Die Anzahl der Fahrzeuge wird mittels der Bemessungsdetektoren in den Zuflüssen des stromaufwärts liegenden Knotenpunkts gemessen. Die Ermittlung der „wahren“ Rückstaulängenschätzung wird in Abschnitt 5.2.2 beschrieben.

Es werden im Rückstau nur Fahrzeuge erfasst, die nicht zur Freigabezeit an der Haltelinie ankommen. In Kombination mit dem Zeitlückenzuweiser (vgl. Abschnitt 5.3) und der damit verbundenen Geschwindigkeitsanpassungen im Fahrzeug werden diese Fahrzeuge, wenn sie während der Freigabezeit ankommen, auch nicht mehr in der Rückstaulängenschätzung berücksichtigt. Fahrzeuge aus den Nebenrichtungen, die durch eine angepasste Progressionsgeschwindigkeit wie die Fahrzeuge der Hauptrichtung während der Freigabezeit ankommen, können daher im Zeitlückenzuweiser auch als Pulk berücksichtigt werden.

Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens findet sich in SANTA [2014].

5.2.2 Rückstaulängenermittlung

Um die tatsächliche Rückstaulänge als Eingangsgröße für das in Abschnitt 5.2.1 beschriebene Verfahren zu bestimmen, wird diese im Nachhinein (posteriori) bestimmt. Der Ansatz dazu wird von DITTRICH UND BUSCH [2011] beschrieben und wird in SANTA [2014] weiterentwickelt. Er kombiniert die drei folgenden Verfahren (vgl. Abschnitt 2.3.2):

- Verfahren nach PRIEMER UND FRIEDRICH [2008]
- Roteinzählen
- Dynamische Zeitreihenanalyse der Detektordaten beim Abfließen (vgl. LUI ET AL.[2009])

Sobald sich ein ausgestattetes Fahrzeug im Rückstau befindet, wird nach dem Verfahren von PRIEMER UND FRIEDRICH [2008] eine Prognose (a priori) der maximalen Rückstaulänge ermittelt. Dieser Schätzwert wird im Nachhinein (posteriori) durch die anderen beiden genannten Verfahren korrigiert.

5.3 Zeitlückenzuweiser

Der Zeitlückenzuweiser verteilt die mit der Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation ausgestatteten Fahrzeuge einmalig auf die Freigabezeit der Signalgruppen des Hauptstroms, indem er ihnen eine Zeitlücke und einen korrespondierenden Fahrstreifen zuteilt. Er berücksichtigt dazu die Rückstaulänge vor der Haltelinie sowie die geschätzte Position des Fahrzeugs im Pulk. Dies geschieht für jedes ausgestattete Fahrzeug, das sich in der Zufahrt auf die stromaufwärtsliegende Haltelinie befindet, unabhängig von seiner Route. Zur Zufahrt zählt die Strecke bis zur nächsten stromaufwärts liegenden Haltelinie. Auf diese Weise können beispielsweise auch Linksabbieger, die in einer anderen Phase als der Hauptstrom abgewickelt werden sollten (vgl. FGSV, [2010a]), zur Beeinflussung nicht ausgestatteter Fahrzeuge herangezogen werden. Eine Geschwindigkeitsempfehlung für Signalgruppen, die nicht der Hauptphase angehören, kann dagegen auch negative Effekte haben (vgl. [OTTO, 2011] und [FRIEDRICH ET AL., 2012]), da die Fahrzeuge dieser Signalgruppen den Hauptstrom behindern können.

Die Rückstaulänge beinhaltet die Anzahl der Fahrzeuge, die die Haltelinie nicht während der Freigabezeit erreichen können oder in den bereits bestehenden Rückstau fahren, selbst wenn sie ihre Geschwindigkeit anpassen würden. Die Schätzung der Rückstaulänge wurde im vorherigen Abschnitt beschrieben.

Der zweite Anteil zur Berechnung der zuzuteilenden Zeitlücke ist die Position des ausgestatteten Fahrzeugs im heran nahenden Pulk. Diese wird über die Zeitdifferenz zwischen Freiga-

bezeitbeginn und dem Zeitpunkt, zu dem das ausgestattete Fahrzeug die stromaufwärtsliegende Haltelinie passiert, berechnet. Über die Zeitbedarfswerte kann eine Fahrzeuganzahl rückgerechnet werden.

Für die Zuweisung der Zeitlücke wird geprüft, ob das ausgestattete Fahrzeug die aktuelle oder die nächste Freigabezeit erreichen kann. Die beiden oben erwähnten Anteile werden zu einer Gesamtfahrzeuganzahl addiert. Über die Zeitbedarfswerte wird die bereits für diese Fahrzeuge benötigte Freigabezeit ermittelt und damit ein virtueller Freigabezeitbeginn für dieses Fahrzeug berechnet. Dem ausgestatteten Fahrzeug wird schließlich dieser Zeitpunkt zugewiesen. Die bereits zugewiesenen Zeitlücken werden für die nachfolgenden ausgestatteten Fahrzeuge berücksichtigt.

Abb. 5-1 stellt das grundlegende Prinzip der Zeitlückenzuweisung für einen Richtungsfahrstreifen mit den beiden erwähnten Anteilen dar. Es wird dabei versucht möglichst jeder Zeitlücke ein Fahrzeug zuzuteilen.

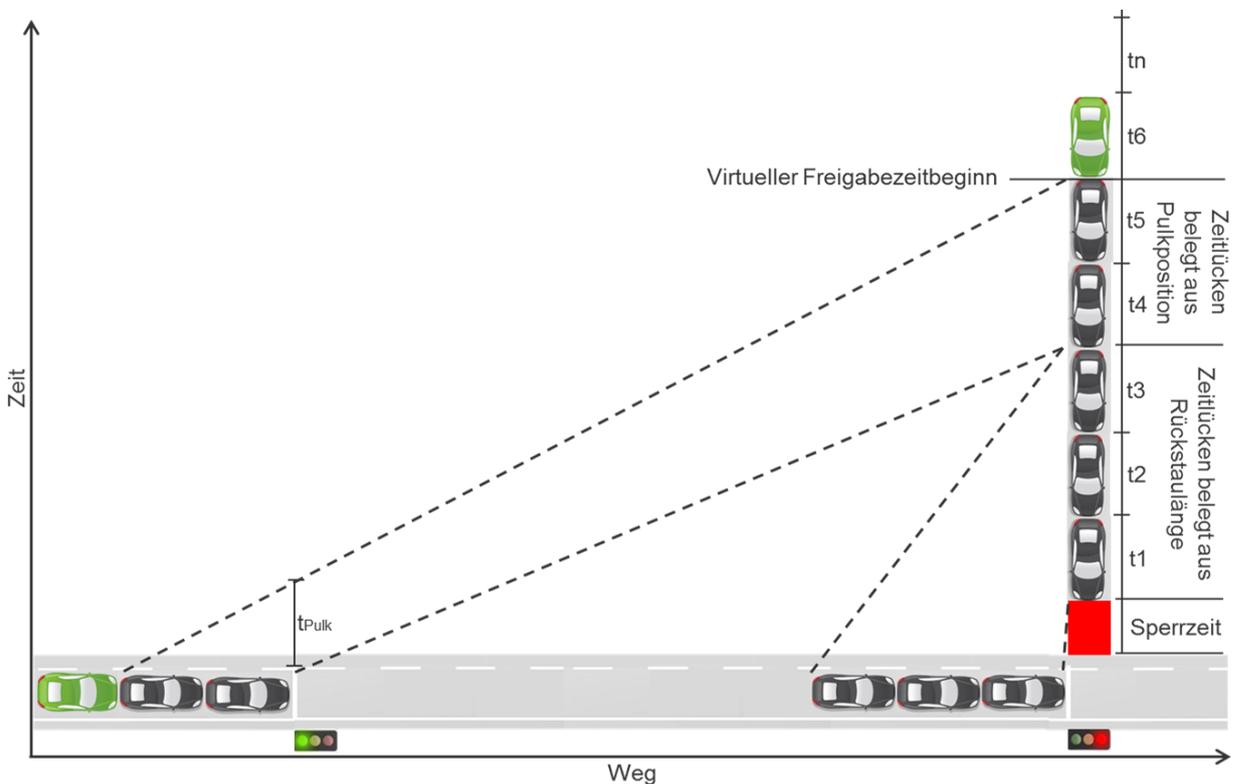


Abb. 5-1 Konzept der Zeitlückenzuweisung für ausgestattete Fahrzeuge (grün).

Die benötigten Zeitbedarfswerte können fahrstreifenfein hinterlegt werden. Sie beruhen in dieser Arbeit auf den Erhebungen von Wenzel [2012], die mittels Videodatenanalyse für den Knotenpunkt Frankfurter Ring/Knorrstraße in München erhoben wurden. Theoretisch können die Zeitbedarfswerte auch ereignisorientiert, zum Beispiel bei der Anmeldung eines Busses an der Lichtsignalanlage, der an einer nahe dem Knotenpunkt gelegenen Haltestelle ohne Bucht hält und so einen Fahrstreifen für eine gewisse Zeit belegt, oder zeitplanabhängig, zum Beispiel

für unterschiedlich starke Fußgängerströme beim bedingt verträglichen Abbiegen, versorgt werden. Dies ist aber nicht Teil der aktuellen Implementierung.

Falls mehrere Fahrstreifen für den Hauptstrom zur Verfügung stehen, empfiehlt der Zeitlückenzuweiser zur Zeitlücke auch einen korrespondierenden Fahrstreifen. Dazu wird der virtuelle Freigabezeitbeginn der zur Verfügung stehenden Fahrstreifen miteinander verglichen und dem ausgestatteten Fahrzeug der Fahrstreifen mit dem früheren virtuellen Freigabezeitbeginn empfohlen. Da Fahrstreifenwechsel aus Gründen der Verkehrssicherheit nicht zu häufig empfohlen werden sollen, wird ein Fahrstreifenwechsel nur dann empfohlen, wenn der Beginn der virtuellen Freigabezeit für das ausgestattete Fahrzeug auf dem empfohlenen Fahrstreifen um mehr als vier Sekunden früher beginnt als auf seinem aktuellen. Voraussetzung für die Fahrstreifenzuweisung ist, dass dem ausgestatteten Fahrzeug sein eigener Fahrstreifen über GPS-Ortung, Kartendaten und fahrzeugeigene Sensorik bekannt ist.

Die Umwandlung der übermittelten Zeitlücke in eine Geschwindigkeitsempfehlung für den Fahrer geschieht schließlich im Fahrzeug über dessen eigene Position und die in der im Fahrzeug hinterlegten Karte und wird in Kapitel 6. beschrieben.

5.4 Kommunikation

Für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur wird eine lokale Kommunikation verwendet. Dies geschieht mittels Wireless Local Area Network (WLAN) basierend auf dem IEEE Standard 802.11p. Es werden die folgenden drei Nachrichtenformate verwendet:

- Cooperative Awareness Message (CAM)
- Speed and Lane Advice Data Message (SLAM)
- Intersection Topology Message (ITM)

Die Kommunikation wird vom sogenannten Fahrerdialogmanager übernommen [ECOMOVE, 2011b][ECOMOVE, 2012a].

5.4.1 CAM

Die Cooperative Awareness Message [ETSI, 2013] wird vom Fahrzeug sekundlich gesendet. Sie enthält folgende vom Pulkmanagement genutzten Informationen:

- Fahrzeug ID (Intelligent Transport System – Station ID (IST-S ID))
- Zeit
- Referenz Position (X-Y Koordinaten) des Mittelpunktes der Fahrzeugvorderkante
- Fahrstreifen ID

Über die Referenz Position wird mittels Kartenabgleich (Mapmatching) die Strecken ID des ausgestatteten Fahrzeugs ermittelt und auf diese Weise festgestellt, ob es sich auf einer Zufahrt des Pulkmanagers befindet. Über die ausgesendete CAM wird das Fahrzeug registriert und meldet sich so beim infrastrukturseitigen Pulkmanagement an.

5.4.2 SLAM

Nach Berechnung der Zeitlücke erhält das Fahrzeug eine Speed and Lane Advice Message [eCoMove, 2012e]. In der internationalen Standardisierung wird die Nachricht unter dem Sammelbegriff Signal Phase and Timing (SPaT) [SAE, 2014] geführt. Die SLAM enthält folgende Informationen:

- RSU ID (Intelligent Transport System – Station ID (IST-S ID))
- Fahrzeug ID des adressierten Fahrzeugs
- Zeit
- Knotenpunkt ID
- Stecken ID
- Fahrstreifen ID
- Zeitlücke als Zeitversatz zur aktuellen Zeit

5.4.3 ITM

Um die SLAM interpretieren zu können benötigt das Fahrzeug die sogenannte Intersection Topology Message [eCoMove, 2012e]. Diese wird sekundlich von der Road Side Unit des Knotenpunkts ausgesendet. In der internationalen Standardisierung wird die Nachricht unter dem Begriff Geometric Intersection Description (GID) [SAE, 2014] geführt. Da sich die Geometrie des Knotenpunktes nicht verändert, ist die Nachricht nicht dynamisch. Die ITM enthält folgende Informationen:

- RSU ID (Intelligent Transport System – Station ID (ITS-S ID))
- Knotenpunkt ID
- Referenz Position (X-Y Koordinaten), Knotenmittelpunkt
- Zufahrtsobjekte mit:
 - Referenzposition
 - Zufahrt ID

- Fahrstreifen mit:
 - Fahrstreifen ID
 - Verbindungen zu anderen Fahrstreifen

5.5 Systemtechnische Umsetzung

Der Aufbau der Systemarchitektur und die Umsetzung der Komponenten des infrastrukturseitigen Pulkmanagements erfolgten in JAVA durch SANTA [2014] und wurden von FULLERTON [2013] für die Bewertung lauffähig gemacht und angepasst.

Da der Pulkmanager Daten von mehreren LSA-Steuergeräten benötigt, kann er entweder in der Road Side Unit implementiert werden oder in einer Verkehrsmanagement Zentrale. Bei einer dezentralen Implementierung in den Road Side Units müssen die Daten der LSA-Detektoren mit denen benachbarter Knotenpunkte ausgetauscht werden. Bei einer Implementierung in der Verkehrsmanagementzentrale müssen die Daten dorthin übertragen werden. Im Gegenzug muss die SLAM von der Zentrale an den Knotenpunkt gesendet werden. Durch die in Deutschland vorhandene Planungsphilosophie besteht in der Regel immer eine Anbindung der lokalen Steuergeräte an die Verkehrszentrale. Ein Austausch von Daten benachbarter Knotenpunkte ist dagegen seltener. Die Art der Umsetzung hängt allerdings wesentlich mit den Latenzzeiten der Datenübermittlung zusammen. Für eine nicht sicherheitsrelevante Anwendung, wie sie das infrastrukturseitige Pulkmanagement ist, sind höhere Latenzzeiten akzeptabel. Innerorts beträgt die maximale Geschwindigkeitsdifferenz zwischen erlaubter Geschwindigkeit (60 km/h) und empfohlener Geschwindigkeit (minimal 70 Prozent der maximalen erlaubten Geschwindigkeit, also 40 km/h (siehe Abschnitt 6.1)) höchstens 20 km/h. Pro Sekunde Latenzzeit, die die Nachricht das Fahrzeug später erreicht, bedeutet dies, dass das Fahrzeug in dieser Zeit circa fünf Meter zurücklegen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit ist das Pulkmanagement, wie auch der Rückstaulängenschätzer in Ingolstadt [DITTRICH UND BUSCH, 2011], daher funktional als zentralseitige Applikation implementiert. Ein Vorteil einer zentralseitigen Implementierung ist, dass die SLAM auch von den stromabwärtsliegenden RSU gesendet werden können. Auf diese Weise bekommen die Fahrzeuge die Information bereits am stromaufwärts liegenden Knotenpunkt und damit unabhängig von der Sendereichweite.

In Abb. 5-2 ist die Systemarchitektur mit sämtlichen Komponenten und den wesentlichen Datenflüssen dargestellt. Für die Versorgung des Pulkmanagements werden fünf Dateien verwendet.

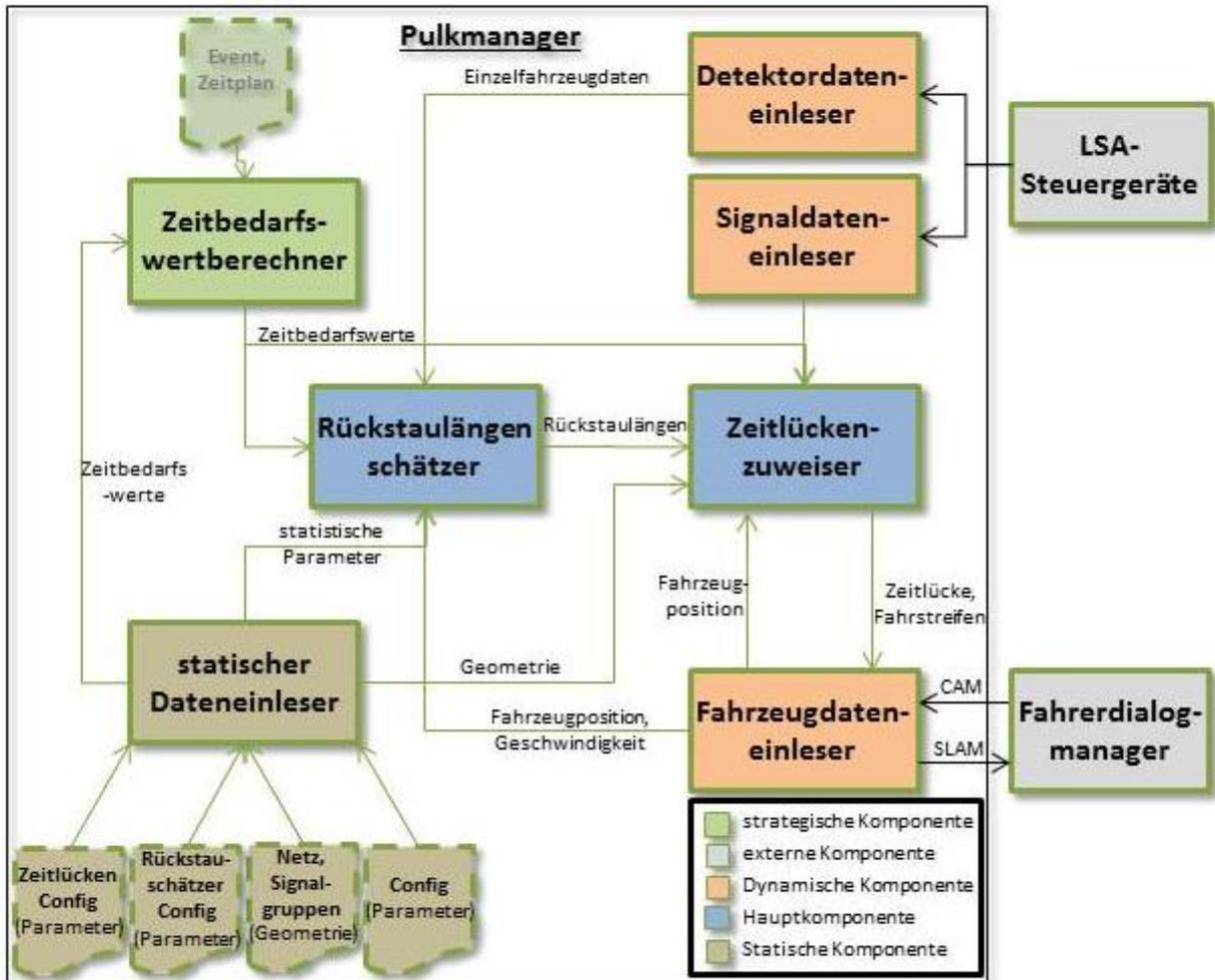


Abb. 5-2 Systemarchitektur des Pulkmanagements (in Anlehnung an ECoMOVE [2012g])

Die allgemeine Konfigurationsdatei (Configuration.java) enthält die Pfade zur Netzdatei (LaneConfigData.xml) und zur Signalgruppdatei (SignalsApproachID.txt), sowie Informationen zur Umlaufzeit und zum Geschwindigkeitslimit.

Über die Konfigurationsdatei des Zeitlückenzuweisers (AAConfiguration.java) können Zeitreihen für die Zeitbedarfs-werte hinterlegt werden und der zeitliche Unterschied der virtuellen Freigabezeit-beginne festgelegt werden, ab dem ein Fahrstreifenwechsel empfohlen wird.

In der Konfigurationsdatei der Rückstaulängenschätzung (QEConfiguration.java) werden sämtliche statistischen Parameter für die Rückstaulängenschätzung versorgt. Außerdem können hier auch die Parameter der drei verwendeten Verfahren zur posteriori Rückstaulängenermittlung eingestellt werden.

6. Fahrzeugseitige längsdynamische Fahrerassistenzsysteme und deren Modellierung

Im folgenden Kapitel werden die Systeme zur fahrzeugseitigen Längsbeeinflussung beschrieben. Da eine Integration des fahrzeugseitigen Systems und im Besonderen das Verhalten des Fahrers in das in den vorherigen Kapiteln beschriebene System nicht möglich ist, werden diese über das in VISSIM verwendete psycho-physische Fahrzeugmodell nach WIEDEMANN [1974][1991] modelliert. Dazu wird auch auf die Kalibrierung des Modells eingegangen. In Abschnitt 6.1 wird dazu auf die fahrzeugseitige Umsetzungen der Geschwindigkeitsempfehlungen im Rahmen des eCoMove Projektes eingegangen. Abschnitt 6.2 beschreibt das Fahrzeugfolgemodell und analysiert die zu kalibrierenden Parameter, um sowohl eine qualitative Emissionsbewertung zu ermöglichen als auch das Fahrverhalten mit Fahrerassistenz abzubilden. Eine Kalibrierung ist nötig, da die Standardparameter zum einen für eine Emissionsbewertung ungeeignet sind und zum anderen auch das durch Fahrerassistenzsysteme beeinflusste Fahrverhalten nicht abbilden können. In Abschnitt 6.3 wird die Festlegung der Messszenarien zur Ermittlung dieser Parameter beschrieben. In Abschnitt 6.4 erfolgt die Beschreibung der Datenerhebung mittels der Fahrsimulatorstudien und realen Messungen. Dazu werden auch die unterschiedlichen Fahrsimulatorstudien beschrieben, aus denen die jeweiligen Daten zur Kalibrierung des Fahrer-Fahrzeugs-Modell erhoben wurden. In Abschnitt 6.5 erfolgt schließlich die Auswertung der Messdaten und die Kalibrierung des Fahrzeugfolgemodells.

Die Ergebnisse der Fahrerverhaltensmodellierung fließen, neben dem System zur Optimierung der Koordinierung der Lichtsignalanlagen, auch in die Kalibrierung der zur Bewertung genutzten mikroskopischen Verkehrsflusssimulation ein.

6.1 Längsdynamisches Fahrerassistenzsystem

Im Folgenden wird das grundsätzliche Konzept der Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung des Fahrers während der Fahrt aus dem Projekt eCoMove vorgestellt. Das fahrzeugseitige System besteht dazu aus drei wesentlichen Komponenten. Im ersten Schritt prognostiziert das sogenannte ecoSituational Model (eSiM) mittels unterschiedlicher Datenquellen ein zukünftiges Geschwindigkeitsprofil des eigenen und der in der näheren Umgebung des eigenen Fahrzeugs erkannten Fahrzeuge. Aufbauend auf diesen Informationen wird im ecoDriving Support eine konkrete Empfehlung berechnet, die schließlich über das Human Maschine Interface (HMI) an den Fahrer übermittelt wird [vgl. THEMANN ET AL., 2012].

6.1.1 ecoSituational Model

Das ecoSituational Model nutzt dabei vier wesentliche Quellen, um für alle Fahrzeuge auf der Route des eigenen Fahrzeugs zukünftige Geschwindigkeitsprofile zu schätzen. Zum einen werden Daten aus dem Fahrzeug selbst verwendet, um Geschwindigkeit, Beschleunigung, Motor Kenngrößen, die Pedalposition oder den aktuellen Kraftstoffverbrauch über den CAN-

bus (Controlled Area Network) zu bestimmen. Auch wird die aktuelle Position auf einer digitalen Karte bestimmt. Eine zweite Quelle sind Umgebungssensoren, die Fahrzeuge in der Umgebung erfassen und die zum eigenen Fahrzeug relativen Geschwindigkeiten bestimmen. Als weitere Quelle werden persönliche Präferenzen des Fahrers berücksichtigt, also zum Beispiel eine sportliche oder konservative Fahrweise. Als letzte Quelle schließlich dient die Kommunikation. Zum einen können von einer Verkehrsmanagementzentrale stammende Daten zur mittleren Geschwindigkeit und zur Verkehrsdichte auf den Streckenelementen der Routen verarbeitet werden, zum anderen, und für die Verbindung zum Pulkmanagement entscheidend, Informationen zu den Lichtsignalanlagen, also Signalzustände und Rückstaulängen. [THEMANN UND ECKSTEIN, 2013]

Als Modellgrundlage dient PELOPS (**P**rogram for the **D**Evelopment of **L**ongitudinal Traffic **P**rocesses in **S**ystem Relevant Environment) [FORSCHUNGSGESELLSCHAFT KRAFTFAHRWESEN, 2012]. Es setzt sich aus 3 Modellen zusammen. Das Umgebungsmodell enthält Informationen zur näheren Umgebung des Egofahrzeuges (z.B. Fahrstreifenanzahl oder Lichtsignalanlagen). Das Fahrzeugmodell bildet das Fahrzeug mit seinen Bauteilen wie Motor oder Getriebe nach. Dies beinhaltet auch die fahrzeugseitige Sensorik. Das Fahrermodell beruht, wie auch VISSIM auf dem psycho-physischen Modell nach WIEDEMANN [1974][1991] (siehe 6.2.1). Mittels des oben erwähnten Dateninputs werden Eingangsdaten für eine PELOPS Simulation erzeugt. Ergebnis dieser Simulation sind Geschwindigkeitsprofile für das eigene und der in der Umgebung erkannten Fahrzeuge sowie sogenannte Situationsklassen, die Gründe für ein bestimmtes Verhalten geben (zum Beispiel infrastrukturseitige Geschwindigkeitsempfehlung). [vgl. THEMANN UND ECKSTEIN, 2013]

6.1.2 ecoDriving Support

Der ecoDriving Support nutzt die vom ecoSituational Modell zur Verfügung gestellte Geschwindigkeitsprofile sowie die dazugehörigen Situationsklasse und vergleicht sie mit energieeffizienten Referenzstrategien wie zum Beispiel Ausrollen oder Auskuppeln. Diese Referenzstrategien sind fahrzeugspezifisch. Hieraus wird ein optimales Geschwindigkeitsprofil abgeleitet. Um die aus dem Geschwindigkeitsprofil resultierenden optimalen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu erreichen, werden darauf aufbauend auch die optimale Position des Gaspedals und des Bremspedals und bei einem Schaltgetriebe auch der optimale Gang berechnet. [vgl. THEMANN ET AL., 2012]

6.1.3 ecoHMI

Mittels des Human Machine Interface (HMI) werden dem Fahrer die Informationen zum Erreichen des energieeffizienten Geschwindigkeitsprofils übermittelt. Es wird dabei nicht die Zielgeschwindigkeit selbst übermittelt, sondern nur wie der Fahrer möglichst energieeffizient beschleunigen oder verzögern kann. Diese Information wird dem Fahrer über die Kombination visueller, akustischer und haptischer Reize mitgeteilt. Visuelle Informationen werden über das

Armaturenbrett, die Anzeige des Boardcomputers, als Headupdisplay oder über externe Bildschirme, wie Tabletcomputer oder Smartphone, angezeigt. Zur Steigerung der Befolgungsrate wird neben der Information, welcher Eingriff in den Fahrtablauf erfolgen soll, auch immer ein Grund angegeben, weshalb dieser erfolgen soll. Dieser orientiert sich an den oben erwähnten Situationsklassen. Sie werden in der Regel mit einem akustischen Signal verbunden. Für haptische Informationen wird ein Force-Feedbackpedal verwendet, das einen Gegendruck aufbaut, um dem Fahrer die ideale Pedalposition zu übermitteln. Die Kombination der unterschiedlichen Reize unterscheidet sich für die unterschiedlichen Fahrzeugimplementierungen. [vgl. BROCKMANN UND LÖWENAU, 2012]



Abb. 6-1 HMI Outputs [BROCKMANN UND LÖWENAU, 2012]

Die visuellen Elemente des HMI alleine haben die höchste Akzeptanz beim Fahrer. Haptische Elemente alleine sind weder erwünscht noch führen sie zu verbessertem Fahrverhalten, vor allem hinsichtlich der Reaktionszeiten auf die Hinweise des Systems. Eine Kombination aus visueller und haptischer Information zeigt noch einmal zusätzliche Verbesserungen. [vgl. STAUBACH ET AL., 2012]

6.2 Fahrerhaltensmodellierung für das Fahren mit Fahrerassistenz und zur Emissionsberechnung

Da eine Integration des fahrzeugseitigen Systems und im Besonderen das Verhalten des Fahrers in das System nicht möglich ist, wird diese über das in VISSIM verwendete psycho-physische Fahrzeugmodell nach WIEDEMANN [1974][1991] abgebildet. Voraussetzung für das Optimierungsziel des in Kapitel 4. Netzsteuerung beschriebenen Optimierungsverfahrens, die Minimierung der CO₂ Emissionen, sind möglichst realitätsnahe Eingangsdaten für das Wirkungsmodell. Dazu ist auch die Verwendung eines möglichst realitätsnahen Verkehrsflussmodells nötig. Eine Kalibrierung auf Grundlage makroskopischer Kenngrößen ist dabei nicht ausreichend, da auch komplett verschiedene Fahrzeugtrajektorien zu ähnlichen Fahrtzeiten, Rückstaulängen oder Kapazitäten führen können. Aus diesem Grund müssen die für die Emissionsberechnung entscheidenden Parameter des verwendeten Verkehrsflussmodells, sowohl für unbeeinflusste Fahrer als auch für von den verwendeten Fahrerassistenzsystemen beeinflusste Fahrer, kalibriert werden.

6.2.1 Das psycho-physische Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann

Das Wiedemann-Modell verwendet Fahrer-Fahrzeug-Einheiten als fundamentale Einheiten. Diese Einheiten haben stochastisch zugeteilte Eigenschaften. Dies sind Fahrzeugeigenschaften (z.B. Fahrzeuglänge, Gewicht, Farbe, Beschleunigungspotential und Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs usw.) aber auch Fahrereigenschaften (z.B. gewünschte Reisegeschwindigkeit und gewünschte Beschleunigung, bevorzugter Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug, Schwellen für einen Fahrstreifenwechsel). In der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation sind zwei Modelle von Wiedemann aus den Jahren 1974 und 1999 implementiert. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen aufgrund der versorgbaren Parameter.

Für die Kalibrierung sollte im Voraus festgelegt werden, welche Parameter angepasst werden sollen und welche Parameter weiterhin den Standardeinstellungen entsprechen sollen, da sie (etwa aus bisherigen Erfahrungen heraus) für die durchgeführte Untersuchung valide sind. [FHWA, 2004]

Entscheidend für eine realitätsnahe Berechnung der Emissionen ist die Längsbewegung der Fahrer-Fahrzeug-Einheit. Die Fahrer-Fahrzeug-Einheit befindet sich dabei immer in einem der vier folgenden Fahrzustände:

- Freies Fahren: Es gibt keinen Einfluss eines vorausfahrenden Fahrzeugs. Der Fahrer versucht seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen und dann beizubehalten.
- Annäherung: Der Fahrer passt seine Geschwindigkeit einem vorausfahrenden langsameren Fahrzeug an. Er verzögert so, dass die Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug Null ist, wenn er seinen gewünschten Sicherheitsabstand erreicht.

- Folgen: Der Fahrer folgt einem vorausfahrenden Fahrzeug. Da das Gaspedal nicht perfekt beherrscht werden kann und sich eine Geschwindigkeitsdifferenz ergibt, die um Null oszilliert, schwankt auch der Abstand in geringem Maße.
- Bremsen: Der Fahrer verzögert, falls der Abstand zum Vorderfahrzeug unter den gewünschten Sicherheitsabstand fällt. [WIEDEMANN, 1991]

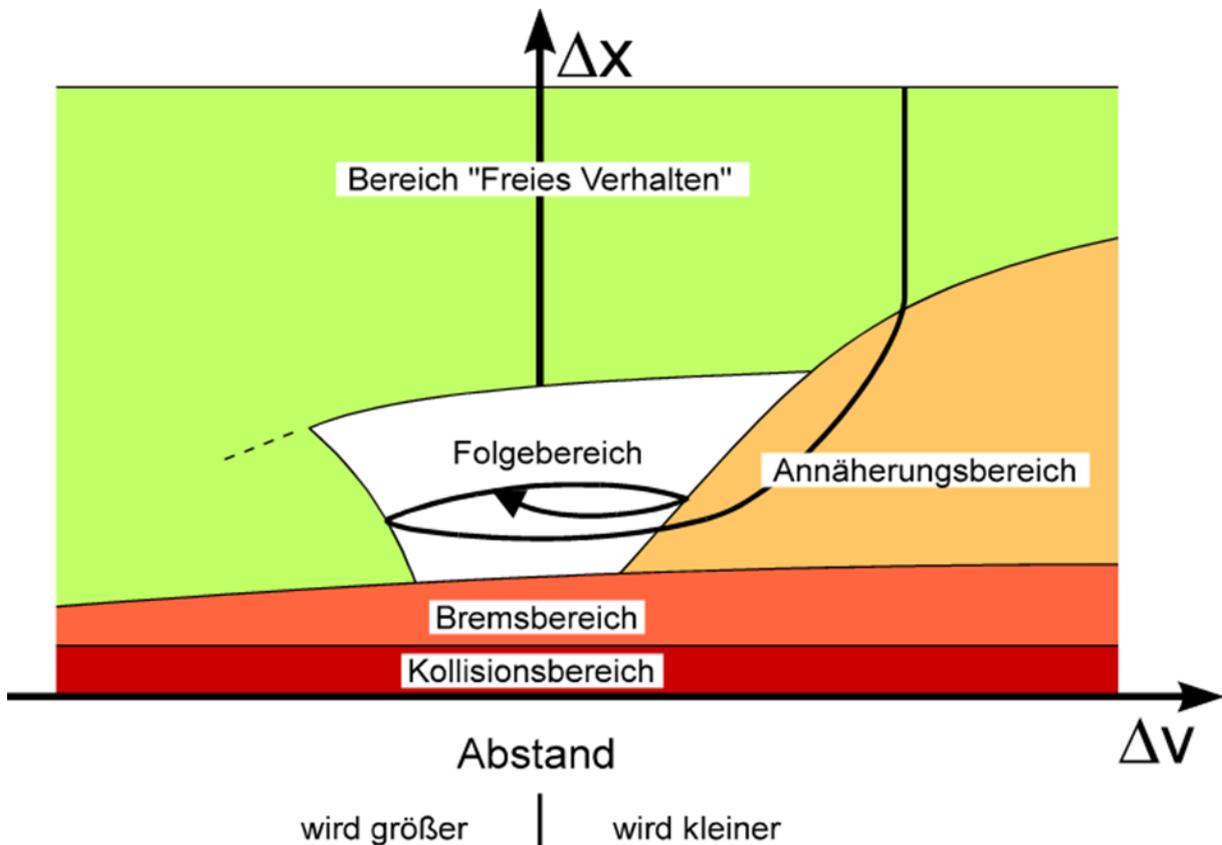


Abb. 6-2 Darstellung der Fahrzustände in Abhängigkeit von Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz [PTV, 2012a] (nach WIEDEMANN [1974])

Die wesentlichen Eingangsparameter für das beschriebene Fahrzeugfolgemodell sind die Wunschgeschwindigkeitsverteilung, die Beschleunigungs- und Verzögerungsfunktion in Abhängigkeit der Geschwindigkeit sowie die Parameter des gewünschten Sicherheitsabstands in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Letzterer Parameter hat weniger einen Einfluss auf die Fahrzeugtrajektorien und damit auf den Kraftstoffverbrauch und den Emissionsausstoß als auf die Kapazität.

Die Wunschgeschwindigkeit ist dabei als Summenlinie hinterlegt. Die Beschleunigungs- und Verzögerungsfunktion werden in Abhängigkeit der Geschwindigkeit beschrieben. Sie sind in maximale und Wunsch Funktion aufgeteilt. Die Maximalfunktionen stellen dabei die Grenze des technisch Machbaren dar und kommen etwa bei Spurwechseln oder Steigungen zum Einsatz, wenn die Werte der Wunschfunktionen nicht ausreichen. Sie bestehen aus je drei Verläufen, dem Mittelwert, sowie dem minimalen und dem maximalen Wert.

Der Zufallswert der Beschleunigungs- und Verzögerungsfunktion ist dabei normalverteilt mit einem Mittelwert von 0.5 und einer Standardabweichung (SD) von 0.15. Er begrenzt sich auf einen Bereich zwischen 0 und 1. Hiermit ist der Abstand zwischen dem Mittelwert und dem minimalen beziehungsweise maximalen Wert auf das 3,333-fache der Standardabweichung begrenzt. [PTV, 2012a]

„Daraus ergibt sich folgendes:

- *Etwa 70% der Fahrzeuge befinden sich im inneren Drittel (-1 SD bis +1 SD) des Zufallswerts und*
- *95% befinden sich im Bereich der inneren zwei Drittel (-2 SD bis + 2 SD).“ [PTV, 2012a]*

Gemäß Handbuch [PTV, 2012a] wird das Wiedemann 74 Modell für innerorts Simulationen empfohlen und daher auch im Rahmen dieser Arbeit kalibriert und angewendet.

Der gewünschte Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug im verwendeten Modell ist abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit. Er definiert sich wie folgt:

$$d = a_x + (b_{xadd} + b_{xmult} * z) * \sqrt{v} \quad (\text{Formel 6-1})$$

mit:

- d gewünschter Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug [m]
- a_x mittlerer Stillstandabstand (normalverteilt, Standardabweichung 0.3 m) [m]
- b_{xadd} additiver Einfluss Sicherheitsabstand [$\sqrt{\text{m*s}}$]
- b_{xmult} multiplikativer Einfluss Sicherheitsabstand [$\sqrt{\text{m*s}}$]
- z Wert aus Intervall [0,1], normalverteilt um 0.5 mit Standardabweichung 0.15
- v Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]

6.3 Messkonzept

Normalerweise stehen für die Kalibrierung einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation Daten wie Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten oder Staulängen etc. zur Verfügung. Diese liegen allerdings nur in aggregierter Form vor und resultieren damit aus einer Vielzahl von Verhalten von Einzelfahrzeugen. Des Weiteren können auch komplett unterschiedliches Fahrverhalten und damit unterschiedliche Fahrzeugtrajektorien zu gleichen Fahrtzeiten und Rückstaus führen.

Laut den Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation [FGSV, 2006] stehen reale Vergleichsdaten zu den Modellen der Simulation meist nicht zur Verfügung. Vorhandene Standardparametersätze sollten in jedem Fall auf ihre Brauchbarkeit hin überprüft werden. [FGSV, 2006]

Ziel des Messkonzeptes ist daher eine direkte Messung der Eingangsparameter, besonders jener, die durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen zum Pulkmanagement beeinflusst werden. Dies sind Wunschgeschwindigkeit, Wunschbeschleunigung und Wunschverzögerung. Zusätzlich wird auch der gewünschte Sicherheitsabstand kalibriert, da sich die Sättigungsverkehrsstärke durch die kalibrierten Verteilungen und Funktionen ändert.

Für die drei Fahrsimulatorstudien wurden zu diesem Zweck zehn Szenarien definiert. Eine der wichtigsten Randbedingung aller Szenarien ist, dass die tatsächliche Wunschgeschwindigkeit, Wunschbeschleunigung und Wunschverzögerung erfasst wird, da diese direkte Eingangsparameter in das Fahrermodell sind. Interaktionen mit anderen Fahrzeugen werden bereits durch das Fahrermodell abgebildet und dürfen daher nicht bereits in den Eingangsdaten vorhanden sein, um diese nicht zu verfälschen. Zum einen heißt das, dass in den Szenarien jeweils kein Vorderfahrzeug vorhanden ist und der Fahrer nur vom Assistenzsystem, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Signalgebern der Lichtsignalanlage beeinflusst wird. Zum anderen werden für die Erfassung der Wunschbeschleunigung und Wunschverzögerung nur die tatsächlichen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge betrachtet. Andernfalls würden auch Beschleunigungen und Verzögerungen, die durch die unvollkommene Beherrschung des Gaspedals entstehen, in die Auswertung eingehen.

Die tatsächlich umgesetzten Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Verzögerungen, die auch aus der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern erfolgen, werden schließlich vom Modell selbst umgesetzt. Es wird zudem davon ausgegangen, dass das Modell und die übrigen Parameter auch mit Assistenzsystem gültig bleiben. Die einzelnen Szenarien wurden in unterschiedlicher Kombination in die drei Fahrsimulatorstudien integriert.

Es wurden folgende Szenarien definiert:

- Szenario 1: Geschwindigkeitslimit 60 km/h, Geschwindigkeitsempfehlung 60 km/h
- Szenario 2: Geschwindigkeitslimit 60 km/h, Geschwindigkeitsempfehlung 50 km/h
- Szenario 3: Geschwindigkeitslimit 60 km/h, Geschwindigkeitsempfehlung 40 km/h
- Szenario 4: Geschwindigkeitslimit 50 km/h, Geschwindigkeitsempfehlung 50 km/h
- Szenario 5: Geschwindigkeitslimit 50 km/h, Geschwindigkeitsempfehlung 40 km/h
- Szenario 6: Geschwindigkeitslimit 50 km/h, Geschwindigkeitsempfehlung 35 km/h
- Szenario 7: Ankunft bei Rot, mit Assistenz
- Szenario 8: Geschwindigkeitslimit 60 km/h, ohne Assistenz
- Szenario 9: Geschwindigkeitslimit 50 km/h, ohne Assistenz
- Szenario 10: Ankunft bei Rot, ohne Assistenz

Abbildung Abb. 6-3 zeigt exemplarisch ein Drehbuch für die Zufahrt auf eine Lichtsignalanlage mit Geschwindigkeitsempfehlung. Im grünen Bereich wird der Fahrer durch das Assistenzsystem unterstützt.

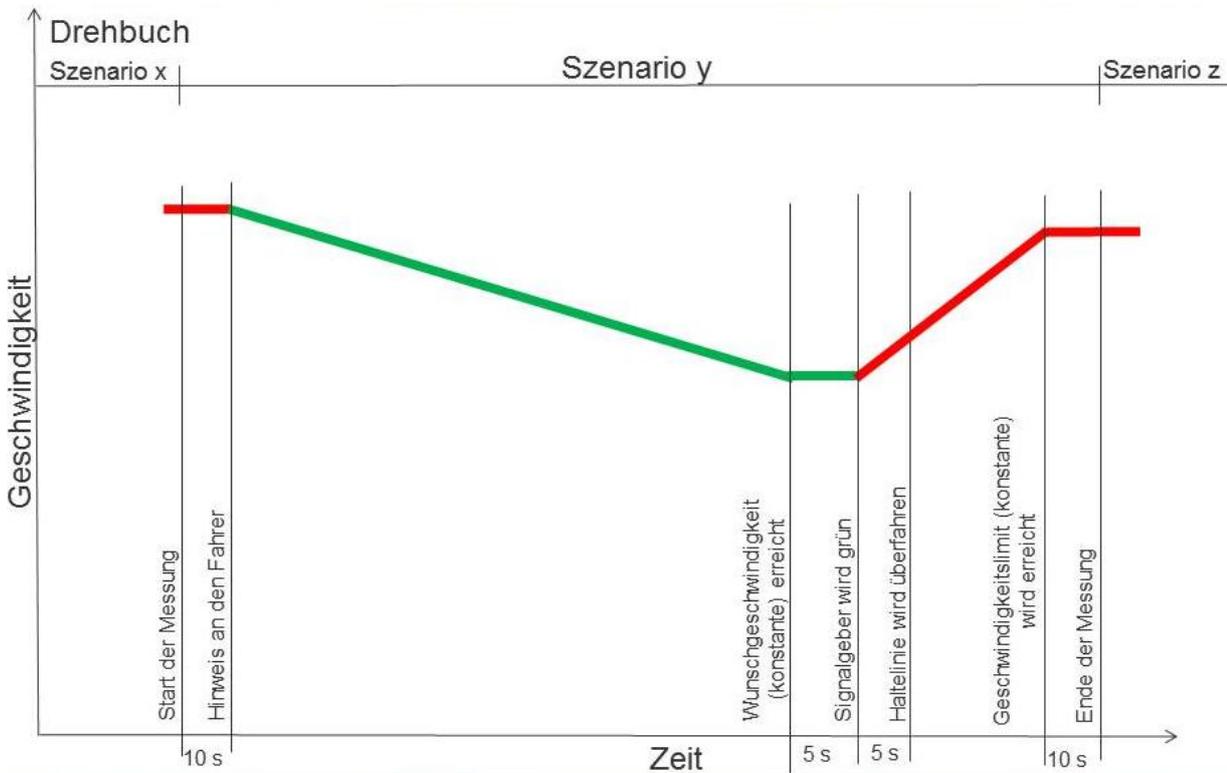


Abb. 6-3 Szenario Drehbuch für die Zufahrt auf eine Lichtsignalanlage mit Geschwindigkeitsempfehlung

Für die Kalibrierung der Wunschgeschwindigkeiten werden die Szenarien mit Geschwindigkeitsempfehlung verwendet. Es wird dazu die konstante Geschwindigkeit nach Erhalt der Fahrerinformation herangezogen. Das Szenario „Ankunft bei Rot“ dient zur Kalibrierung der Wunschbeschleunigungs- und Wunschverzögerungsfunktion. Eingangsdaten sind hier die sekundlichen Beschleunigungs-/Geschwindigkeitspaare. Für die Szenarien ohne Assistenzsystem wurden die Szenarien analog auf das reale Testfeld München übertragen.

6.4 Datenerhebung

Für die Kalibrierung des Fahrer-Fahrzeugmodells wurden Daten aus drei unterschiedlichen Fahrsimulatorstudien verwendet. Jede dieser Studien wurde an einem eigenen Fahrsimulator durchgeführt. Zudem unterscheiden sich auch die Implementierungen der Geschwindigkeitsempfehlungen an den Fahrer in den einzelnen Studien. Im Folgenden wird daher sowohl näher auf die Fahrsimulatoren als auch auf die Implementierungen eingegangen.

Zusätzlich stehen auch Messungen der Kenngrößen aus dem realen Testfeld zur Verfügung. Auch diese werden im Folgenden näher beschrieben.

In Tabelle Tab. 6-1 sind die durchgeführten Szenarien je Studie dargestellt. Da die zur Kalibrierung des Fahrermodells in VISSIM definierten Szenarien zusätzlich zu den für die Validierung der Fahrzeugsysteme benötigten Szenarien durchgeführt wurden, konnten je Simulator und Implementierung nur einige Szenarien umgesetzt werden. Es standen nur Daten aus PKW-Fahrsimulatoren zur Verfügung.

Szenario \ Fahrimulator\Implementierung	Szenario									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DLR/FORD				X	X	X	X		X	X
TUM/BMW		X					X	X	X	X
TECNALIA/FIAT		X	X	X	X			X	X	
Messungen Petuelring/Lerchenauerstraße										X

Tab. 6-1 Übersicht über die durchgeführten Szenarien je Studie

6.4.1 Messungen im realen Testfeld

Für die Erhebung realer Daten im Testfeld München wurde der Olympiaturm gewählt. Von der 185 Meter hohen Aussichtsplattform kann der Knotenpunkt Petuelring/Lerchenauerstraße überblickt werden. Die Erhebungen wurden von Beltran [2012] durchgeführt. Die Messungen wurden auf den Rampen zum Petuelring durchgeführt (siehe Abb. 6-4).

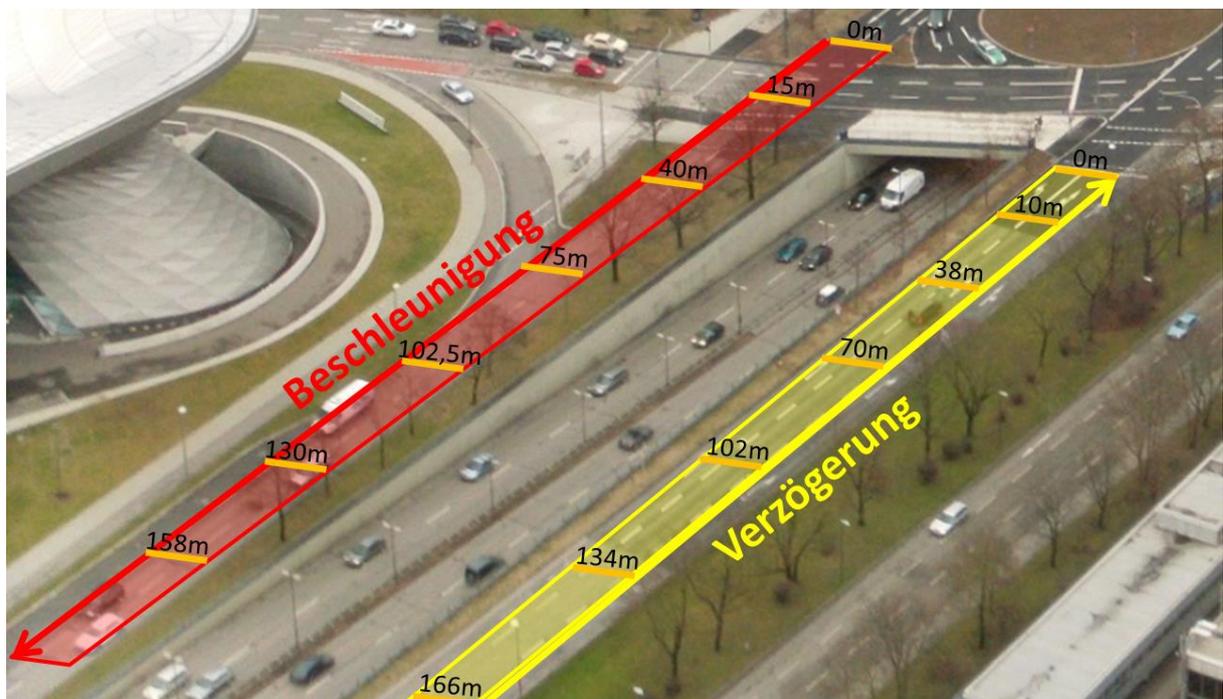


Abb. 6-4 Blick vom Olympiaturm auf die Rampen. (in Anlehnung an BELTRÁN [2012])

Die Datenerfassung wurde mittels Videoanalyse in der Nebenverkehrszeit durchgeführt. Dazu wurden je Richtung je 6 virtuelle Abschnitte definiert, für die manuell die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge erfasst wurden. Für zwei aufeinander folgende Abschnitte kann so auch eine Beschleunigung beziehungsweise Verzögerung ermittelt werden.

Für die Datenerhebung der Beschleunigung wurden insgesamt 500 Trajektorien und für die der Verzögerung 300 Trajektorien aufgezeichnet. Um nur Wunschbeschleunigungen zu erfassen, wurde jeweils nur das erste Fahrzeug an der Haltelinie (das heißt ohne Vorderfahrzeug) erfasst. Dies erfüllt auch die in Kapitel 6.3 definierten Forderungen. Aufgrund der geringen Stichprobenmenge für LKW wurden nur Trajektorien von PKW ausgewertet. [vgl. BELTRAN, 2012]

6.4.2 Fahrsimulatorstudien

Die drei Fahrsimulatorstudien unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Art des Fahrsimulators.

Während am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München (TUM) [LFE, 2013] und bei TECNALIA [LARBURU ET AL., 2012] ein statischer Fahrsimulator für die Studie eingesetzt wurde, wurde am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) [DLR, 2013] ein dynamischer Fahrsimulator eingesetzt. Die verwendeten Ergebnisdaten der Simulatorstudien waren Geschwindigkeit, Beschleunigung, Entfernung zur Haltelinie sowie Zeitpunkte der Anzeigen im HMI und LSA-Schaltzeiten mit einer Auflösung von einem Hertz. An den einzelnen Simulationsstudien nahmen jeweils ca. 30 Personen teil, wobei einzelne Szenarien mehrfach durchfahren wurden.



Abb. 6-5 Fahrsimulatoren (von links nach rechts: statischer Fahrsimulator der Technischen Universität München [LFE, 2013], dynamischer Fahrsimulator des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt [DLR, 2013], statischer Fahrsimulator TECNALIA [LARBURU ET AL., 2012])

6.5 Kalibrierung des Fahrerverhaltens

Durch das Aufkommen von Produkten zur Emissionsberechnung (vgl. Abschnitt 2.1.4 Verkehrswirkungsmodelle) ist eine Bewertung auf Grundlage neuer Kenngrößen wie Emissionen möglich. Dadurch ist auch die Kalibrierung mikroskopischer Verkehrsflussmodelle auf Basis von mikroskopischen Parametern wie Fahrzeugtrajektorien, anstatt wie bisher üblich auf Basis

von makroskopischen Kenngrößen wie Fahrtzeiten, Verlustzeiten, Rückstaulängen oder Kapazitäten, in den Fokus gerückt.

6.5.1 Bisherige mikroskopische Kalibrierungen des Wiedemann Modells

Die Standardparameter in VISSIM [PTV, 2012a] setzen sich aus verschiedenen Quellen zusammen. Die Eingangswerte für die Wunschbeschleunigungsfunktion für Pkw stammen aus Test-Fahrzeugdaten, die im Rahmen des Forschungsprojekts ROTRANoMo [2004] erhoben wurden. Die Wunschfunktionen für Beschleunigung und Verzögerung wurden aus Daten des Forschungsprojekts CHAUFFEUR 2 [1999] angepasst. Die Modellparameter des Fahrzeugfolgmodells entsprechen den Originalparametern von WIEDEMANN [1974].

LI ET. AL. [2009] kalibriert auf Grundlage der Messungen von VITI ET. AL. [2008] die Wunschgeschwindigkeitsverteilung, Wunschbeschleunigungs- und Wunschverzögerungsfunktion sowie Parameter für des Wiedemann 99 Modell. Datengrundlage waren mittels Bildverarbeitung aufgezeichnete Trajektorien von Pkw in Rotterdam. Eine weitere Kalibrierung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung, Wunschbeschleunigungsfunktion und der Wiedemann 99 Parameter auf Grundlage derselben Daten wird in LI ET. AL. [2013] gezeigt. Es wird hier die Annahme getroffen, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten nur ein gewisser Anteil seine Wunschbeschleunigung umsetzen kann, welche mit zunehmender Geschwindigkeit steigt. Daher wird in Abhängigkeit der Geschwindigkeit ein Perzentil festgelegt, um den Anteil der Beschleunigungen, die kleiner als die Wunschbeschleunigungen sind, auszufiltern. Des Weiteren werden auch die höchsten fünf Prozent als Ausreißer aussortiert. Ein Vergleich realer Daten und der kalibrierten Simulation zeigt gute Übereinstimmungen sowohl hinsichtlich der Geschwindigkeiten in Abhängigkeit zum Abstand der Haltelinie als auch hinsichtlich der in VISSIM realisierten Kapazitäten.

MALLIG ET AL. [2012] kalibriert ebenfalls auf Grundlage der Daten von VITI ET AL. [2008] die Wunschbeschleunigungsverteilung, allerdings ohne die Parameter des Wiedemann Modells anzupassen. Dafür wird die aus den Daten abgeleitete Beschleunigungsfunktion abschließend angepasst, um die Sättigungsverkehrsstärke zu erreichen.

HIRSCHMANN UND FELLENDORF [2010] kalibrieren die durchschnittliche Wunschgeschwindigkeitsfunktion anhand von GPS Daten von Pkw aus einem Straßennetz mit 12 Knotenpunkten in Graz. Eine Kalibrierung der Wiedemann Parameter wird nicht erwähnt. Es wird gezeigt, dass eine Übereinstimmung der Beschleunigungs-/ Geschwindigkeitswerte zwischen simulierten und realen Daten vorliegt.

In KRASCHL-HIRSCHMANN [2013] wird auf Grundlage dieser Daten eine Unterscheidung der Beschleunigungs- und Verzögerungsfunktionen zwischen fünf verschiedenen Streckentypen vorgenommen (städtische Autobahn (80 - 100 km/h), mehrstreifiger Streckenzug inkl. LSA (bis 60 km/h), Verteilerstraße inkl. LSA (bis 50 km/h), städtische Nebenstraßen (bis 40 km/h), Wohnstraße). „Die Bildung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Werte pro Ge-

schwindigkeitssegment wurden mit den 50-80-99-Prozent-Quantilwerten für die positive Beschleunigung und die 1-2-5-Prozent-Quantilwerten für die Verzögerung durchgeführt.“ KRASCHL-HIRSCHMANN [2013]. Des Weiteren werden auch die Wiedemann 74 Parameter angepasst.

Wie in Abb. 6-6 zu sehen ist, liegen die mittleren Wunschgeschwindigkeitsfunktionen aller Kalibrierungen unter der in VISSIM verwendeten Standardfunktion. Obwohl die Funktionen teils auf Grundlage derselben Daten durchgeführt wurden, unterscheiden sie sich allerdings eindeutig voneinander.

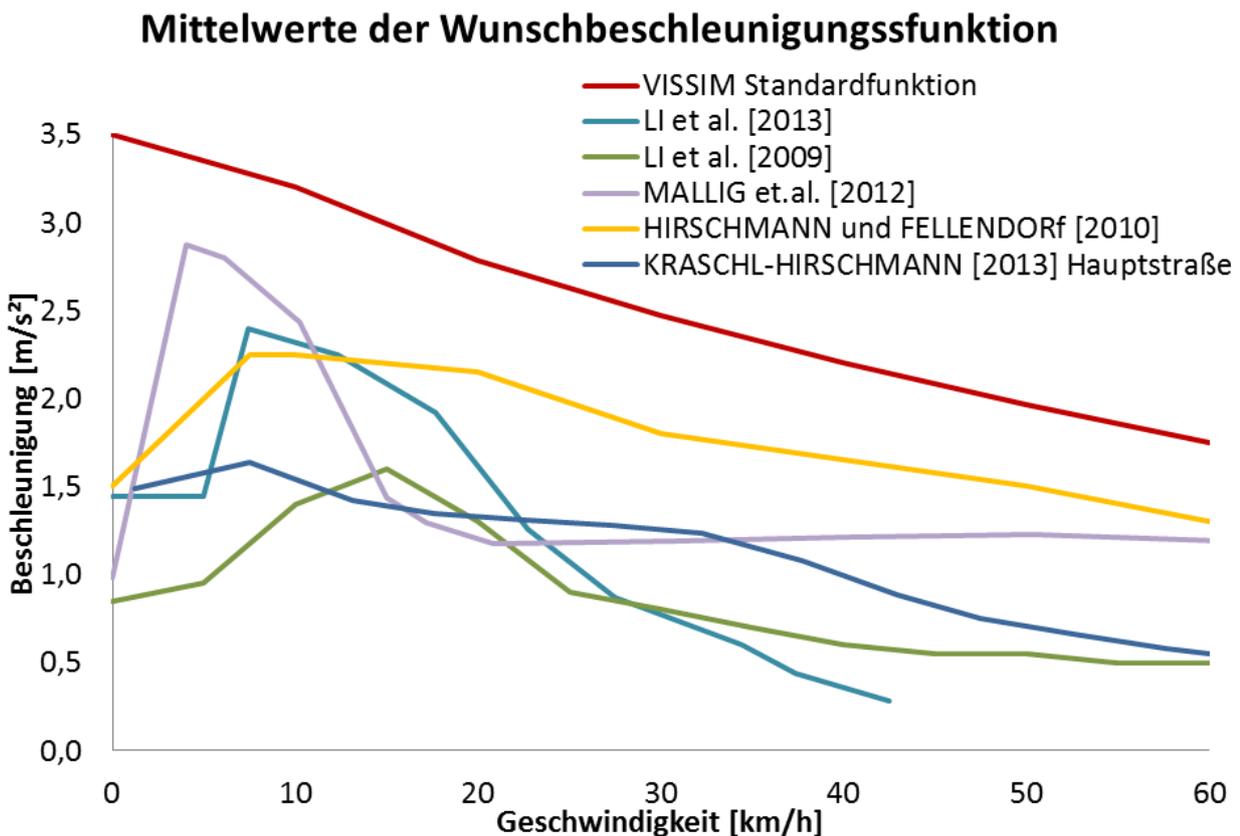


Abb. 6-6 Mittlere Wunschbeschleunigungsfunktion für Pkw verschiedener Kalibrierungen.

Auch für die Wunschverzögerungsfunktion gilt, dass die aus den Kalibrierungen ermittelten Funktionen deutlich über denen der VISSIM Standardfunktion liegen (siehe Abb. 6-7).

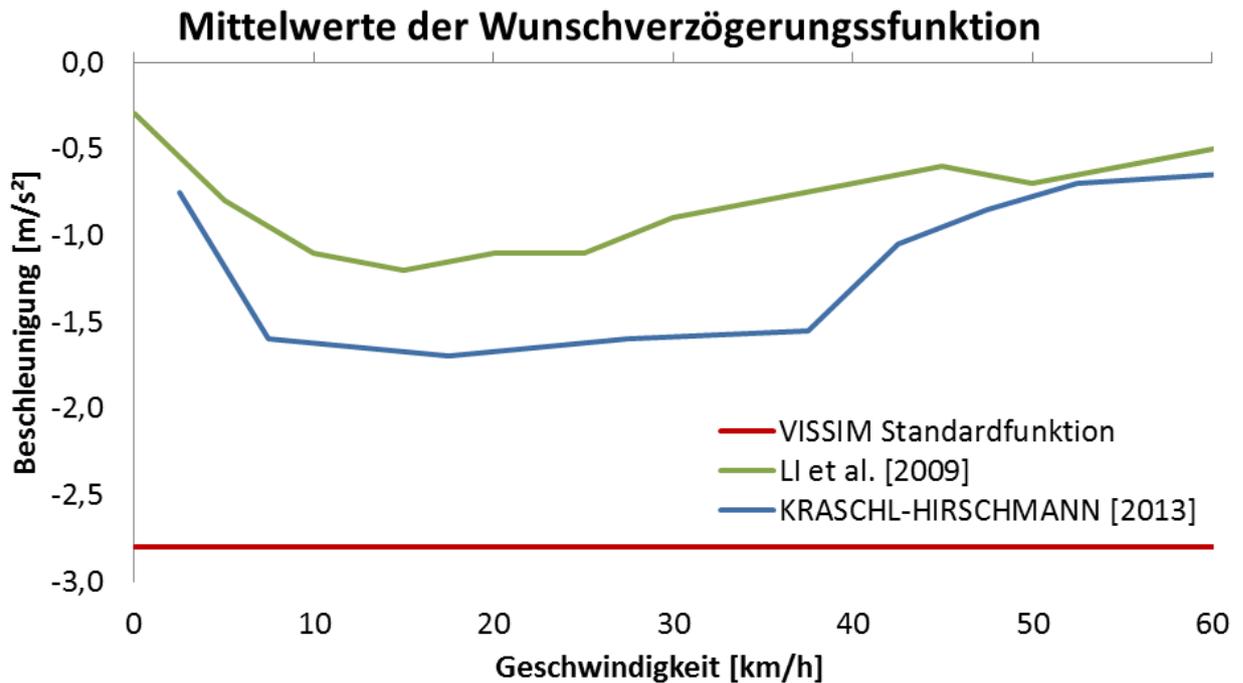


Abb. 6-7 Mittlere Wunschverzögerungsfunktion für PKW verschiedener Kalibrierungen.

6.5.2 Kalibrierung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung

Die Verteilung der Wunschgeschwindigkeit ist in der Regel stark von Randbedingungen wie etwa Straßenbreite oder Gefälle abhängig. Eine Erfassung kann beispielsweise über strategische Detektoren in der Schwachlastzeit erfolgen, da hier in der Regel eine Umsetzung der Wunschgeschwindigkeit möglich ist.

BELTRAN [2012] zeigt für den in Kapitel 6.4.1 *Messungen im realen Testfeld* vorgestellten Streckenabschnitt, dass die Wunschgeschwindigkeiten hier wesentlich über dem erlaubten Geschwindigkeitslimit liegen. Aufgrund des autobahnähnlichen Ausbaus der Strecke ist die ermittelte Verteilung allerdings nicht als repräsentativ anzusehen. Aus diesem Grund, und da im realen Testfeld nur Daten für das Szenario ohne Fahrerassistenzsystem vorhanden sind, und somit eine Vergleichbarkeit der Verteilungen mit und ohne System nicht möglich ist, erfolgt die Kalibrierung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung ausschließlich auf Grundlage der Daten aus den Fahrsimulatorstudien.

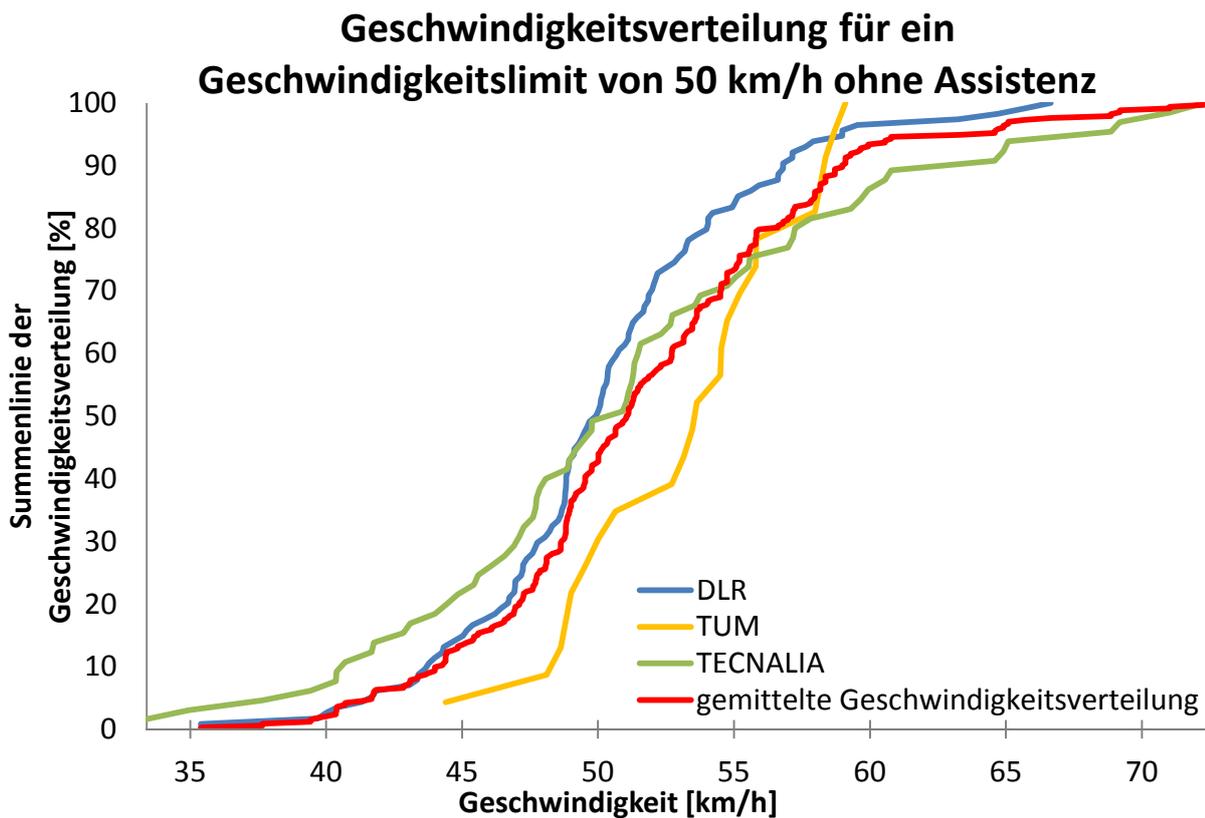


Abb. 6-8 Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 50 km/h ohne Fahrerbeeinflussung für unterschiedliche Fahrsimulatoren.

Da die Stichprobenmenge für die Fahrsimulatorstudien unterschiedlich ist, wird für die Verteilung ein gewichtetes Mittel gewählt, damit die unterschiedlichen Implementierungen gleich berücksichtigt werden. Weitere Grafiken finden sich in Anhang A.

Analog zu dem in Abb. 6-8 dargestellten Ergebnis wird auch für die übrigen Szenarien eine gewichtete Geschwindigkeitsverteilung ermittelt. Für die nicht erhobenen Zwischenstufen der Geschwindigkeitsempfehlung wird eine lineare Interpolation angesetzt. Auffällig ist, dass die mittlere Geschwindigkeit ohne Fahrerbeeinflussung immer leicht über der erlaubten Geschwindigkeit liegt, wogegen die mittlere Geschwindigkeit mit Geschwindigkeitsempfehlungen jeweils unter der Empfehlung liegt. Wie in Abb. 6-9 zu sehen, sind die Varianzen der Geschwindigkeiten mit Geschwindigkeitsempfehlung deutlich geringer.

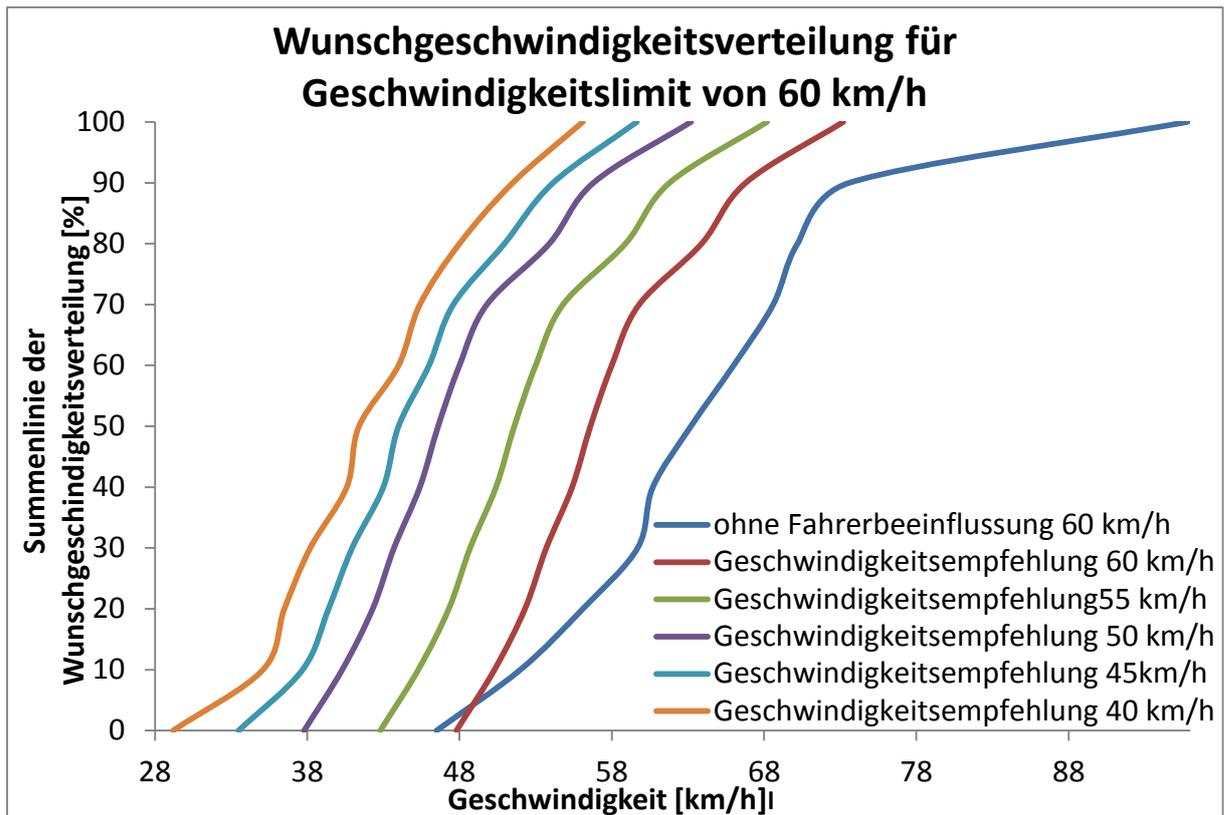


Abb. 6-9 Summenlinie der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen bei einem Geschwindigkeitslimit von 60 km/h aus den Fahrsimulatorstudien.

6.5.3 Kalibrierung der Wunschbeschleunigungsfunktion

Da das untersuchte Fahrerassistenzsystem dem Fahrer keine direkte Zielgeschwindigkeit übermittelt, sondern diese Beeinflussung über das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten geschieht, werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Wunschbeschleunigungsfunktionen kalibriert - eine Funktion für Fahrer ohne Assistenzsystem und eine für Fahrer mit Assistenzsystem.

Zur Ermittlung der Funktionen werden im ersten Schritt Beschleunigungs-/Geschwindigkeitspaare mit Beschleunigungswerten unter $0,1 \text{ m/s}^2$ ausgefiltert. Dies geschieht, da angenommen wird, dass es sich hierbei nicht um gewollte Beschleunigungen, sondern um Schwankungen aufgrund der nicht perfekten Beherrschung des Gaspedals handelt, wie sie im Fahrzustand „Folgen“ des Modells von WIEDEMANN [1974] abgebildet werden. Anschließend werden die Daten in 5 km/h -Intervallen aggregiert. Dies geschieht für die maximale, mittlere und minimale Wunschbeschleunigungsfunktion.

In Abb. 6-10 sind die mittleren Beschleunigungsfunktionen aus den unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Quellen dargestellt. Die Werte aus dem TUM Fahrsimulator liegen dabei über denen der realen Messungen und des DLR Fahrsimulators und damit auch über denen

ähnlicher Untersuchungen (siehe Abschnitt 6.5.1). Als Grund wird angenommen, dass die Beschleunigungen im statischen Fahrsimulator nicht fühlbar sind und es daher zu unrealistischen Werten kommt. Für die Kalibrierung der Funktionen werden die Daten aus dem Fahrsimulator der Technischen Universität München daher nicht verwendet.

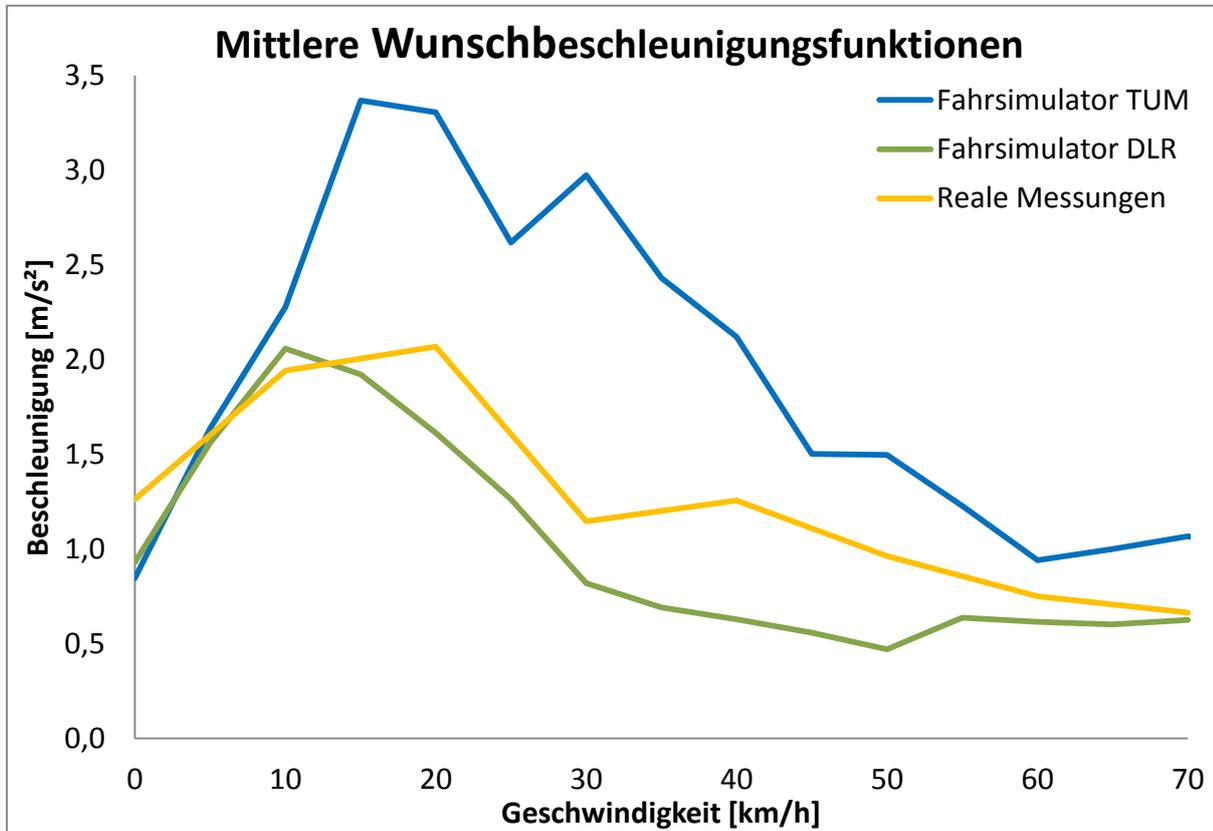


Abb. 6-10 Mittlere Wunschbeschleunigungsfunktionen aus den unterschiedlichen Quellen

Um Ausreißer auszufiltern wird, sowohl für die Daten der realen Messungen als auch die Daten aus dem Fahrsimulator, für die minimale beziehungsweise maximale Beschleunigungsfunktion das P10 Perzentil beziehungsweise das P90 Perzentil verwendet. Ein Unterschied zwischen den Funktionen mit und ohne Fahrerassistenz wurde nur gemacht, wenn eine signifikante Abweichung gefunden werden konnte (Konfidenzniveau 90 Prozent). In Abb. 6-11 sind die Wunschbeschleunigungsfunktionen für Fahrer mit und ohne Fahrerassistenzsystem, für reale und simulierte Daten gemittelt, dargestellt. Alle drei Funktionen liegen für den Fall mit Assistenzsystem unterhalb derer ohne Assistenzsystem.

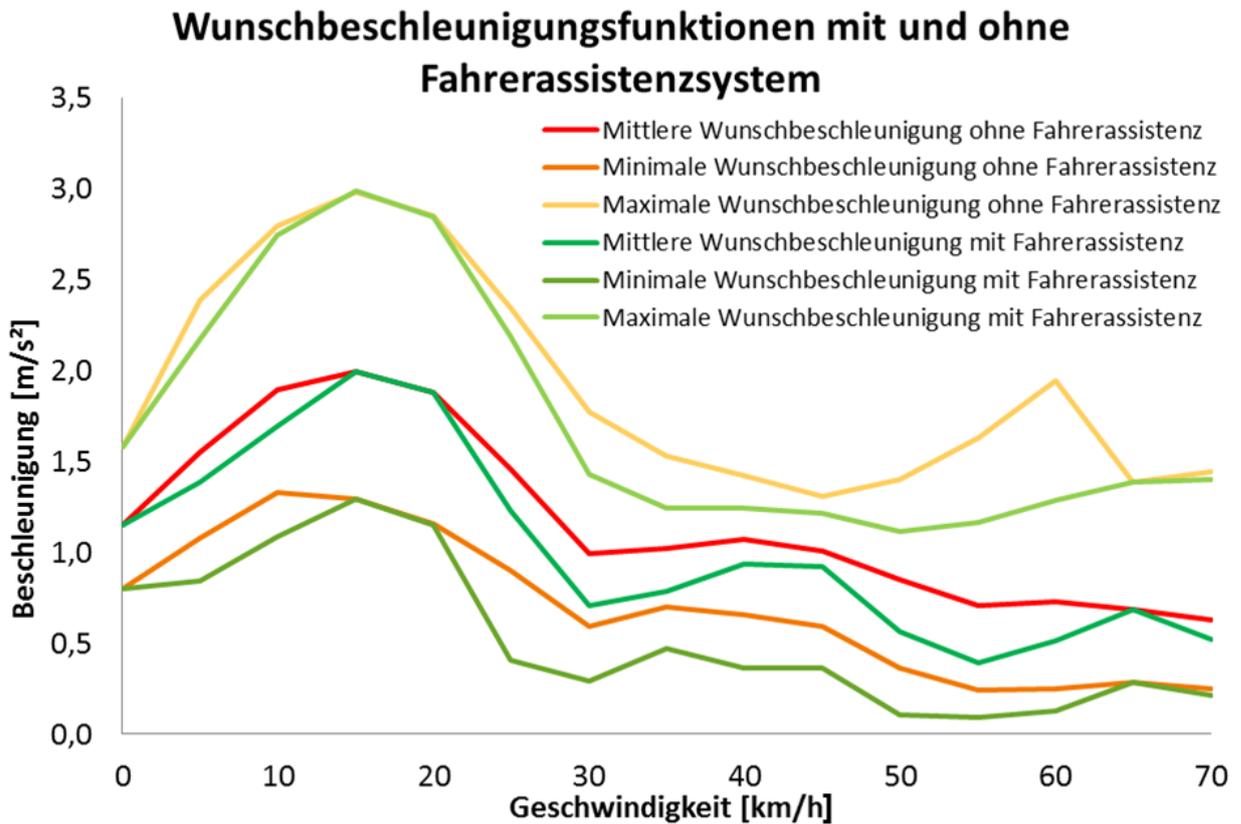


Abb. 6-11 Wunschbeschleunigungsfunktionen für Fahrer mit und ohne Fahrerassistenz

6.5.4 Kalibrierung der Wunschverzögerungsfunktion

Die Kalibrierung der Wunschverzögerungsfunktionen erfolgt analog zum Vorgehen in 6.5.3 *Kalibrierung der Wunschbeschleunigungsfunktion*. Das heißt, Werte größer als $-0,1 \text{ m/s}^2$ werden ausgefiltert und die minimale beziehungsweise maximale Wunschverzögerungsfunktion bildet das P10 Perzentil beziehungsweise das P90 Perzentil. Die Unterteilung erfolgt ebenfalls in 5km/h-Intervallen. Auch bei den Wunschverzögerungsfunktionen wird zwischen den Funktionen mit und ohne Fahrerassistenz nur unterschieden, wenn der Unterschied signifikant ist (Konfidenzniveau 90 Prozent). In Abb. 2-1 sind die Wunschverzögerungsfunktionen für Fahrer mit und ohne Fahrerassistenzsystem, für reale und simulierte Daten gemittelt, dargestellt. Wie bei den Wunschbeschleunigungsfunktionen liegen auch die Wunschverzögerungsfunktionen mit Assistenzsystem unter denen ohne Assistenzsystem.

Wunschverzögerungsfunktionen mit und ohne Assistenzsystem

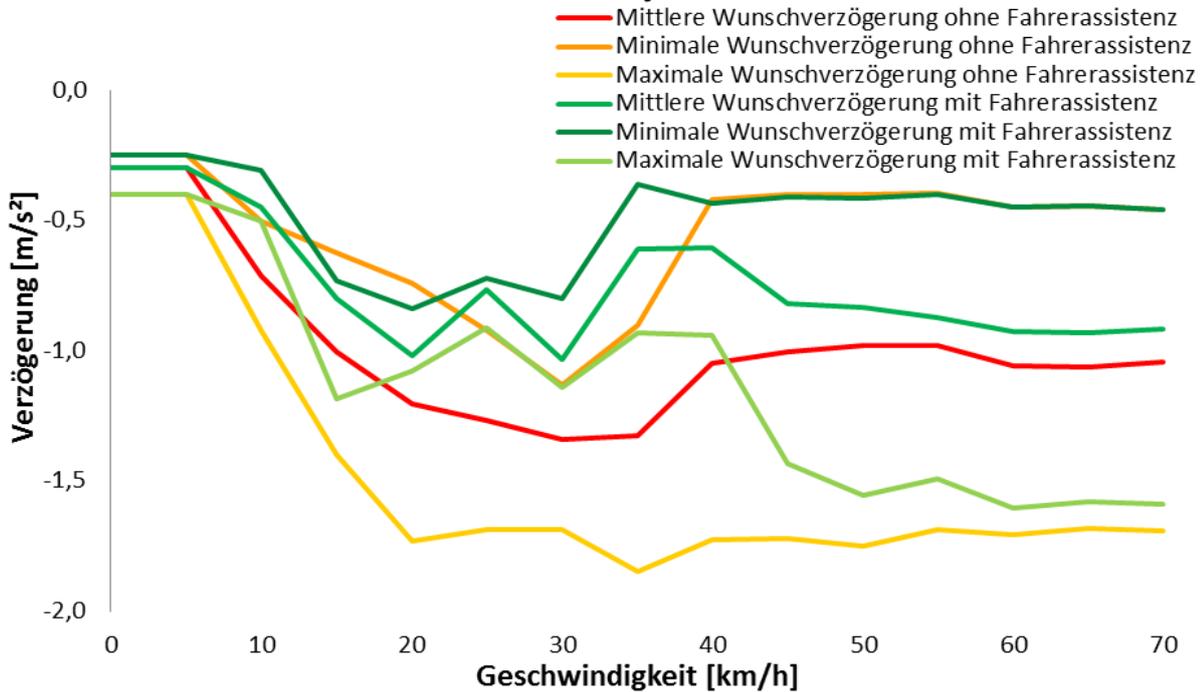


Abb. 6-12 Wunschverzögerungsfunktionen für Fahrer mit und ohne Fahrerassistenz

6.5.5 Kalibrierung der Funktion des gewünschten Sicherheitsabstands

Im letzten Schritt wird auch die Funktion des gewünschten Sicherheitsabstands kalibriert. Der mittlere Stillstandabstand wird mittels Google Maps für den Münchner Norden erhoben. Dazu wurde auf den Satellitenbildern nach Rückstau gesucht und der Abstand per Hand vermessen. Der Abstand zwischen letztem und vorletztem Fahrzeug im Rückstau bleibt dabei unberücksichtigt, da nicht sichergestellt werden kann, dass das letzte Fahrzeug bereits steht und der gemessene Sicherheitsabstand damit von tatsächlichen abweicht. Aufgrund der Bildauflösung entspricht der kleinste messbare Unterschied 0,1 Meter. Insgesamt wurden 52 Stillstandabstände erhoben. Der mittlere Stillstandabstand beträgt 1,52 Meter (Standardabweichung: 0,61 Meter). Da zur Ermittlung des additiven und multiplikativen Sicherheitsabstands keine Daten vorliegen, wird die Annahme getroffen, dass sich diese im gleichen Verhältnis wie der Stillstandabstand zu den Standardparametern ändert. Tab. 6-2 zeigt einen Vergleich der kalibrierten Parameter zu den Standardparametern.

	kalibrierte Parameter	Standardparameter
mittlerer Stillstandabstand	1,52	2,0
additiver Sicherheitsabstand	1,5	2,0
multiplikativer Sicherheitsabstand	2,2	3,0

Tab. 6-2 Kalibrierungsergebnisse der Parameter für den gewünschten Sicherheitsabstand

6.5.6 Annahmen für LKW

Da für die Kalibrierung der LKW-Parameter keinerlei Daten zur Verfügung stehen, und die Standardparameter für LKW nach der Kalibrierung der PKW-Parameter in keinem realitätsnahen Verhältnis zueinander stehen, ist eine Anpassung der Wunschverzögerungs- und Wunschbeschleunigungsfunktion nötig. Es wird die Annahme getroffen, dass das Verhältnis der PKW-Parameter zu den LKW-Parametern für die Standardparameter realistisch abgebildet wird. Das heißt, dass die Standardparameter für LKW um den gleichen Prozentsatz reduziert werden, wie dies für die Standardparameter für PKW aus der Kalibrierung geschehen ist. Funktionen für Beschleunigungen/Verzögerungen mit Fahrerassistenzsystem werden für LKW nicht verwendet. In Abb. 6-13 und Abb. 6-14 sind die angepassten Wunschbeschleunigungs- und Wunschverzögerungsfunktionen dargestellt.

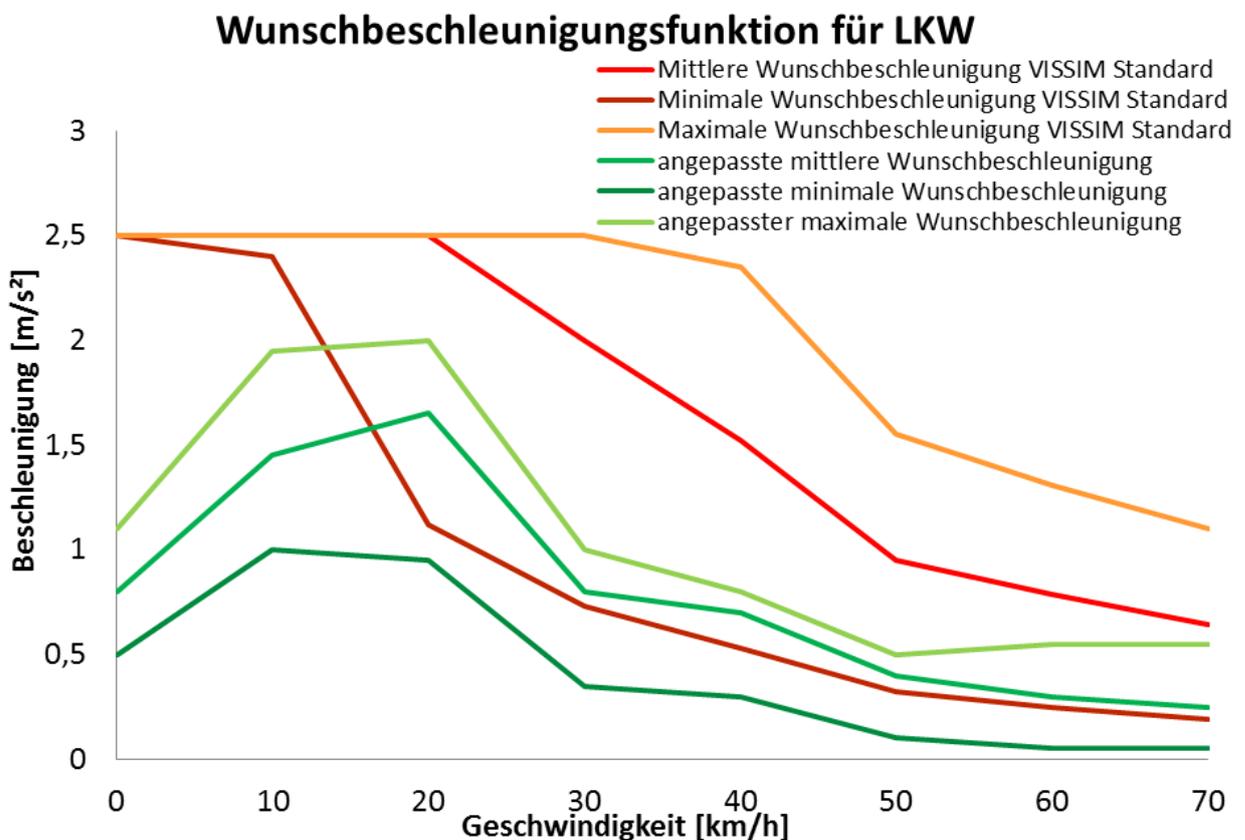


Abb. 6-13 Vergleich der Standardwunschbeschleunigungsfunktionen mit den angepassten Wunschbeschleunigungsfunktionen für LKW.

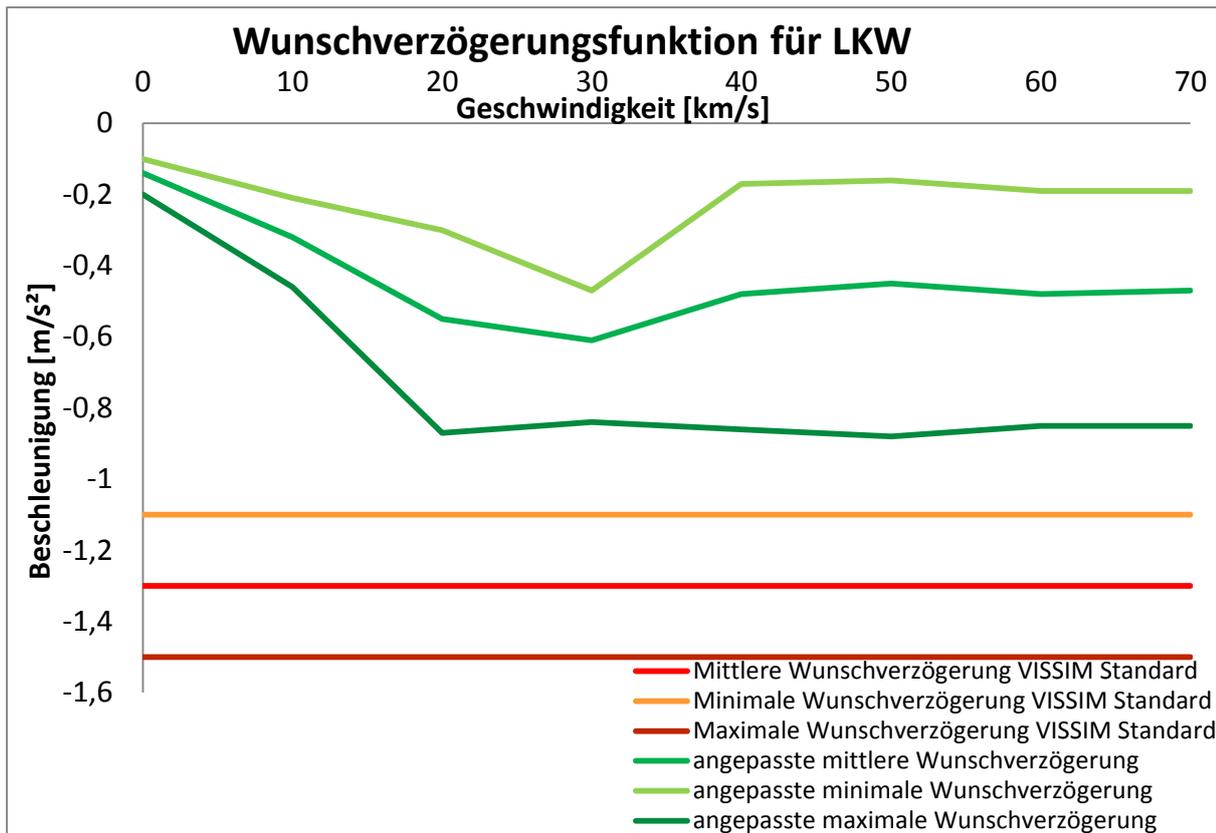


Abb. 6-14 Vergleich der Standardwunschverzögerungsfunktionen mit den angepassten Wunschverzögerungsfunktionen für LKW.

Für die Wunschgeschwindigkeitsverteilung für LKW wird die gleiche Verteilung wie für PKW verwendet, da für LKW keine eigenen Daten zur Verfügung stehen.

6.5.7 Validierung der Parameter

Abschließend werden die neuen gefundenen Parameter validiert, indem sie mit mikroskopischen und makroskopischen Verkehrskenngrößen verglichen werden.

Auf makroskopischer Ebene ist die Kapazität von großer Bedeutung. Für den Test wird auf einem zweistreifigen Querschnitt in VISSIM versucht die maximale Verkehrsstärke abzuwickeln. Dies geschieht einmal mit Lichtsignalanlage (Umlauf 60 Sekunden, Freigabezeit 30 Sekunden), also für eine Sättigungsverkehrsstärke aus einem Rückstau heraus, und einmal ohne Lichtsignalanlage, also für einen freien Verkehrsfluss. Es wurden jeweils 10 Simulationsläufe mit einer Stunde Laufzeit durchgeführt (Standardabweichung bis zu 13 PKW-E). Die in Tab. 6-3 dargestellten Kapazitäten beziehen sich auf PKW-E/h-Freigabezeit. Die Kapazität mit den kalibrierten Parametern liegt dabei deutlich näher an den 2000 Fahrzeugen pro Stunde, wie sie im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [FGSV, 2009] verwendet werden, als mit den Standardparametern. Auch hat der Haltevorgang mit den kalibrierten Parametern eine Auswirkung auf die Kapazität.

Sättigungsverkehrsstärke [Fz/h]	Mit LSA	Freier Verkehrsfluss
VISSIM Standard Parameter	2360,4	2341,3
Kalibrierte Parameter	2026,7	2285,9

Tab. 6-3 Vergleich der Sättigungsverkehrsstärken.

Auf mikroskopischer Ebene lässt sich dies über die Zeitbedarfswerte noch genauer betrachten. Zu diesem Zweck werden für das oben beschriebene Szenario in VISSIM für jeweils 100 Umläufe die Zeitbedarfswerte erhoben und mit realen Daten verglichen. Die realen Daten wurden von WENZEL [2012] mittels Videodatenanalyse für den Knotenpunkt Frankfurter Ring/Knorrstraße in München erhoben (vgl. Abschnitt 5.3).

In Abb. 6-15 werden die Zeitbedarfswerte für Geradeausfahrstreifen verglichen. Mit den kalibrierten Parametern gelingt in VISSIM eine gute Annäherung an die Realität.

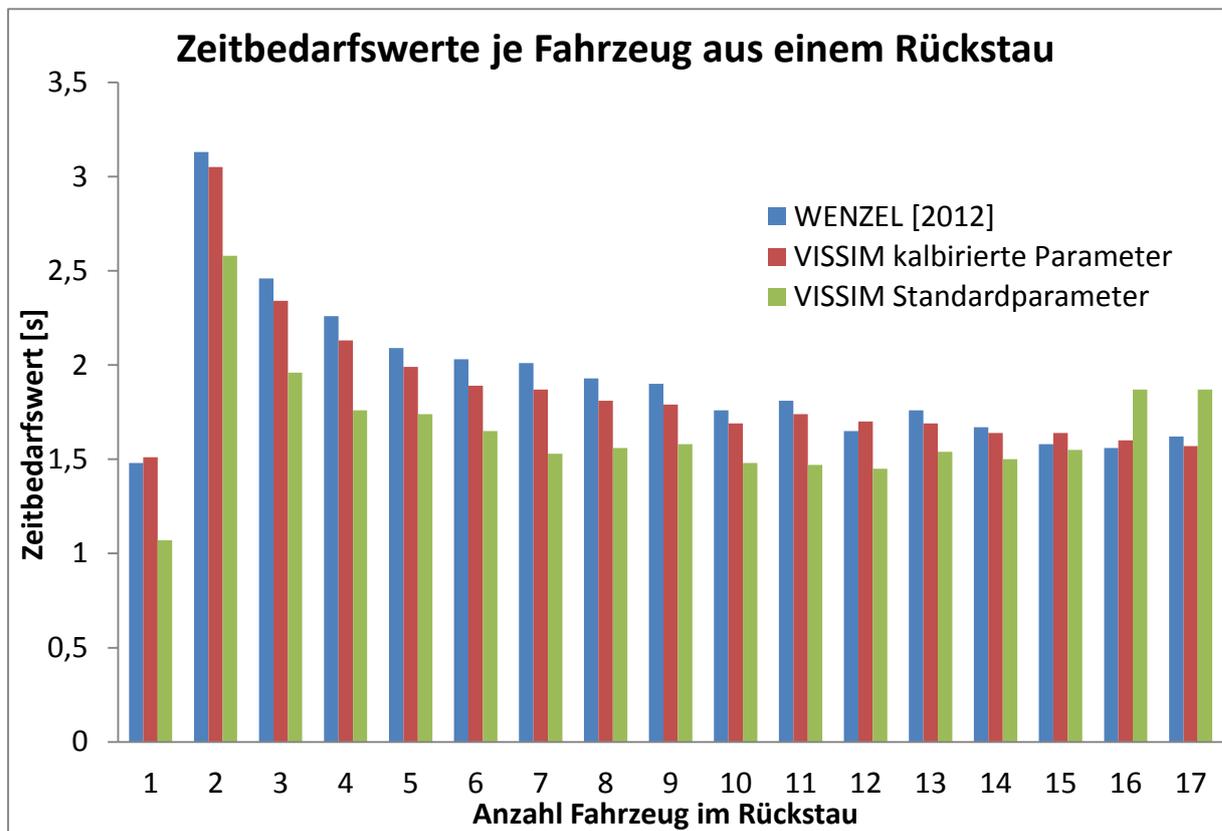


Abb. 6-15 Vergleich der Zeitbedarfswerte für Geradeausfahrstreifen.

Die Beschleunigungs- und die Verzögerungsfunktion mit Fahrerassistenz hat sowohl auf die makroskopischen als auch auf die mikroskopischen Werte keinen signifikanten Einfluss.

7. Bewertung

In diesem Kapitel wird die Bewertung des in den vorangehenden Kapiteln erläuterten Systems beschrieben. Dazu wird in Abschnitt 7.1 auf das Bewertungskonzept und auf das der Bewertung zugrundeliegende Verkehrsnetz eingegangen. Abschnitt 7.2 beschreibt die Erweiterung der Simulationsumgebung um das System In-The-Loop zu bewerten. In Abschnitt 7.3 wird schließlich die eigentliche Bewertung für unterschiedliche Ausstattungsraten und Nachfrageszenarien erläutert.

7.1 Bewertungskonzept

Aufgrund der geringen Anzahl an Fahrzeugen, die mit dem System ausgestattet sind, und der fehlenden Möglichkeit Einzelfahrzeugdaten in einem Umfang erfassen zu können, damit eine statistisch abgesicherte Bewertung der Emissionen und Kenngrößen der Verkehrseffizienz auf Netzebene möglich ist, erfolgt die Bewertung ausschließlich mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation. Dies hat zum einen den Vorteil, dass im Gegensatz zu einer Bewertung in einem realen Testfeld eine vollständige Erfassung und damit auch eine Bewertung aller Fahrzeuge im Netz möglich ist. Zum anderen sind in der Simulation auch die externen Faktoren, wie etwa die Verkehrsnachfrage zwischen der Ausgangssituation und den Vergleichsverfahren identisch, so dass ein unverfälschter Vergleich möglich ist. Wie sich zeigen wird, kann von der Bewertung einzelner ausgestatteter Fahrzeuge nicht in jedem Fall auf Effekte im Gesamtnetz geschlossen werden, weshalb eine netzweite Bewertung bei der Entwicklung von sogenannten kooperativen Systemen immer empfehlenswert ist. Weitere Punkte werden in Abschnitt 7.1.2 erläutert. Als Simulationsumgebung wird VISSIM [PTV, 2012a] verwendet.

7.1.1 Testfeld und Methodik

Die Bewertung wurde für den in Abb. 7-1 dargestellten Streckenzug durchgeführt. Der Streckenzug befindet sich auf der Moosacher Straße (Bundesstraße 304) im Norden Münchens und besteht aus vier lichtsignalgeregelten Knotenpunkten. Der Streckenzug verfügt über zwei bis drei Fahrstreifen je Fahrtrichtung auf der Hauptachse.

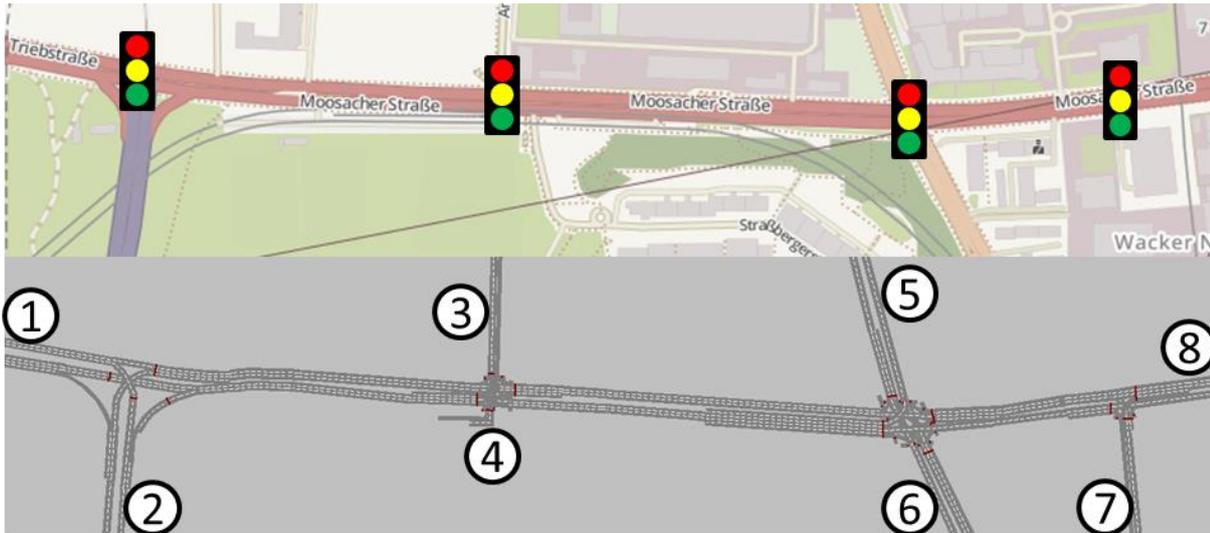


Abb. 7-1 Testfeld Moosacher Straße (Quelle: OpenSourceMap)

Die Verkehrsnachfrage stammt aus einem makroskopischen Modell für den Münchner Norden und beinhaltet eine stundengenaue Nachfrage für einen typischen Werktag für sechs Stunden von 6:00 Uhr bis 12:00 Uhr. In diesem Zeitraum läuft in der Realität das Signalprogramm der Morgenspitze. Das makroskopische Grundmodell für den Münchner Norden wurde aus dem bestehenden makroskopischen Modell für Deutschland (PTV Produkt Validate Germany) erstellt. Anschließend wurde die Verkehrsnachfrage auf Grundlage von in über sechs Monaten gesammelten historischen Daten im Rahmen des Projektes Wiki (Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsinformation und -beeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen [Busch et al., 2012]) mittels VstromFuzzy [PTV, 2013] kalibriert. Die Daten stammen vom Verkehrsinformationssystem Bayerninfo und aus strategischen und LSA-Detektoren der Stadt München. In Abb. 7-2 sind die Zuflüsse des Netzes dargestellt. Ein Großteil der Nachfrage fließt dabei auf der Hauptachse über alle vier Knotenpunkte. Aufgrund des naheliegenden Industriegebiets liegt der Schwerververkehrsanteil bei 4-6 Prozent der gesamten Verkehrsnachfrage. Für die Fußgänger und Radfahrer lagen keine Daten vor. Sie sind daher nicht Bestandteil der Simulationsstudie.

Die Auslastung des Netzes ist dabei zwischen 7:00 Uhr und 10:00 Uhr hoch. Sie entspricht damit einer typischen Morgenspitze. Von 6:00 Uhr bis 7:00 Uhr, sowie von 10:00 Uhr bis 12:00 Uhr entspricht die Auslastung einer typischen Nebenverkehrszeit. Die Hauptbelastungsrichtung der Verkehrsnachfrage ist dabei zwischen 6:00 und 9:00 von West nach Ost. Dies schwächt sich zwischen 9:00 Uhr und 12:00 Uhr deutlich ab, wodurch die Struktur der Verkehrsnachfrage in diesem Zeitbereich nicht ideal zur Struktur des Rahmensignalprogramms des Ausgangsszenarios passt.

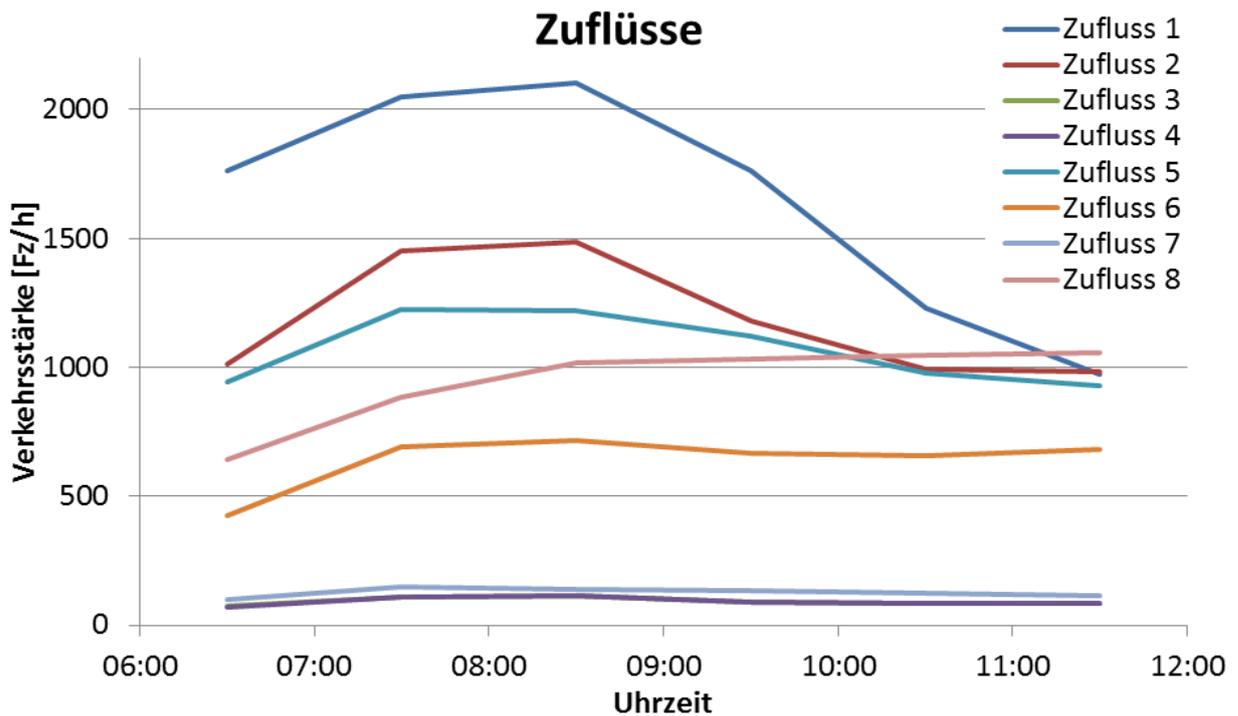


Abb. 7-2 Verkehrsnachfrage des Testfeldes

Als Basissteuerung dient die in der Realität implementierte koordinierte, regelbasierte Knotenpunktsteuerung. Das Programm der Morgenspitze hat eine Umlaufzeit von 90 Sekunden. Für die Bewertung des Pulkmanagements (PM) und der Netzsteuerung (NS) werden auf lokaler Ebene die, der regelbasierten Knotenpunktsteuerung als Rückfallebene dienenden, koordinierten Festzeitsignalprogramme genutzt.

Die Bewertung erfolgt für Ausstattungsraten von 10, 30 und 100 Prozent.

Für die Bewertung der Verkehrseffizienz werden Fahrtzeit und die Anzahl der Halte herangezogen. Für die Bewertung der Emissionen werden CO_2 und NO_x verglichen. Da die Motorabgase nur für einen sehr geringen Anteil der Feinstaubbelastung verantwortlich sind, und diese im Wesentlichen auf der Grundbelastung durch Industrieanlagen und Aufwirbelungen von der Straße besteht, wird auf eine Bewertung des Feinstaubes (PM_{10}) im Rahmen der Arbeit verzichtet. Die Auswertung der Emissionen erfolgt mittels EnViVer 3.0 [EIJK ET AL., 2011] für eine Fahrzeugflottenzusammensetzung für 2010.

7.1.2 Randbedingungen der Bewertung mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation

Neben den bereits erwähnten Vorteilen beim Einsatz einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, der vollständigen Erfassung aller Fahrzeuge sowie der Eliminierung externer Einflüsse resultieren daraus auch gewisse Einschränkungen für die Bewertung des Systems:

- Die in Kapitel 3 erwähnte Komponente zur Verkehrszustandsschätzung arbeitet selbstlernend auf Grundlage historischer makroskopischer Daten. Die Verkehrsnachfrage der Simulation repräsentiert allerdings nur einen durchschnittlichen Vormittag eines Werktages und verfügt damit nicht über eine Historie makroskopischer Daten, anhand derer das Verkehrszustandsschätzungsmodul lernen könnte. Es wird daher davon ausgegangen, dass eine Verkehrsnachfrage und -prognose vorhanden ist und diese exakte Werte liefert. Eine Abweichung der Ergebnisse des Verkehrsnachfrage- und Verkehrsprognosemodells von den real auftretenden Werten kann zu einer nicht idealen Steuerung führen.
- Auch die im Rahmen des Pulkmanagements verwendete Rückstaulängenschätzung verwendet historische Daten. Diese sind allerdings im Gegensatz zur netzweiten Verkehrszustandsschätzung mikroskopisch. Um dem Verfahren Daten zur Verfügung zu stellen, werden daher je Szenario vorab zwei Simulationsläufe durchgeführt, um eine Datenbasis für die Rückstaulängenschätzung zu schaffen. Diese Simulationsläufe fließen nicht in die Bewertung ein.
- Durch die exakte Verortung der Fahrzeuge in der Verkehrsflusssimulation ist ein Map-matching nicht nötig. Die mit der nicht exakten Ortung verbundenen Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung entfallen damit.
- Latenzzeiten bei der Übertragung von Daten zwischen verschiedenen Komponenten des Gesamtsystems aufgrund technischer Einschränkungen entfallen, da das System zur Bewertung auf einem Rechner laufen kann.
- In der Simulation ist immer eine vollständige Datengrundlage vorhanden, da Detektoren hier, im Gegensatz zur Realität, immer vollständige und fehlerfreie Daten liefern.
- Simulationen stellen immer eine gewisse Form der Abstraktion der Realität dar. Im Fall der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation ist das Fahrzeug die kleinste Einheit. Dies ermöglicht einerseits die Abbildung großer Netze, andererseits kann dadurch auch nur die Fahrdynamik des gesamten Fahrzeugs abgebildet werden. Kleinere Einheiten des Fahrzeugs wie der Motor oder das Getriebe und damit die Motorleistung werden nicht abgebildet. Da aber die Gangwahl und die daraus folgende Motorleistung, neben der Geschwindigkeit und der Beschleunigung, wichtige Faktoren für den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen sind, kommt es hier zwangsläufig zu Ungenauigkeiten. Für die Modellierung der Emissionen steht die Leistung des Motors nämlich nicht mehr zur Verfügung. Diese kann nur noch über die Geschwindigkeit und Beschleunigung erfolgen. Eine über die Fahrerassistenz veränderte Gangwahl kann so aber nur bedingt über die Beschleunigung abgebildet werden. Dies ist vor allem bei LKW und Sattelschleppern mit ihrer höheren Anzahl an Gängen wichtig. Gleiches gilt für die heutzutage bereits weit verbreitete Start-Stop-Automatik oder das Ausrollen.

7.2 Erweiterung der Simulationsumgebung

Neben der Bewertung wird die mikroskopische Simulationsumgebung auch zur Verifikation und Parametrierung des Systems genutzt. Das heißt, dass die Simulation sämtliche in der Realität verfügbaren Daten erzeugen und diese in dem System in dem in der Realität vorliegenden Format zur Verfügung stellen muss. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wird die Simulationsumgebung VISSIM mittels eines Software-in-the-Loop Ansatzes erweitert. Auf diese Weise kann das System mittels der Simulation, als Stellvertreter des realen Netzes, parametrieren werden.

7.2.1 Architektur der Testumgebung

Abb. 7-3 zeigt den Aufbau der Testumgebung. Die beteiligten Komponenten sowie die wichtigsten Datenströme werden im Folgenden beschrieben. Wie oben beschrieben, kann für eine reale Anwendung die links dargestellte Simulationsumgebung gegen wirkliche Lichtsignalanlagen und fahrzeugseitige Systeme ausgetauscht werden. Das rechts dargestellte System in der Zentrale beziehungsweise Road Site Unit bleibt dagegen bestehen.

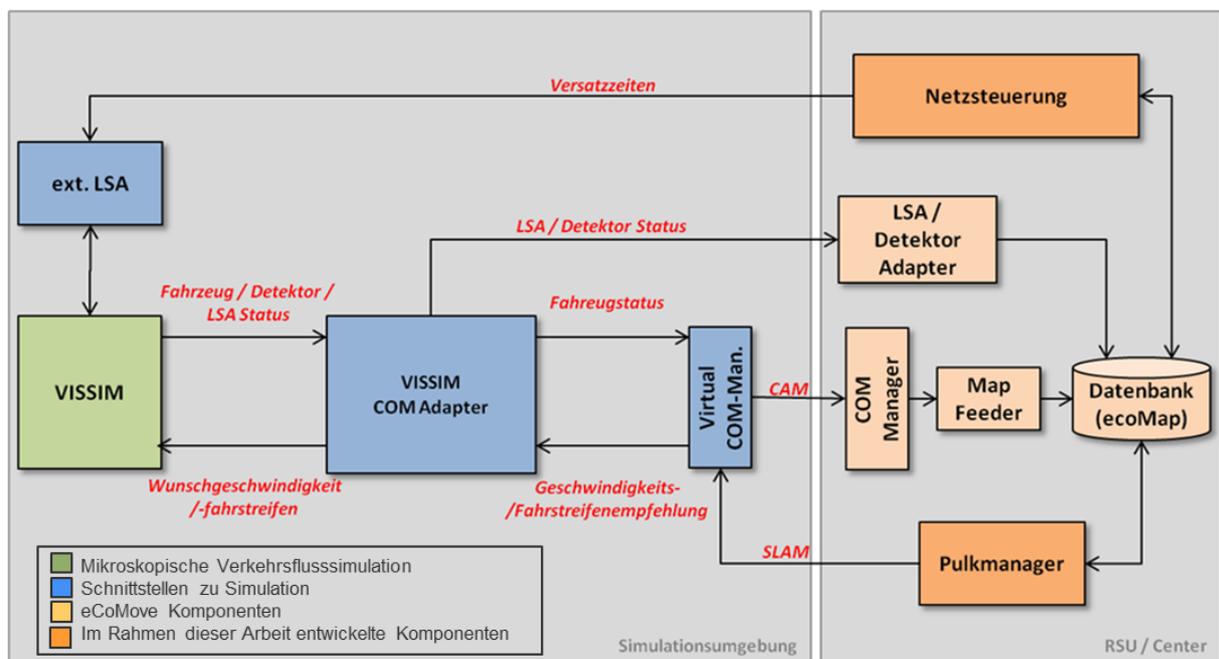


Abb. 7-3 Übersicht über die Komponenten der Testumgebung [LÜßMANN UND DITTRICH, 2012] (in Anlehnung an ECOMOVE [2012b])

7.2.2 Schnittstellen

Die Testumgebung nutzt drei Schnittstellen um die Daten zwischen VISSIM und den Komponenten auszutauschen.

COM

Mittels der COM-Schnittstelle (Component Object Model) können Objekte, Methoden und Eigenschaften aus VISSIM exportiert (und geändert werden). Die Testumgebung nutzt die Schnittstelle um strategische Detektordaten einzulesen. [PTV, 2011]

External Signal Control DLL Interface

Das External Signal Control DLL Interface [PTV, 2012b] bietet Zugriff auf die Signalgeber der Lichtsignalsteuerung sowie die mit der Lichtsignalanlage verbundenen Detektoren. Die Testumgebung greift diese Daten über die Schnittstelle ab.

Car2X Interface (VCOM)

Über das Car2X Interface (VCOM) [PTV, 2012c] können Fahrzeugdaten ausgelesen werden sowie für die in der Simulation als ausgestattet gekennzeichneten Fahrer-Fahrzeugeinheiten Fahrverhaltensparameter angepasst werden. Die Testumgebung passt im Zusammenhang mit dieser Arbeit Wunschgeschwindigkeit und Wunschfahrstreifen an.

Zusätzlich verfügt die Schnittstelle über ein Modell zur Abbildung der Kommunikation. In Abhängigkeit der Entfernung zwischen Sender und Empfänger (hier Lichtsignalanlage und Fahrzeug) und der Anzahl der kommunizierenden Fahrzeuge je Kilometer wird die Information mit einer Empfangswahrscheinlichkeit übermittelt

Abb. 7.4 zeigt die Empfangswahrscheinlichkeit für den C2X Kommunikationsstandard 802.11p. Die Empfangswahrscheinlichkeit wurde mittels des „Network Simulator ns-2“ kalibriert.

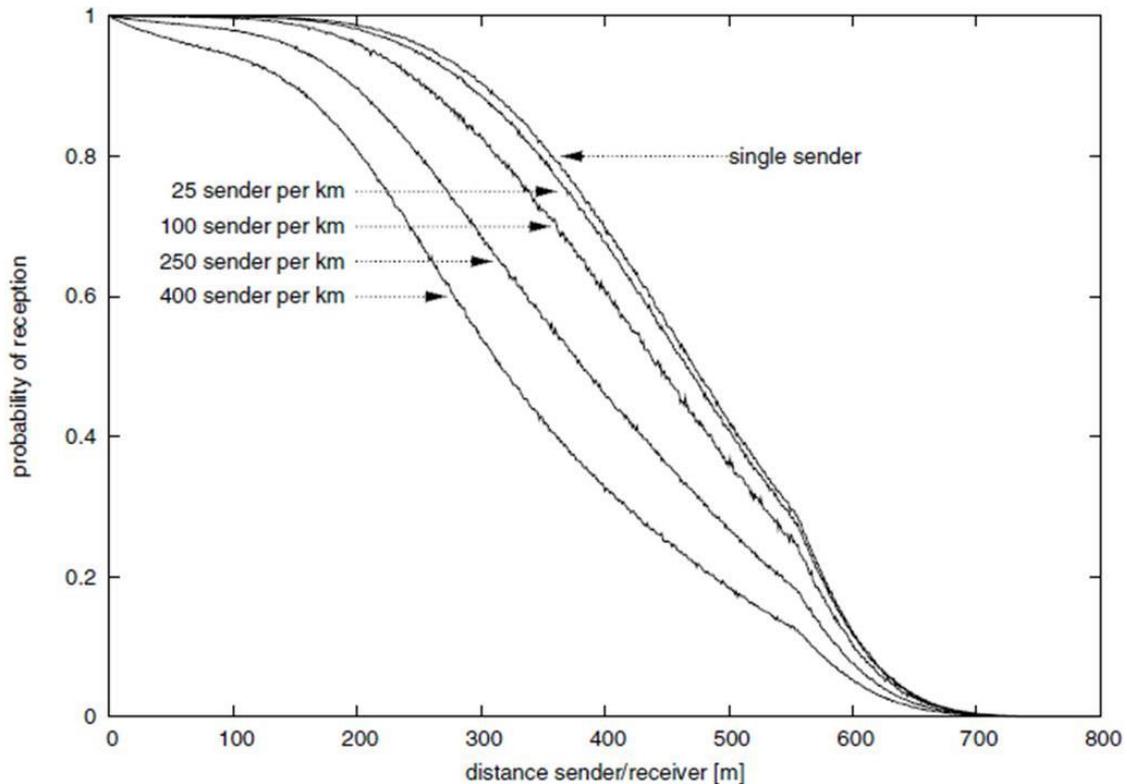


Abb. 7-4 Empfangswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger und der Anzahl der kommunizierenden Fahrzeuge pro Kilometer. [KILLAT et al., 2007]

7.2.3 Komponenten

Die Umsetzung der Komponenten der erweiterten Simulationsumgebung erfolgte durch die Partner des eCoMove Projekts. [ECOMOVE, 2012b]

VISSIM COM Adapter

Der VISSIM COM Adapter schreibt alle nötigen Daten aus der Simulation mit. Für Fahrzeuge sind dies die Daten, die für die Cooperative Awareness Messages (CAM) [ETSI, 2013] nötig sind. Der Zugriff erfolgt über die Car2X Interface (VCOM) [PTV, 2012c] Schnittstelle. Das Auslesen der infrastrukturseitigen Sensoren erfolgt über die COM-Schnittstelle [PTV, 2011].

In der Gegenrichtung werden den Fahrzeugen neue Wunschgeschwindigkeiten und bevorzugte Fahrstreifen gemäß dem Inhalt der SLAM (Speed and Lane Advice Data Message) zugewiesen. [vgl. ECOMOVE, 2012b]. Die Zuweisung erfolgt anhand der in Kapitel 6 beschriebenen Fahrerhaltensmodellierung, wenn die aus Fahrzeug- und Haltelinienposition berechnete Wunschgeschwindigkeit zwischen 40 und 60 km/h liegt.

Da die Wunschgeschwindigkeit nicht zwingend der in VISSIM realisierten Geschwindigkeit entspricht, da diese durch die Interaktion mit den anderen Fahrzeugen abweichen kann, wird

die Wunschgeschwindigkeit der ausgestatteten Fahrzeuge in der Simulation sekundlich angepasst, damit das Fahrzeug die ihm zugeteilte Zeitlücke erreicht.

External FTC ('extFTC')

Um die Optimierung der Netzsteuerung in der Simulation umzusetzen wird eine externe Festzeitsteuerung über das External Signal Control DLL Interface an VISSIM angebunden. Im Gegensatz zur normalen Festzeitsteuerung kann hier bei laufender Simulation der Versatz des Signalprogramms geändert werden. Dies geschieht nach jedem Optimierungsintervall durch das Setzen der optimierten Versatzzeit der Netzsteuerung. [vgl. ECOMOVE, 2012b].

Virtual COM Manager

Der Virtual COM Manager ersetzt die Kommunikation des realen Testfelds. Dazu werden sowohl die Erzeugung der fahrzeuggenerierten Meldungen aus den Fahrzeugpositionen in der Verkehrsflusssimulation als auch die Umwandlung der infrastrukturseitig generierten Meldungen in Reaktionen des Fahrerfahrzeugmodells umgesetzt.

Aus den Fahrzeugpositionen werden für jedes Fahrzeug in Reichweite einer Road Side Unit (RSU) Cooperative Awareness Messages (CAM) [ETSI, 2013] aus den im VISSIM COM Adapter mitgeschriebenen Daten generiert. In der Gegenrichtung werden aus der SLAM [ECOMOVE, 2012e] Geschwindigkeiten und Fahrstreifen abgeleitet. Sowohl CAM als auch SLAM werden über Ethernet versendet. Dies ermöglicht die Simulationsumgebung und das eigentliche System auf unterschiedlichen Rechnern laufen zu lassen, was beispielsweise bei zwei genutzten VISSIM Instanzen (eine für die Simulation und eine für die Applikation Netzsteuerung) nötig ist.

LSA/Detektor Adapter

Der LSA/Detektor Adapter verarbeitet die dynamischen Signal- und Detektorzustände aus dem VISSIM COM Adapter und schreibt diese in die Datenbank [vgl. ECOMOVE, 2012a]. Falls es lokale verkehrsabhängige Steuerungen gibt, werden auch Signalzustandsprognosen in die Datenbank geschrieben.

COM Manager

Der COM Manager (Communication Manager) ist zuständig für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und den Road Side Units (RSU). Über eine JAVA OSGi (*Open Services Gateway initiative*) Umgebung werden die Nachrichten ausgetauscht, indem ein spezifizierter Service abonniert wird. In diesem Fall zwischen dem Virtual COM Manager, der die kommunikationsfähigen Fahrzeuge der Simulation repräsentiert, und den virtuellen Road Side Units des infrastrukturseitigen Systems. [vgl. ECOMOVE, 2011a]

Map Feeder

Der sogenannte Map Feeder ist dafür verantwortlich Fahrzeugdaten ausgestatteter Fahrzeuge in die Datenbank zu schreiben, beziehungsweise Daten zwischen unterschiedlichen Datenbanken (z.B. zwischen unterschiedlichen Road Site Unites, beziehungsweise zwischen Road Site Unit und Zentrale) zu synchronisieren. Dies beinhaltet auch ein Mapmatching. Ein Mapping zwischen VISSIM Strecken IDs und denen der Datenbank findet über eine Tabelle statt. Für die Simulationsumgebung wird nur mit einer zentralen Datenbank gearbeitet. [vgl. ECoMOVE, 2012b]

Datenbank

Als Datenbank wird die sogenannte ecoMap der Firma HERE (vormals Nokia beziehungsweise NAVTEQ) verwendet. Sie verfügt über statische und dynamische Informationen.

Die statischen Informationen enthalten dabei im Wesentlichen das Straßennetz inklusive der Straßengeometrie, der Geschwindigkeitslimits, der Abbiegebeschränkungen sowie Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen.

Die dynamischen Informationen stammen von der infrastrukturseitigen Sensorik (z.B. Verkehrsstärke), den Lichtsignalanlagen (aktueller und prognostizierte Signalzustände), den Fahrzeugen (z.B. Position, ID, Fahrzeugtyp) aber auch von systeminternen Applikationen (z.B. Verkehrszustandsschätzung, Rückstaulängenschätzung). [vgl. ECoMOVE, 2012c]

7.3 Systembewertung

Die Bewertung des Systems erfolgt anhand von 10 Simulationsläufen je Szenario. Im Folgenden werden dazu die Ergebnisse der Stunde zwischen 7:00 und 8:00 als Repräsentant einer Spitzenverkehrsstunde und die Stunde zwischen 10:00 und 11:00 als Repräsentant einer Nebenverkehrsstunde präsentiert und analysiert. Für die Bewertung des Systems wird dabei für die Netzsteuerung nur eine Zielfunktion auf Grundlage der CO₂ Emissionen verwendet, da für die Anzahl der Halte, wie in Abschnitt 4.7.1 beschrieben, keine konsistente Optimierung durchgeführt werden konnte. Weitere Auswertungen finden sich in Anhang B.

7.3.1 Verkehrseffizienz

Zur Bewertung der Verkehrseffizienz werden die durchschnittliche Fahrtzeit und die Anzahl der Halte betrachtet. Da sich die Verlustzeit in VISSIM an der Wunschgeschwindigkeit bemisst, diese aber durch die Geschwindigkeitsempfehlung an die Fahrzeuge geändert wird, ist eine Auswertung der Verlustzeiten in VISSIM nicht ohne zusätzlichen Aufwand möglich. Da die Verlustzeit zusätzlich zur Reisezeit keinen wesentlichen Mehrwert bringt wird diese nicht ausgewertet.

Fahrtzeit

Wie auch für die folgenden Grafiken und Kenngrößen werden für die Fahrtzeit je Szenario der Mittelwert sowie das Perzentil P90 als Obergrenze und das Perzentil P10 als Untergrenze dargestellt. Abb. 7-5 stellt die durchschnittlichen Fahrtzeiten je Fahrzeug für die Spitzenverkehrsstunde von 7:00 bis 8:00 Uhr dar.

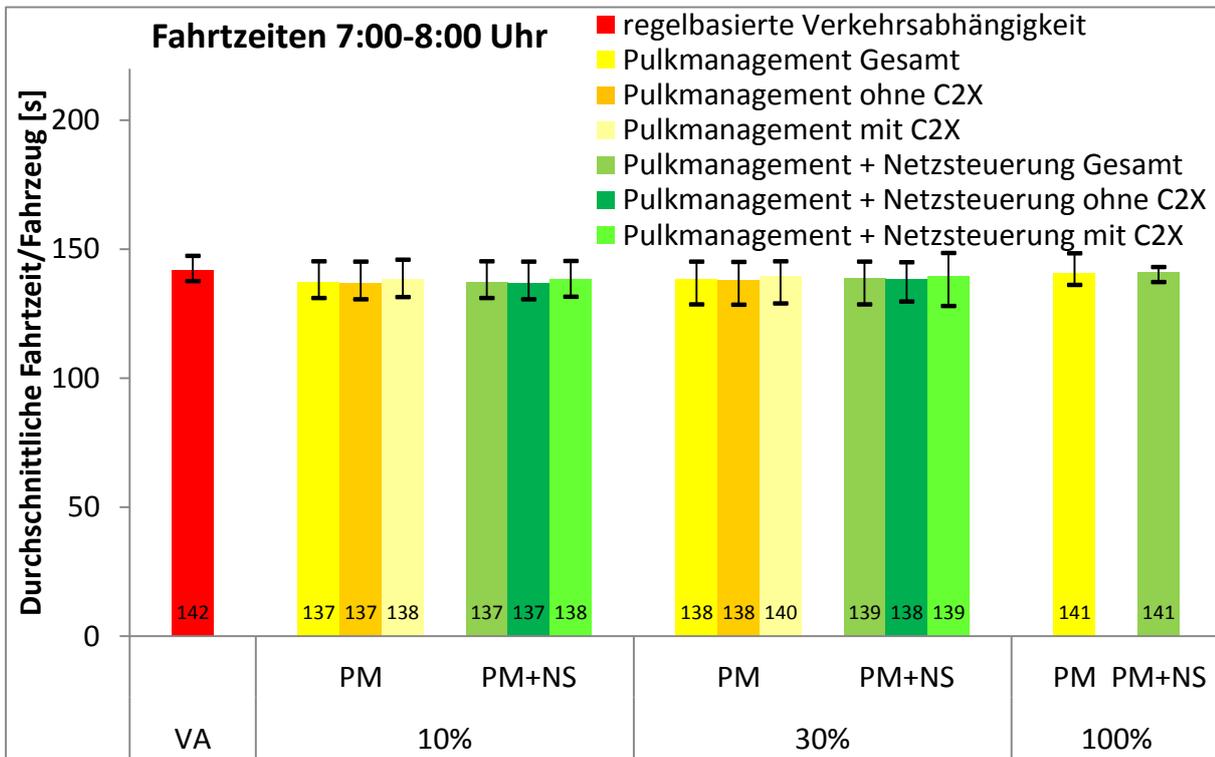


Abb. 7-5 Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug in Sekunden für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr

In Tab. 7-1 sind die prozentualen Veränderungen der Szenarien zueinander zusammengefasst. Die Einfärbung beschreibt dabei innerhalb welches Konfidenzintervalls die Ergebnisse signifikant sind. Die Signifikanztests wurden wie auch für die übrigen Auswertungen über einen Zweistichprobentest mit einer studentschen t-Verteilung ermittelt.

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-3,4%	-3,5%	-2,4%	-3,4%	-3,5%	-2,5%	0,0%	0,0%	-0,1%	>80% und < 95%
30%	-2,4%	-2,8%	-1,6%	-2,2%	-2,4%	-1,8%	0,2%	0,4%	0,2%	< 80%
100%	-0,7%	-	-0,7%	-0,5%	-	-0,5%	0,2%	-	0,2%	nicht signifikant

Tab. 7-1 Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde 7:00 bis 8:00 Uhr

Für die dargestellte Spitzenstunde verbessert sich die Fahrtzeit für den Gesamtverkehr mit Pulkmanagement (PM) gegenüber der verkehrsabhängigen Steuerung (VA) um durchschnittlich bis zu 3,4 Prozent. Für die Kombination von Pulkmanagement und Netzsteuerung (PM+NS) verbessert sich dies nicht mehr. Der Unterschied zwischen dem Szenario nur mit Pulkmanagement und einer zusätzlichen Netzsteuerung ist nicht signifikant.

Abb. 7-6 stellt die Fahrtzeiten für die Nebenverkehrsstunde von 10:00 bis 11:00 Uhr dar. In Tab. 7-2 werden die zugehörigen prozentualen Veränderungen dargestellt.

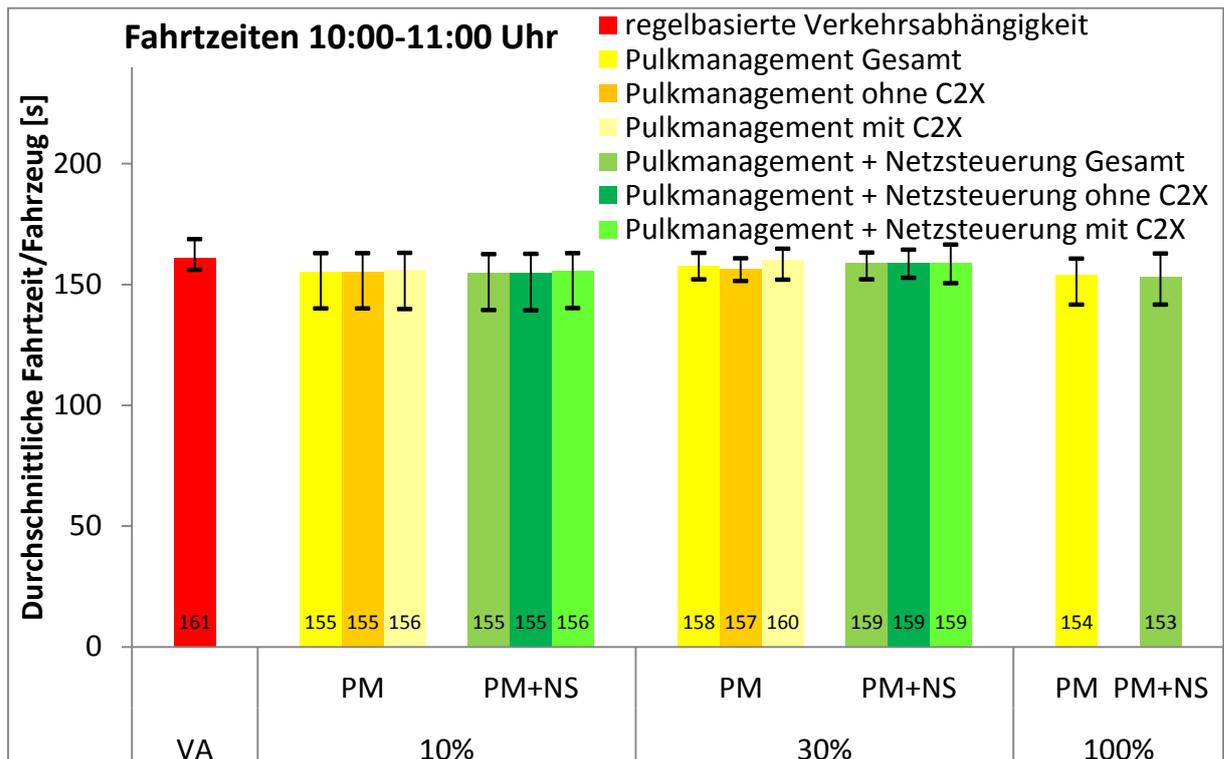


Abb. 7-6 Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug in Sekunden für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-3,4%	-3,5%	-3,1%	-3,7%	-3,8%	-3,2%	-0,3%	-0,3%	-0,2%	>80% und < 95%
30%	-2,1%	-2,7%	-0,6%	-1,3%	-1,3%	-1,3%	0,8%	1,5%	-0,7%	< 80%
100%	-4,3%	-	-4,3%	-4,9%	-	-4,9%	-0,7%	-	-0,7%	nicht signifikant

Tab. 7-2 Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde 10:00 bis 11:00 Uhr

Für die dargestellte Stunde der Nebenverkehrszeit verbessert sich die Fahrtzeit mit Pulkmanagement für den Gesamtverkehr um durchschnittlich bis zu 4,3 Prozent. Mit zusätzlicher Netzsteuerung ist die Verbesserung bis zu 4,9 Prozent gegenüber der Ausgangssituation. Der

Unterschied zwischen dem Szenario nur mit Pulkmanagement und dem mit zusätzlicher Netzsteuerung ist wiederum nicht signifikant.

Im Allgemeinen verbessert sich die Fahrtzeit mit Pulkmanagement unabhängig von der Ausstattungsrate. Dies lässt vermuten, dass bereits eine geringe Ausstattungsrate reicht, um den Pulk soweit zu verzögern, dass dieser ohne Halt mit einer höheren Geschwindigkeit die Haltelinie passiert und so einige Sekunden Fahrtzeit einsparen kann. Die stärkste Verbesserung ergibt sich dabei für die Spitzenstunde von 9:00 bis 10:00 Uhr mit einer Verbesserung für den Gesamtverkehr von durchschnittlich bis zu 13,8 Prozent für das Szenario mit Pulkmanagement. Dies liegt hier im Wesentlichen am vorhandenen Verbesserungspotential, da die Planung der Signalsteuerung der Ausgangssituation hier von allen Nachfragestunden am schlechtesten an die vorhandene Verkehrsnachfrage angepasst ist. Zudem ist, aufgrund der hohen Auslastung, die Anpassungsfähigkeit der verkehrsabhängigen Steuerung an das Verkehrsaufkommen begrenzt. So bekommt die Nebenrichtung aufgrund ihrer Nachfrage in der Ausgangssituation mehr Freigabezeit, als dies in der Festzeitsteuerung der Fall ist. Demzufolge sind die Fahrtzeiten im Ausgangsszenario pro Fahrzeug im Vergleich aller Nachfragestunden auch am längsten. Nur für diese Nachfragestunde ergeben sich daher auch signifikante Verbesserungen mit einem Konfidenzintervall von über 95 Prozent. Für die Netzsteuerung ergibt sich für die Fahrtzeit dagegen kein klarer Trend. Dies ist allerdings nicht verwunderlich, da die Optimierung der Netzsteuerung nicht auf Fahrtzeiten sondern auf Emissionen erfolgt und damit nicht auf die hier analysierte Verkehrskenngröße.

Grundsätzlich lässt sich für die Szenarien mit Ausstattungsraten von 10 beziehungsweise 30 Prozent für ausgestattete Fahrzeuge eine leicht längere Fahrtzeit beobachten als für nicht ausgestattete Fahrzeuge. Dies liegt daran, dass die ausgestatteten Fahrzeuge mit ihrer geringeren Wunschgeschwindigkeit vereinzelt von nicht ausgestatteten Fahrzeugen überholt werden. Dies führt auch dazu, dass die vom Pulkmanagement empfohlene Zeitlücke an der Haltelinie nicht mehr erreicht werden kann, wodurch die Fahrzeuge teilweise trotz der Befolgung der Geschwindigkeitsempfehlung halten müssen. Ein Unterschied zwischen PKW und LKW lässt sich für die Fahrtzeit hingegen nicht beobachten.

Anzahl der Halte

Die Definition eines Halts entspricht in VISSIM einer Hysterese. Als Halt wird gezählt, wenn ein Fahrzeug eine Geschwindigkeit von 3 km/h unterschreitet und anschließend wieder auf mehr als 5 km/h beschleunigt. Abb. 7-7 stellt die Anzahl der Halte pro Fahrzeug für die Spitzenverkehrsstunde von 7:00 bis 8:00 Uhr dar, die nach dieser Definition ermittelt wurden. In Tab. 7-3 werden die prozentualen Veränderungen dargestellt.

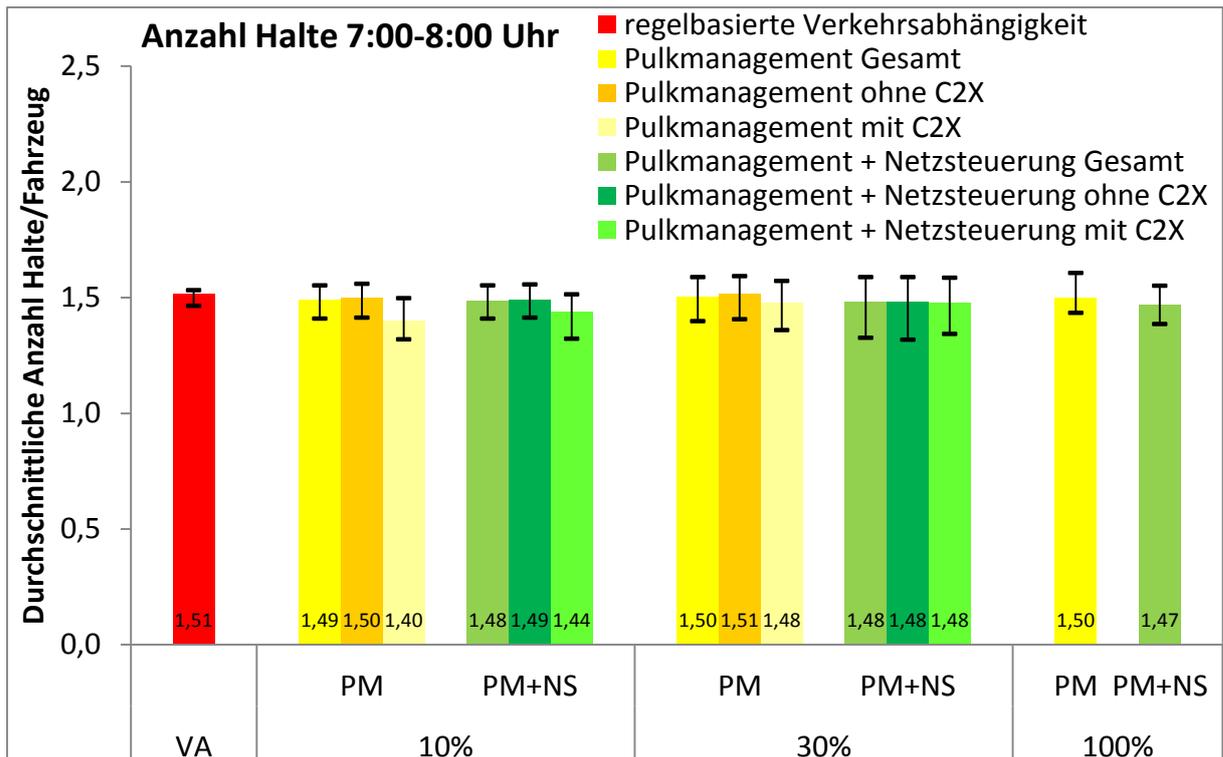


Abb. 7-7 Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr

Durchschnittliche prozentuale Veränderungen										Konfidenzintervall
Ausstattungsrate	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	> 95%
10%	-1,7%	-1,0%	-7,7%	-2,0%	-1,6%	-5,2%	-0,3%	-0,6%	2,7%	>80% und < 95%
30%	-0,8%	0,0%	-2,6%	-2,3%	-2,3%	-2,6%	-1,5%	0,0%	0,0%	< 80%
100%	-1,0%	-	-1,0%	-3,2%	-	-3,2%	-2,1%	-	-2,1%	nicht signifikant

Tab. 7-3 Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr

Für die Spitzenstunde reduziert sich die Anzahl der Halte pro Fahrzeug mit Pulkmanagement um durchschnittlich bis zu 1,7 Prozent gegenüber der verkehrsabhängigen Steuerung. Die Anpassung der Geschwindigkeiten an die Lichtsignalsteuerung ist damit in etwa genauso effektiv wie die regelbasierte Anpassung der Schaltung an den Verkehr, da diese für die Spitzenstunde gut funktioniert. Mit zusätzlicher Netzsteuerung verbessert sich die Anzahl der Halte um durchschnittlich bis zu 3,2 Prozent. Die Änderungen sind jeweils, mit Ausnahme der ausgestatteten Fahrzeuge bei einer Ausstattungsrate von 10 Prozent, nicht mit einem Konfidenzintervall von über 95 Prozent signifikant.

Abb. 7-8 stellt die Anzahl der Halte für die Nebenverkehrsstunde von 10:00 bis 11:00 Uhr dar. In Tab. 7-4 werden die zugehörigen prozentualen Veränderungen dargestellt.

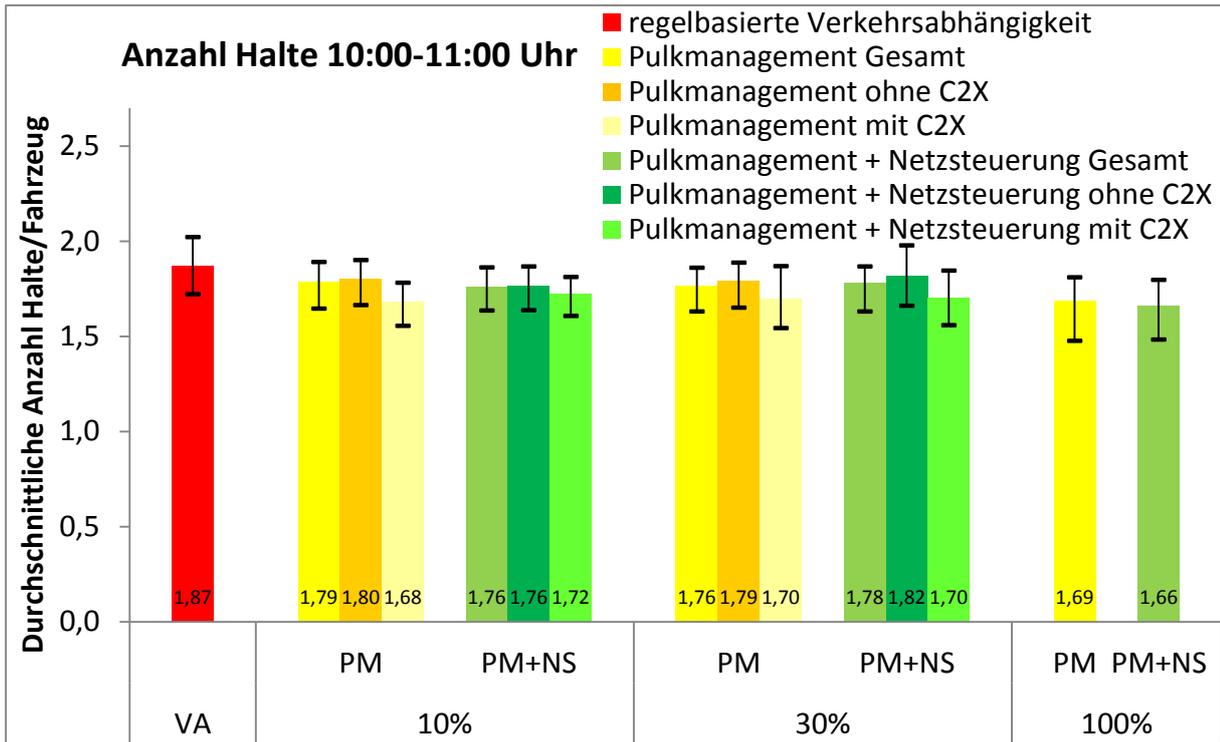


Abb. 7-8 Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-4,4%	-3,7%	-10,1%	-5,9%	-5,7%	-7,8%	-1,6%	-2,1%	2,6%	>80% und < 95%
30%	-5,7%	-4,3%	-9,3%	-4,8%	-2,8%	-8,9%	0,9%	0,5%	0,5%	< 80%
100%	-9,8%	-	-9,8%	-11,1%	-	-11,1%	-1,5%	-	-1,5%	nicht signifikant

Tab. 7-4 Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr

Für die Nebenverkehrsstunde reduziert sich die durchschnittliche Anzahl der Halte pro Fahrzeug mit Pulkmanagement um durchschnittlich bis zu 9,8 Prozent gegenüber der Ausgangssituation. Mit zusätzlicher Netzsteuerung reduziert sich die Anzahl der Halte pro Fahrzeug sogar um durchschnittlich bis zu 11,1 Prozent. Für ausgestattete Fahrzeuge sind die Verbesserungen mit einem Konfidenzintervall von über 95 Prozent signifikant. Dies gilt nicht für den Unterschied zwischen dem Szenario mit ausschließlichem Pulkmanagement und dem mit zusätzlicher Netzsteuerung.

Die Anzahl der Halte verringert sich durch das Pulkmanagement in allen Nachfragestunden unabhängig von der Auslastung. Bessere Ergebnisse können erzielt werden, wenn die Struktur der Verkehrsnachfrage nicht zur Struktur der Lichtsignalsteuerung passt. So wird die stärkste

Reduzierung, wie auch schon für die Fahrtzeit, in der Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr mit durchschnittlich bis zu 9,6 Prozent weniger Halten erreicht.

Höhere Ausstattungsraten führen dabei auch zu einer stärkeren Reduzierung der Anzahl der Halte. Dabei reduziert sich die Anzahl der Halte für ausgestattete Fahrzeuge deutlich stärker und damit auch auf einem höheren Konfidenzintervall als für nicht ausgestattete Fahrzeuge. Nicht ausgestattete Fahrzeuge profitieren in Bezug auf die Anzahl der Halte, im Gegensatz zur Fahrtzeit, nur in geringerem Maße und erst bei höheren Ausstattungsraten. Dies liegt im verwendeten Testgebiet im Wesentlichen an der Anzahl von zwei bis drei Fahrstreifen der Hauptachse. Zudem entsteht eine Vielzahl der Halte auch durch Fahrzeuge der Nebenrichtungen, die weder vom Pulkmanagement noch von der Netzsteuerung positiv beeinflusst werden können. Gleiches gilt für mit der Hauptphase nicht verträglich abzuwickelnde Linksabbieger. Ein Unterschied zwischen PKW und LKW ist auch für die Anzahl der Halte nicht festzustellen.

7.3.2 Emissionen

Zur Bewertung der Emissionen werden CO₂ und NO_x betrachtet. Die Bewertung erfolgt mittels der Software EnViVer. Es wird die Flottenzusammensetzung von 2010 verwendet. Die Klasse LKW beinhaltet dabei Fahrzeuge über 3,5 Tonnen mit zwei Achsen und somit keine Sattel-schlepper.

CO₂ Emissionen

Die CO₂ Emissionen korrelieren mit dem Kraftstoffverbrauch. Sie berücksichtigen im Gegensatz zur Anzahl der Halte alle Beschleunigungen und Verzögerungen und nicht nur diejenigen, die einen Halt verursachen. Mit der verwendeten Verkehrszusammensetzung (siehe Abschnitt 4.4.2) entspricht ein Kraftstoffverbrauch von einem Liter für PKW 2,41 Kilogramm CO₂ und für LKW 2,64 Kilogramm CO₂ [IZU, 2014]. Abb. 7-9 stellt die Anzahl der Halte pro Fahrzeug für die Spitzenverkehrsstunde von 7:00 bis 8:00 Uhr dar. In Tab. 7-5 werden die prozentualen Veränderungen dargestellt.

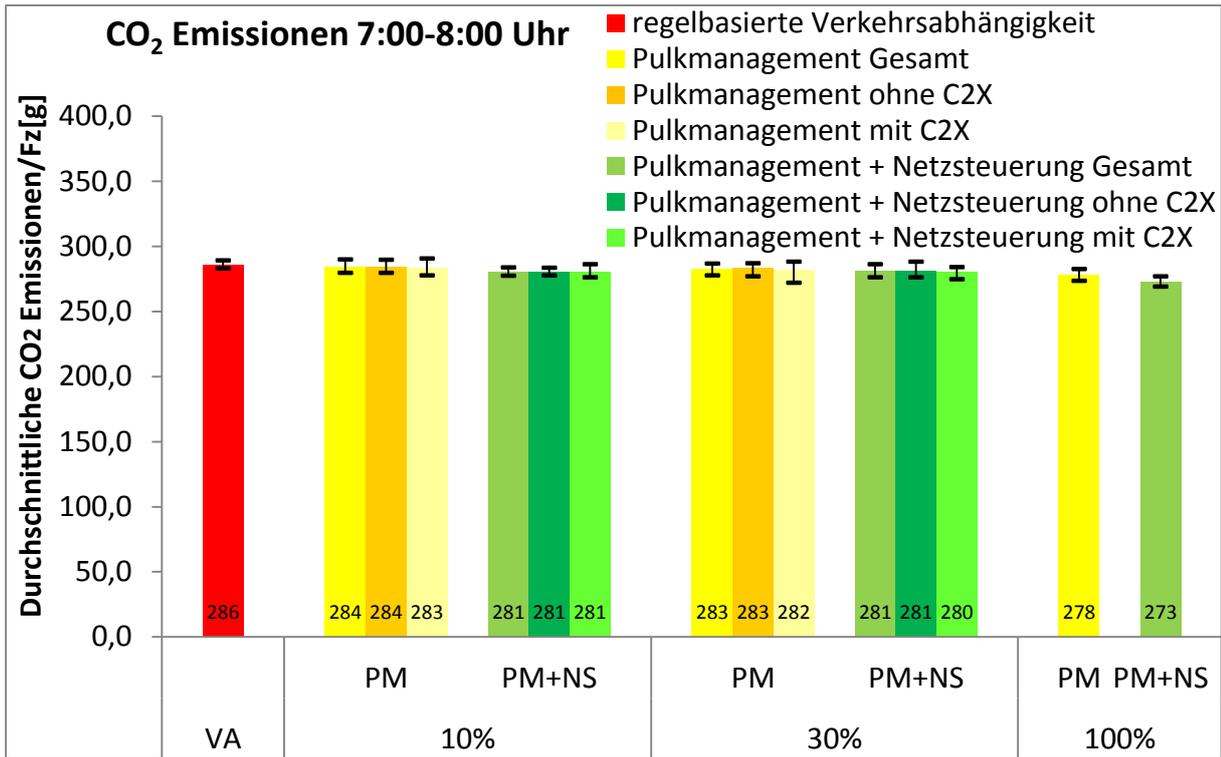


Abb. 7-9 Durchschnittliche CO₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr

Durchschnittliche prozentuale Veränderungen										Konfidenzintervall
Ausstattungsrate	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-0,5%	-0,4%	-0,8%	-1,8%	-1,8%	-1,7%	-1,3%	-1,4%	-1,0%	>80% und < 95%
30%	-1,0%	-0,8%	-1,4%	-1,7%	-1,6%	-2,0%	-0,7%	-0,6%	-0,6%	< 80%
100%	-2,7%	-	-2,7%	-4,5%	-	-4,5%	-1,9%	-	-1,9%	nicht signifikant

Tab. 7-5 Prozentuale Veränderungen der CO₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr

Für die Spitzenstunde reduzieren sich die CO₂ Emissionen pro Fahrzeug mit Pulkmanagement um durchschnittlich bis zu 2,7 Prozent gegenüber der verkehrsabhängigen Steuerung. Die Änderungen sind nur für eine Ausstattungsrate von 100 Prozent mit einem Konfidenzintervall von über 95 Prozent signifikant. Mit zusätzlicher Netzsteuerung reduzieren sich die CO₂ Emissionen um durchschnittlich bis zu 4,5 Prozent. Alle Änderungen sind hier, mit einer Ausnahme, mit einem Konfidenzintervall von 95 Prozent signifikant. Dies gilt teilweise auch für den Unterschied zwischen reinem Pulkmanagement und der Kombination der beiden Applikationen.

Abb. 7-10 stellt die CO₂ Emissionen für die Nebenverkehrsstunde von 10:00 bis 11:00 Uhr dar. In Tab. 7-6 werden die zugehörigen prozentualen Veränderungen dargestellt.

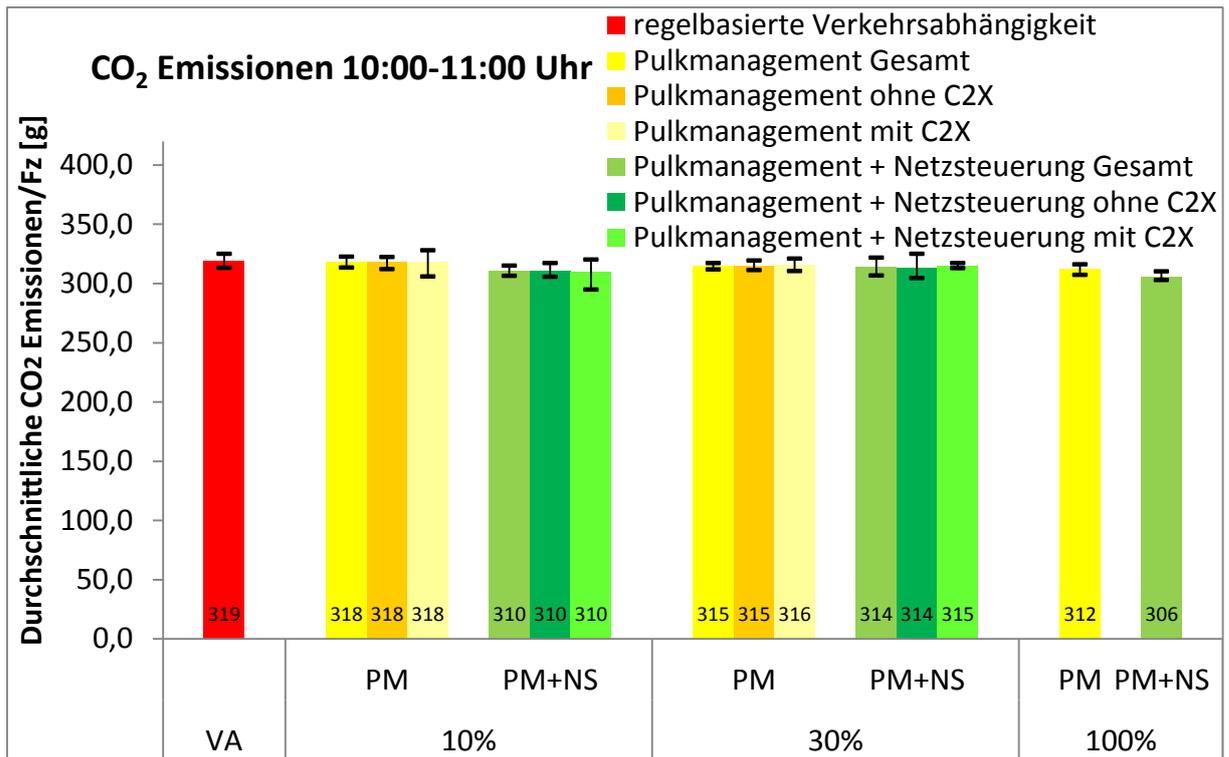


Abb. 7-10 Durchschnittliche CO₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-0,2%	-0,2%	-0,3%	-2,6%	-2,6%	-2,9%	-2,4%	-2,4%	-2,6%	>80% und < 95%
30%	-1,1%	-1,2%	-0,9%	-1,5%	-1,6%	-1,2%	-0,4%	-0,3%	-0,3%	< 80%
100%	-2,0%	-	-2,0%	-4,0%	-	-4,0%	-2,1%	-	-2,1%	nicht signifikant

Tab. 7-6 Prozentuale Veränderungen der CO₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr

Für die Nebenverkehrsstunde reduzieren sich die durchschnittlichen CO₂ Emissionen pro Fahrzeug mit Pulkmanagement um durchschnittlich bis zu 2,0 Prozent gegenüber der Ausgangssituation. Diese Änderung ist nur für eine Ausstattungsrate von 100 Prozent mit einem Konfidenzintervall von 95 Prozent signifikant. Mit zusätzlicher Netzsteuerung reduzieren sich die CO₂ Emissionen pro Fahrzeug durchschnittlich bis zu 4,0 Prozent. Für Ausstattungs-raten von 10 und 100 Prozent sind diese Änderungen mit einem Konfidenzintervall von 95 Prozent signifikant. Dies gilt auch, mit einer Ausnahme, für die Änderungen zwischen reinem Pulkmanagement und der Kombination von Pulkmanagement und Netzsteuerung.

Die CO₂ Emissionen pro Fahrzeug reduzieren sich für fast alle Nachfragestunden, wobei höhere Ausstattungs-raten auch zu höheren Einsparungen führen. Für eine Ausstattungsrate von

100 Prozent ist diese Reduzierung für alle Stunden mit einem Konfidenzintervall von 95 Prozent signifikant. Im Gegensatz zu der Anzahl der Halte bringt eine zusätzliche Netzsteuerung für die CO₂ Emissionen eine weitere Reduzierung um circa zwei Prozent. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Optimierung der Netzsteuerung auf Grundlage der CO₂ Emissionen geschieht und hat auch zur Folge, dass der Unterschied zwischen reinem Pulkmanagement und einer Kombination der beiden Applikationen im Gegensatz zu den verkehrlichen Kenngrößen in einigen Fällen mit einem Konfidenzintervall von 95 Prozent signifikant ist. Wie auch für die verkehrlichen Kenngrößen besteht das größte Verbesserungspotenzial für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr. Hier reduzieren sich die CO₂ Emissionen pro Fahrzeug um durchschnittlich 5,9 Prozent.

Entgegen den verkehrlichen Kenngrößen zeigt sich für die CO₂ Emissionen ein deutlicher Unterschied zwischen PKW und LKW. Dies bezieht sich nicht nur auf den zu erwartenden höheren absoluten CO₂ Ausstoß durch die LKW, die in etwa 4 bis 4,5 Mal mehr Kraftstoff verbrauchen und damit auch diese Menge mehr an CO₂ emittieren, sondern auch auf die relative Veränderung der Emissionen. Abb. 7-11 und Abb. 7-12 zeigen die relativen Veränderungen der CO₂ Emissionen mit Pulkmanagement beziehungsweise mit Pulkmanagement und Netzsteuerung gegenüber dem Ausgangsszenario für die unterschiedlichen Ausstattungsszenarien. Die Darstellung trennt dabei nach PKW und LKW sowie nach ausgestatteten Fahrzeugen und nicht ausgestatteten Fahrzeugen für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr.

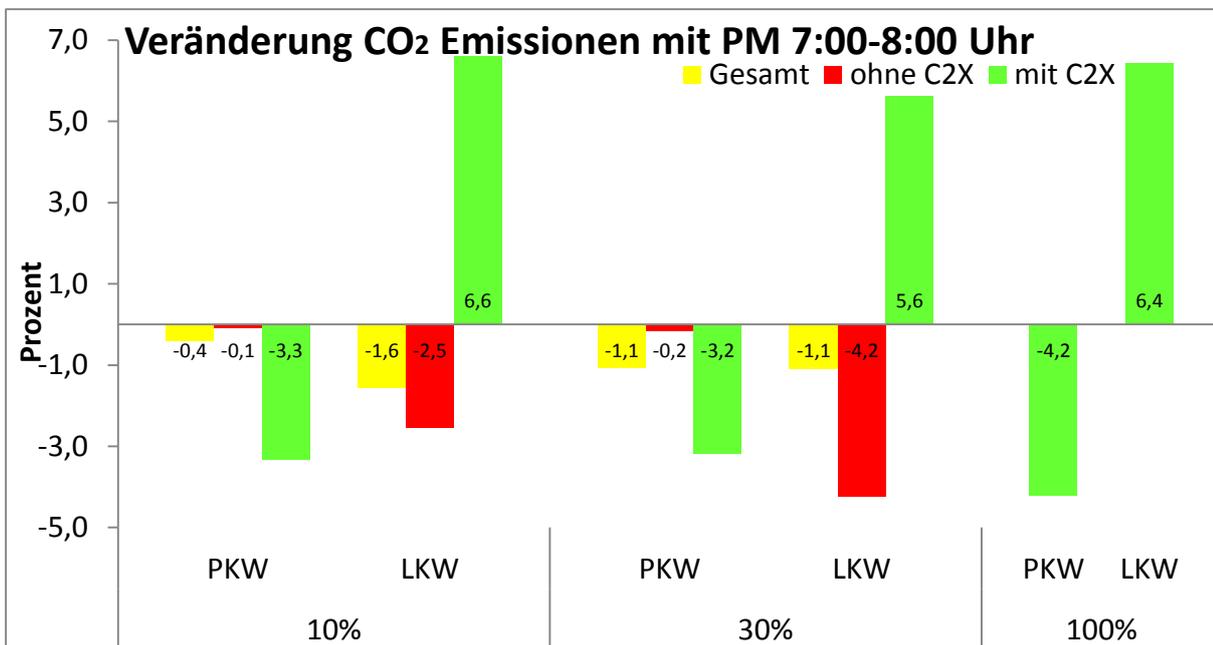


Abb. 7-11 Veränderungen der CO₂ Emissionen gegenüber dem Ausgangsszenario mit Pulkmanagement für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr für PKW und LKW

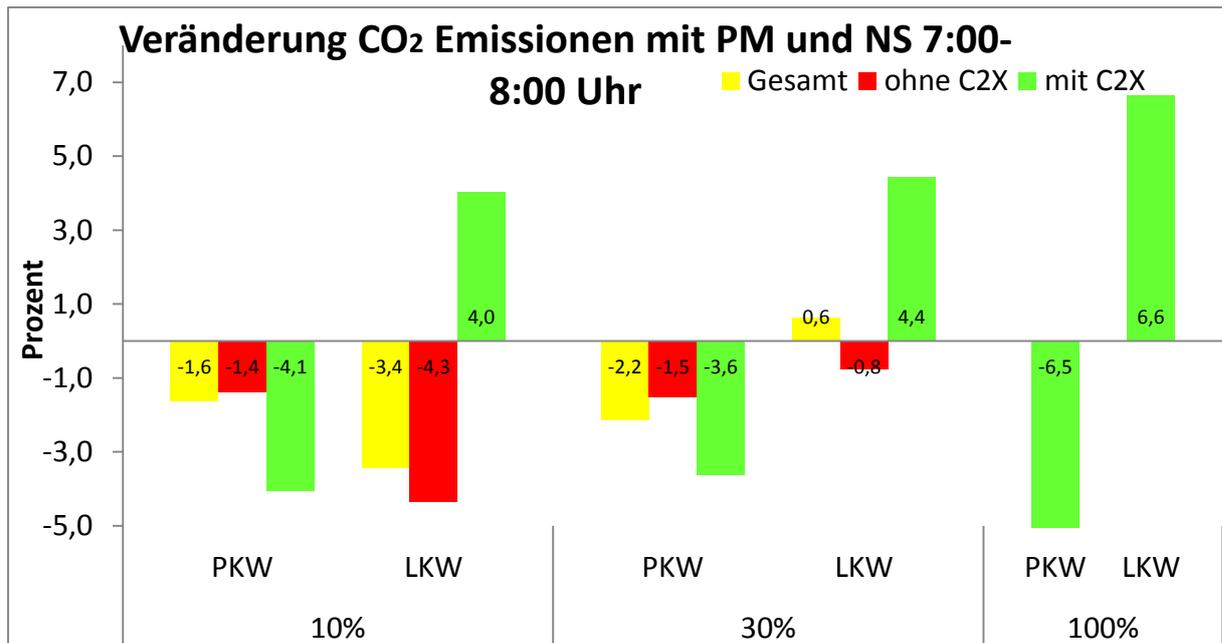


Abb. 7-12 Veränderungen der CO₂ Emissionen gegenüber dem Ausgangsszenario mit Pulkmanagement und Netzsteuerung für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr für PKW und LKW

Für alle Ausstattungsszenarien reduzieren sich für PKW die CO₂ Emissionen sowohl für ausgestattete als auch für nicht ausgestattete Fahrzeuge mit Pulkmanagement. Dabei reduzieren sich die Emissionen für ausgestattete Fahrzeuge wie zu erwarten stärker als für nicht ausgestattete Fahrzeuge. Diese profitieren, da sie von den ausgestatteten Fahrzeugen beeinflusst werden. Die zusätzliche Netzsteuerung verstärkt diesen Trend in jedem Szenario.

Das Pulkmanagement führt bei den ausgestatteten LKW zu einer Erhöhung der CO₂ Emissionen, wogegen die nicht ausgestatteten LKW, wie auch bei den PKW, von der Interaktion mit den beeinflussten Fahrzeugen profitieren. Bei den LKW verstärkt die Netzsteuerung diesen Trend wiederum. Durch die höheren Grundemissionen beeinflusst dieser Effekt das Gesamtergebnis, trotz des geringeren Gesamtanteils der LKW am Gesamtverkehrsaufkommen (4-6 Prozent in Abhängigkeit des Nachfrageszenarios, überdurchschnittlich). Dies führt für manche Nachfragestunden und Ausstattungsszenarien teilweise sogar zu einer Erhöhung der Gesamtemissionen.

Die Erhöhung der CO₂ Emissionen kann damit auf das Pulkmanagement und dessen Beeinflussung der Wunschgeschwindigkeit zurückgeführt werden. Die Netzsteuerung beeinflusst den Effekt nur tendenziell. Der Grund für die beschriebenen Effekte liegt im Verkehrsfluss der ausgestatteten Fahrzeuge und lässt sich mittels einer mikroskopischen Betrachtung der Fahrzyklen erklären. Dazu wurden sekundliche Daten aus einem Zeitraum von 1800 Sekunden für die erste Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr mit und ohne Pulkmanagement ausgewertet. Abb. 7-13 zeigt die in VISSIM versorgten und die von den PKW tatsächlich realisierten mittleren Beschleunigungen. In Abb. 7-14 sind diese Beschleunigungen für LKW dargestellt.

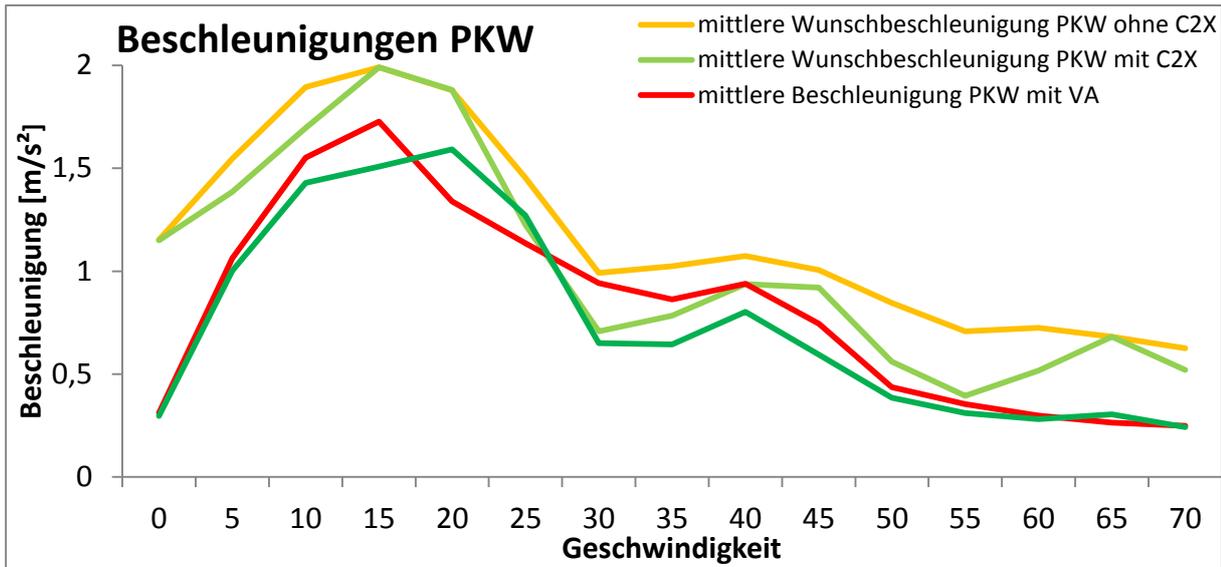


Abb. 7-13 Vergleich der in VISSIM versorgten und der gefahrenen mittleren Beschleunigungen für PKW

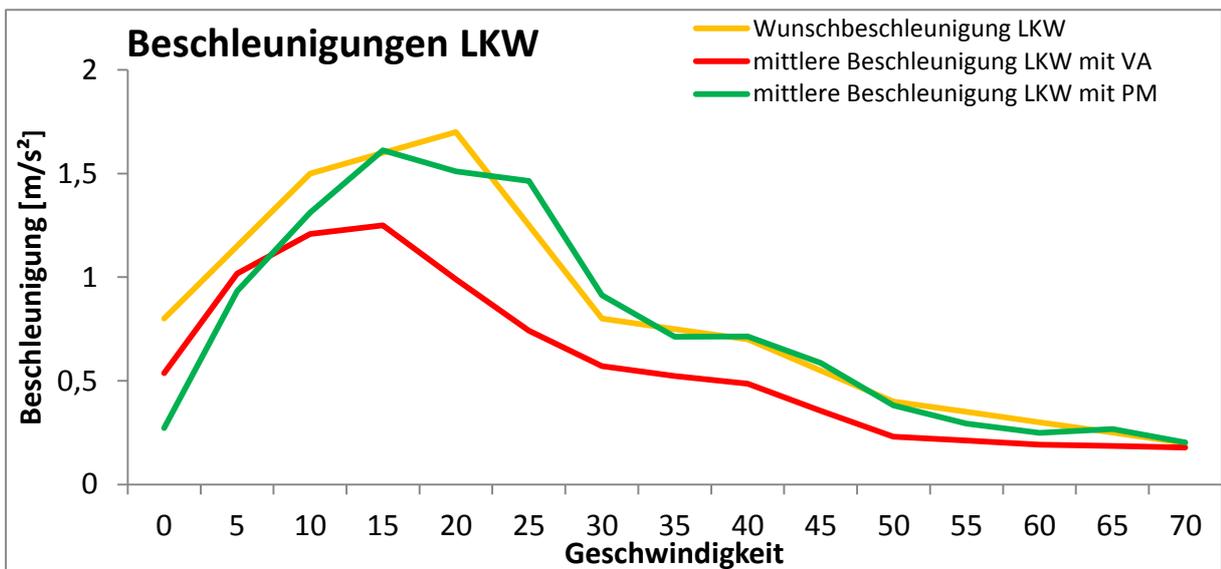


Abb. 7-14 Vergleich der in VISSIM versorgten und der gefahrenen mittleren Beschleunigungen für LKW

Für die PKW zeigt sich mit Pulkmanagement kein allzu großer Unterschied der mittleren realisierten Beschleunigungen. Durch die etwas geringeren mittleren Wunschbeschleunigungen für ausgestattete Fahrzeuge findet allerdings eine Annäherung zwischen Wunschbeschleunigungen und realisierten Beschleunigungen statt.

Bei den LKW ist die Differenz zwischen Wunschbeschleunigung und realisierter Beschleunigung für die Ausgangssituation ohne Pulkmanagement prozentual größer, als dies bei den PKW der Fall ist. Mit Pulkmanagement gleicht sich die realisierte Beschleunigung der Wunschbeschleunigung nahezu an. Die Summe der Beschleunigungen bleibt dabei allerdings konstant.

Sowohl für PKW als auch für LKW deutet die Annäherung der realisierten Beschleunigungen an die Wunschbeschleunigungen auf einen besseren Verkehrsfluss hin. Durch die höheren Beschleunigungen kommt es allerdings, besonders bei den LKW, zu deutlich höheren CO₂ Emissionen.

NO_x Emissionen

Stickstoffoxide (NO_x) sind verantwortlich für den sogenannten „sauren Regen“ und tragen wesentlich stärker zum Treibhauseffekt bei als CO₂. Sie entstehen hauptsächlich durch Dieselmotoren (nach Euro 5 Norm ist der erlaubte Ausstoß von NO_x für Dieselmotoren dreimal so hoch wie für Ottomotoren, dies wird durch die Euro 6 Norm deutlich reduziert [EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT, 2007]). Abb. 7-15 stellt die NO_x Emissionen pro Fahrzeug für die Spitzenverkehrsstunde von 7:00 bis 8:00 Uhr dar. In Tab. 7-7 werden die prozentualen Veränderungen dargestellt.

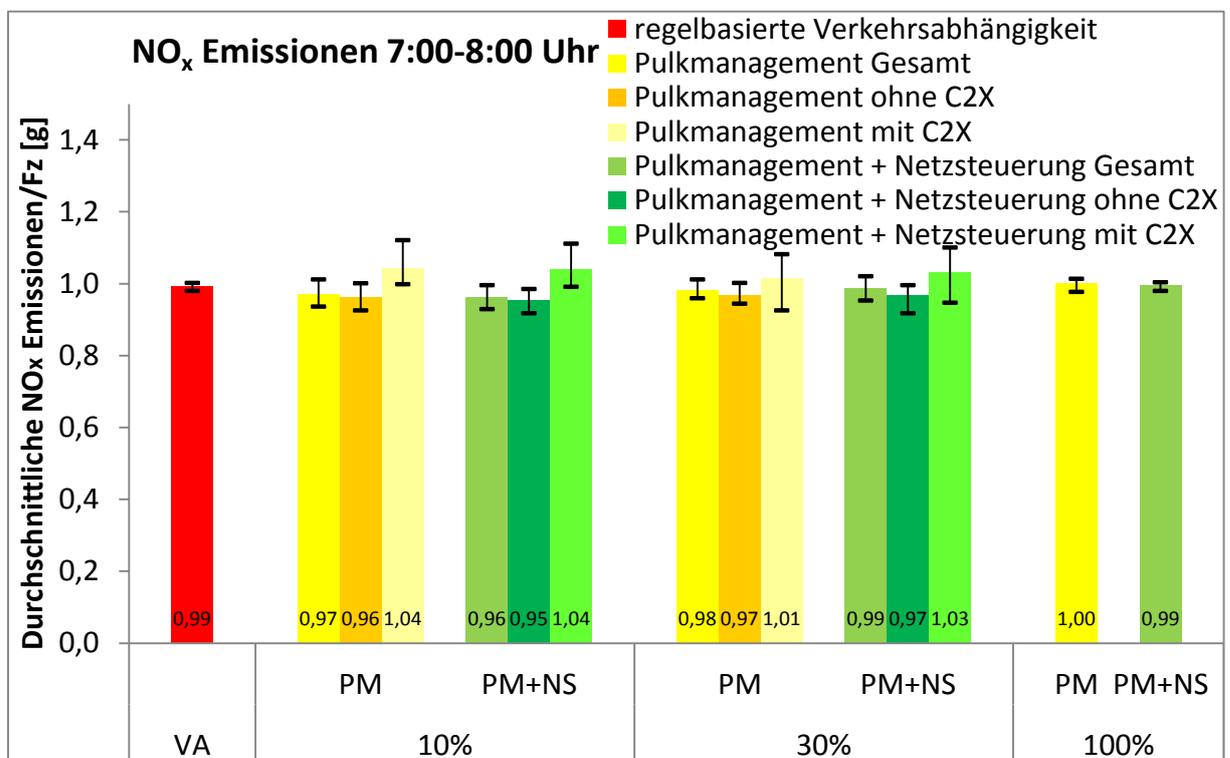


Abb. 7-15 Durchschnittliche NO_x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr

Durchschnittliche prozentuale Veränderungen										Konfidenzintervall
Ausstattungsrate	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	> 95%
10%	-2,3%	-3,1%	4,9%	-3,0%	-3,9%	4,6%	-0,7%	-0,8%	-0,3%	>80% und < 95%
30%	-1,1%	-2,5%	2,2%	-0,5%	-2,5%	3,8%	0,6%	1,6%	1,6%	< 80%
100%	0,6%	-	0,6%	0,2%	-	0,2%	-0,5%	-	-0,5%	nicht signifikant

Tab. 7-7 Prozentuale Veränderungen der NO_x Emissionen für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr

Für die Spitzenstunde reduzieren sich die NO_x Emissionen pro Fahrzeug mit Pulkmanagement um durchschnittlich bis zu 2,3 Prozent gegenüber der Ausgangssituation. Die Reduzierung ist nur für eine Ausstattungsrate von 10 Prozent mit einem Konfidenzintervall von über 95 Prozent signifikant. Mit zusätzlicher Netzsteuerung reduzieren sich die NO_x Emissionen um durchschnittlich bis zu 3,0 Prozent. Auch hier ist die Reduzierung wiederum nur für eine Ausstattungsrate von 10 Prozent mit einem Konfidenzintervall von über 95 Prozent signifikant. In beiden Fällen reduziert sich der NO_x Ausstoß pro Fahrzeug für die nicht ausgestatteten Fahrzeuge, während dieser für die ausgestatteten Fahrzeuge steigt. Für die höheren Ausstattungs-raten heben sich diese Effekte im Gesamtergebnis gegenseitig auf.

Abb. 7-16 stellt die CO₂ Emissionen für die Nebenverkehrsstunde von 10:00 bis 11:00 Uhr dar. In Tab. 7-8 werden die zugehörigen prozentualen Veränderungen dargestellt.

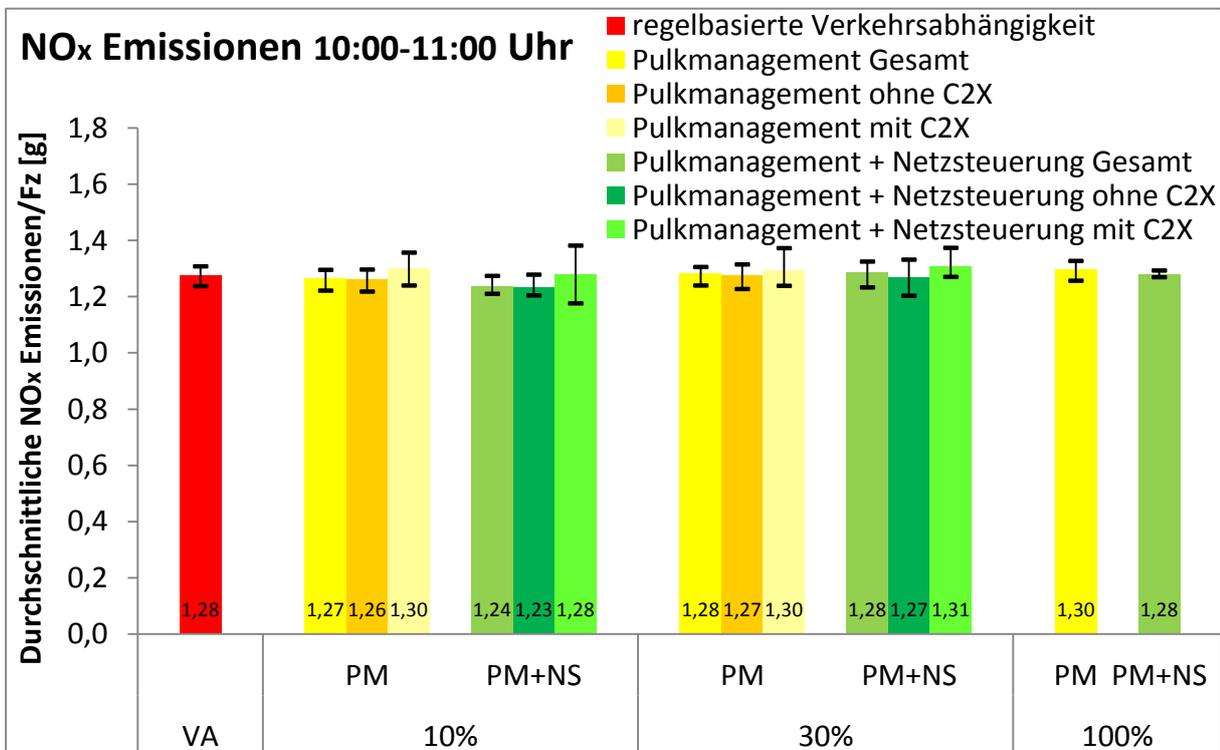


Abb. 7-16 Durchschnittliche NO_x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr

Durchschnittliche prozentuale Veränderungen										Konfidenzintervall
Ausstattungsrate	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	> 95%
10%	-0,8%	-1,1%	1,9%	-3,1%	-3,4%	0,1%	-2,3%	-2,3%	-1,7%	>80% und < 95%
30%	0,4%	-0,1%	1,5%	0,7%	-0,5%	2,4%	0,3%	0,9%	0,9%	< 80%
100%	1,6%	-	1,6%	0,2%	-	0,2%	-1,4%	-	-1,4%	nicht signifikant

Tab. 7-8 Prozentuale Veränderungen der NO_x Emissionen für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr

Für die Nebenverkehrsstunde verringern sich die durchschnittlichen NO_x Emissionen pro Fahrzeug mit Pulkmanagement um durchschnittlich 0,8 Prozent gegenüber der Ausgangssituation für eine Ausstattungsrate von 10 Prozent. Für höhere Ausstattungsraten erhöht sich der NO_x um durchschnittlich 1,6 Prozent. Wie auch für die Spitzenverkehrsstunde verringern sich die Emissionen für nicht ausgestattete Fahrzeuge, während sie sich für ausgestattete Fahrzeuge erhöhen. Für das Pulkmanagement sind diese Effekte allerdings nicht signifikant. Mit zusätzlicher Netzsteuerung reduzieren sich die NO_x Emissionen pro Fahrzeug durchschnittlich um bis zu 3,1 Prozent für eine Ausstattungsrate von 10. Hier sind die Änderungen mit einem Konfidenzintervall von 95 Prozent signifikant. Für die höheren Ausstattungsraten neutralisieren sich die Effekte von ausgestatteten und nicht ausgestatteten Fahrzeugen nahezu.

Die NO_x Emissionen reduzieren sich für alle Nachfragestunden im Gesamten nur für eine Ausstattungsrate von 10 Prozent. Das Verbesserungspotential hängt hier, wie auch bei allen anderen Kenngrößen, stark von der Ausgangssituation ab. Für höhere Ausstattungsraten heben sich die Verbesserungen für PKW und die Verschlechterungen für LKW auf oder drehen den Effekt sogar teilweise um. Dieser Effekt beruht, wie auch schon bei den CO₂ Emissionen, auf den höheren Beschleunigungen ausgestatteter LKWs. Im Gegensatz zu den CO₂ Emissionen wirkt sich dieser aber stärker aus, da die NO_x Emissionen vermehrt von Dieselmotoren ausgestoßen werden. Dieselmotoren haben bei den LKW einen 100 prozentigen Anteil, während dieser bei den PKW nur 30 Prozent beträgt. Mit zusätzlicher Netzsteuerung verbessern sich die Ergebnisse für alle Ausstattungsraten und Nachfragestunden. Diese Tendenz ist für höhere Ausstattungsraten größer.

7.4 Zusammenfassung der Bewertung

Für das bewertete Testfeld wurden die verkehrlichen Kenngrößen Fahrtzeit und Anzahl der Halte sowie die Emissionskenngrößen CO₂ und NO_x Emissionen pro Fahrzeug ausgewertet. Dabei wurde zwischen ausgestatteten und nicht ausgestatteten Fahrzeugen unterschieden. Untersucht wurden ein Pulkmanagement mit Festzeitsteuerung sowie ein Pulkmanagement (PM) kombiniert mit einer Netzsteuerung (PM+NS) zur Optimierung der Versatzeiten. Die

wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammenfasst und mit der Ausgangssituation, einer koordinierten lokalen regelbasierten verkehrsabhängigen Steuerung (VA), die der Steuerung im realen Testfeld entspricht, verglichen.

Für das Pulkmanagement verbessert sich die Fahrtzeit unabhängig von der Ausstattungsrate. Für die Hauptverkehrszeit beträgt die Verbesserung zwischen 0,4 und 3,4 Prozent, für die Nebenverkehrszeit sind es zwischen 2,4 und 13,8 Prozent. Ausgestattete Fahrzeuge schneiden dabei etwas schlechter ab, da sie aufgrund ihrer angepassten niedrigeren Geschwindigkeit von nicht ausgestatteten Fahrzeugen überholt werden. Alle Veränderungen sind mit Ausnahme einer Stunde nicht mit einem Konfidenzintervall von 95 Prozent signifikant. Die Anzahl der Halte reduziert sich unabhängig von der Verkehrsnachfrage. Höhere Ausstattungsraten führen dabei zu weniger Halten, wobei ausgestattete Fahrzeuge seltener anhalten müssen als nicht ausgestattete Fahrzeuge. Für eine Ausstattungsrate von 10 Prozent verringert sich die Anzahl der Halte zwischen 0,2 und 14,2 Prozent. Für eine Ausstattungsrate von 100 Prozent sind dies zwischen 1,0 und 19,6 Prozent. Insgesamt ist die Verbesserung hier größer als für die Fahrtzeiten und damit auch häufiger mit einem Konfidenzintervall von über 95 Prozent signifikant. Für die verkehrlichen Kenngrößen ergibt sich kein Unterschied zwischen PKW und LKW.

Bei den CO₂ Emissionen verbessert sich der Ausstoß pro Fahrzeug mit Pulkmanagement für fast alle Nachfragestunden, wobei höhere Ausstattungsraten auch zu höheren Einsparungen führen. Wie bei der Anzahl der Halte schneiden ausgestattete Fahrzeuge hier im Allgemeinen besser ab. Allerdings ergibt sich bei einer Differenzierung zwischen ausgestatteten PKW und ausgestatteten LKW ein großer Unterschied. Während sich der CO₂ Ausstoß für ausgestattete PKW zwischen 2,9 und 4,6 Prozent verringert, erhöht sich der Ausstoß für LKW zwischen 5,6 und 11,4 Prozent. Dies liegt am für die ausgestatteten LKW freieren Verkehrsfluss und den damit verbundenen höheren umgesetzten Beschleunigungen. Bei den NO_x ergeben sich aus diesem Grund keine signifikanten Änderungen für die Gesamtflotte. Während sich die Emissionen für die nicht ausgestatteten Fahrzeuge zwischen 0 und 3,5 Prozent reduzieren, verändern sich diese, aufgrund der Dieselmotoren der LKW, für ausgestattete Fahrzeuge zwischen minus 0,8 und 7,2 Prozent.

Die zusätzliche Netzsteuerung hat im Gegensatz zum Szenario mit reinem Pulkmanagement auf die Fahrtzeiten nur für eine Nachfragestunde einen signifikanten Einfluss mit einem Konfidenzintervall von über 95 Prozent. In allen anderen Fällen sind die Änderungen nahe Null. Bei der Anzahl der Halte ergeben sich im Vergleich zum Szenario nur mit Pulkmanagement tendenziell Verbesserungen, dort allerdings sind diese mit wenigen Ausnahmen nicht signifikant. Anders ist dies bei den CO₂ Emissionen, dem Optimierungsziel der Netzsteuerung, ergeben sich weitere Reduzierung von circa zwei Prozent für alle Nachfragestunden. Diese Verbesserung ist im Besonderen für eine Ausstattungsrate von 100 Prozent mit einem Konfidenzintervall von über 95 Prozent signifikant. Die NO_x Emissionen verbessern sich mit zusätzlicher Netzsteuerung für alle Ausstattungsraten und Nachfragestunden. Dieser Effekt ist für höhere Ausstattungsraten auch tendenziell höher.

Allgemein hängen die relativen Verbesserungen stark von der Ausgangssituation ab. Für Nachfragestunden, in denen die Signalsteuerung schlecht an die Verkehrsnachfrage angepasst ist, ergeben sich von vornherein schlechtere Werte für alle untersuchten Kenngrößen. Demzufolge können diese von den untersuchten Applikationen auch am stärksten verbessert werden.

7.5 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die absoluten Änderungen untersuchter verkehrlicher sowie emissionsbasierter Kenngrößen hängen in der Regel stark von den im jeweils untersuchten Testfeld vorliegenden Randbedingungen ab. Dies sind etwa die Netzstruktur, die versorgte Steuerung sowie die Verkehrsnachfrage. Im Folgenden wird daher versucht, anhand der Ergebnisse und beobachteten Effekte, allgemeine Faktoren abzuleiten um die Resultate beziehungsweise die Anwendbarkeit der Applikationen auf andere Testfelder übertragen zu können.

Die Netzsteuerung optimiert die Versatzzeit sowie die Progressionsgeschwindigkeit. Um eine ideale Koordinierung für den durchgehenden Verkehr erreichen zu können, sollten die Knotenpunkte im sogenannten Teilpunktabstand liegen. „Liegt ein Knotenpunkt genau im Teilpunkt, erreicht die verfügbare Zeitdauer für die Freigabezeiten der querenden Richtungen und der erforderlichen Zwischenzeiten bei vorgegebener Umlaufzeit ihr Maximum. Die Grünbänder überlappen sich vollständig“ [FGSV, 2010a]. Da der Teilpunktabstand neben der Umlaufzeit auch von den Progressionsgeschwindigkeiten der Hin- und Rückrichtung abhängt, lässt sich für die Netzsteuerung für unterschiedliche Knotenpunktabstände eine ideale Koordinierung finden. Abb. 7-17 stellt den Teilpunktabstand in Abhängigkeit der Progressionsgeschwindigkeit und der Umlaufzeit dar. Für die in der Bewertung des Systems vorliegenden Randbedingungen mit einer Umlaufzeit von 90 Sekunden, einem Geschwindigkeitslimit von 60 km/h und einer minimal empfohlenen Geschwindigkeit von 40 km/h ergibt sich so ein Teilpunktabstand zwischen 750 Metern und 500 Metern, in dem eine ideale Koordinierung für den Verkehr entlang eines Streckenzuges erreicht werden kann. Die im Testfeld vorhandenen Knotenabstände liegen mit etwa 230 Metern, 370 Metern und 410 Metern unterhalb dieses Bereiches. Größere Knotenpunktabstände einerseits oder eine geringere Umlaufzeit beziehungsweise kleinere minimale Geschwindigkeitsempfehlungen andererseits, die zu geringeren Teilpunktabständen führen würden, würden daher bei sonst gleichen Randbedingungen zu einer besseren Koordinierung führen.

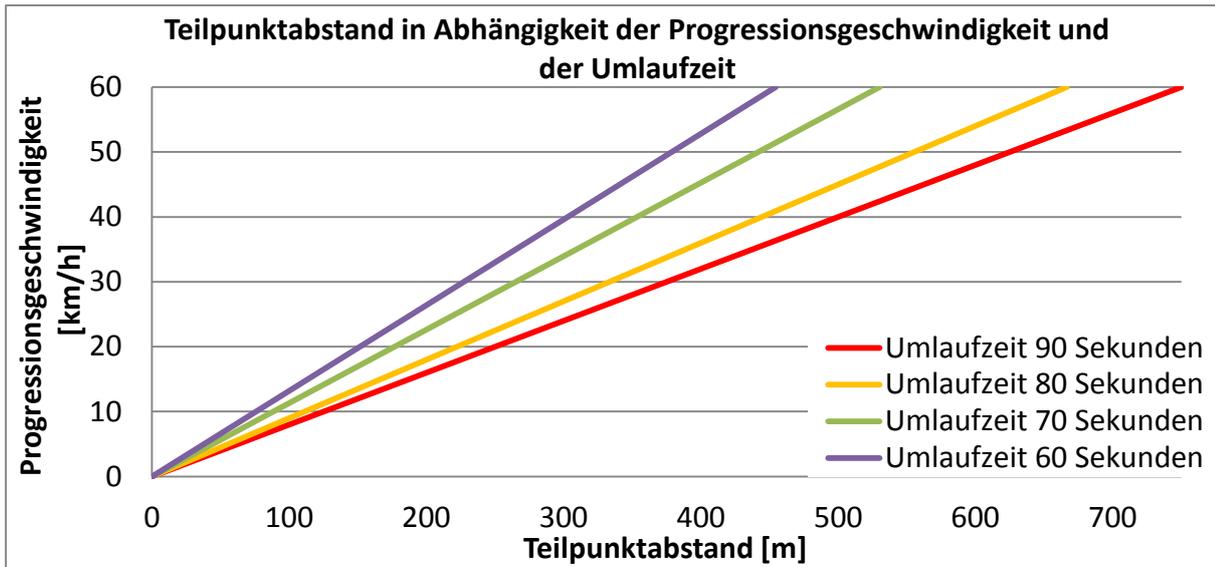


Abb. 7-17 Teilpunktabstand in Abhängigkeit der Progressionsgeschwindigkeit und der Umlaufzeit

Je größer die Knotenpunktabstände, desto mehr kann die Ankunft einzelner Fahrzeuge oder eines Pulks, bei einer festgelegten gleichen minimalen Geschwindigkeitsempfehlung, verzögert werden. Abb. 7-18 zeigt ein Zeit-Weg-Diagramm inklusive der durch die Geschwindigkeitsempfehlung erweiterten Grünbänder für das untersuchte Testfeld.

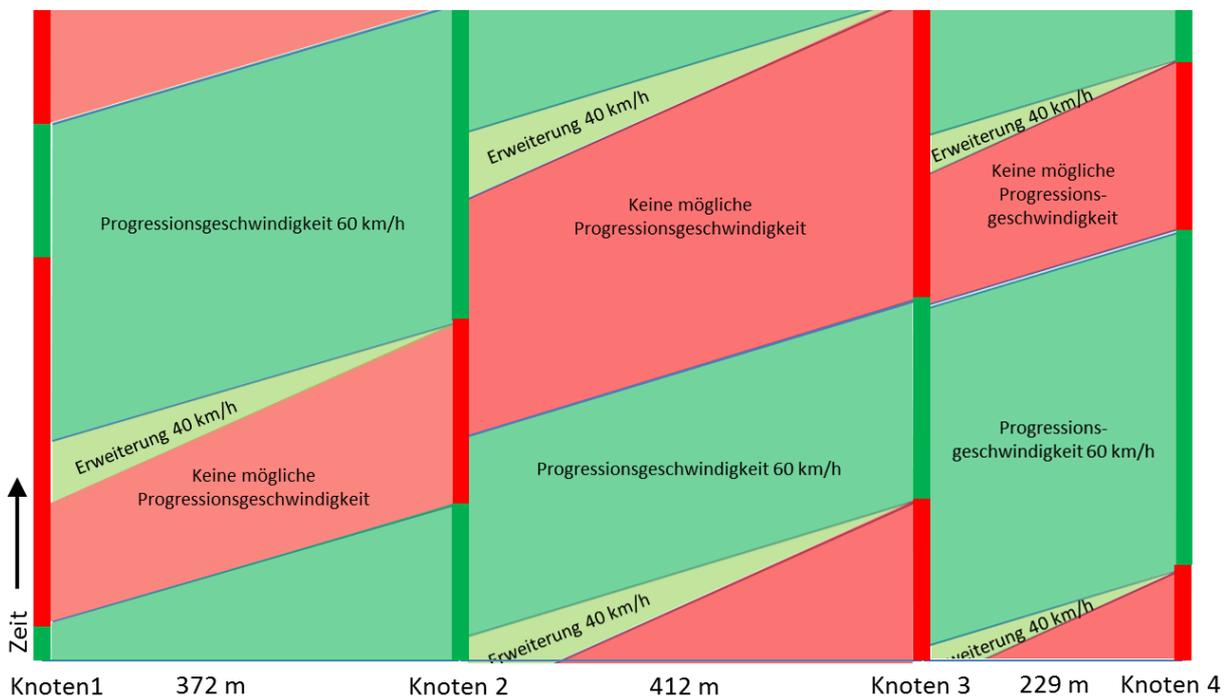


Abb. 7-18 Zeit-Weg-Diagramm mit Darstellung der durch die Geschwindigkeitsempfehlung erweiterten Grünbändern für das Testfeld

Je größer der Knotenpunktabstand, desto breiter kann auch der durch die Geschwindigkeitsempfehlung erweiterte Bereich werden. Begrenzt wird dies nach VAN KATWIJK ET AL. [2013] nur durch die geringe Befolgung der Geschwindigkeitsempfehlung, sobald die Signalgeber der

Lichtsignalanlage außerhalb der Sichtweite der Fahrer sind. Im Gegensatz zu den Überlegungen zum Teilpunktabstand können hier auch Einbieger in bestimmten Fällen profitieren. Dies ist dann der Fall, wenn der erweiterte Bereich, wie in der Abbildung, auf eine Sperrzeit der Hauptrichtung trifft, in der die Nebenrichtungen eine Freigabe haben. Abbieger, die nicht mit dem Verkehrsstrom der Hauptrichtung freigegeben werden, sollten hingegen keine auf Ihre Signalgruppe abgestimmte Geschwindigkeitsempfehlung bekommen, da sie sonst den Hauptverkehrsstrom behindern können. Falls es wie im bewerteten Testfeld große Abbiegeströme gibt, mindert dies die Effektivität des Systems.

Wie bereits erläutert kann durch eine niedrigere empfohlene Geschwindigkeit sowohl eine ideale Koordinierung für geringere Knotenpunktabstände für die Hauptverkehrsströme erreicht werden als auch für Einbieger durch die Erweiterung des Grünbands. Für die Bewertung wurde die niedrigste empfohlene Geschwindigkeit auf 70 Prozent des Geschwindigkeitslimits festgelegt. Dieser Wert beruht auf Erfahrungen bisheriger realer Umsetzungen, da eine niedrigere Geschwindigkeit aufgrund der geringen Verbreitung und der damit verbundenen Unkenntnis von Fahrern nicht ausgestatteter Fahrzeuge nicht akzeptiert wird und beispielsweise zu sehr geringen Sicherheitsabständen führt. Es ist davon auszugehen, dass bei höheren Ausstattungsraten und einer steigenden Bekanntheit derartiger Systeme auch die Akzeptanz bei Fahrern ohne System steigt und somit der beschriebene Effekt nicht mehr auftritt.

Im untersuchten Testfeld gibt es zwei bis drei Richtungsfahrstreifen. Dies führt bei niedrigeren Ausstattungsraten dazu, dass ausgestattete Fahrzeuge von nicht ausgestatteten Fahrzeugen überholt werden. Der Gesamtpulk der Fahrzeuge wird damit abgebremst und erreicht die Halteinie, wie beabsichtigt, später. Allerdings wird die exakte Zuteilung der Zeitlücken an der Halteinie gestört, und das Pulkmanagement kann möglichst dichte Pulks zur bestmöglichen Ausnutzung der Kapazität nicht immer gewährleisten. Mit einer geringeren Anzahl an Richtungsfahrstreifen sollten die mit hohen Ausstattungsraten erzielten Verbesserungen bereits mit geringeren Ausstattungsraten zu erzielen sein. Auch OTTO [2011] macht diese Beobachtungen.

Grundsätzlich lässt sich das System auch auf die aktuell in der Forschung führenden Themen anwenden. Dies ist zum einen die Elektromobilität. Da für die Optimierung die CO₂ Emissionen gewählt wurden und diese mit dem Kraftstoffverbrauch und damit mit dem Energieverbrauch korrelieren, ist es denkbar diese mittels entsprechender Motorkennfelder in die Optimierung einzubinden. Elektromotoren erzeugen zwar lokal keine Emissionen, allerdings entstehen diese bei der Erzeugung von Elektrizität, wenn dies nicht ausschließlich regenerativ erfolgt. Gerade bei klimaschädlichen Emissionen ist der Ort der Entstehung nicht relevant. Grundsätzlich haben Elektromotoren einen höheren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren und können zudem Bremsenergie zurückgewinnen. Dies sollte damit in der Summe zu weniger Emissionen führen. Nachteile sind die geringere Reichweite aufgrund der begrenzten Batteriekapazitäten und die langen Ladezeiten dieser, weshalb ihre Durchdringung noch relativ gering aber steigend ist. Auf die Fahrdynamik und damit auf die verkehrlichen Kenngrößen ist ihr Einfluss hingegen gering.

Ein zweiter Schwerpunkt der Forschung ist momentan das autonome Fahren. Im Gegensatz zum Fahrer kann ein fahrzeugseitiges System zur längsdynamischen Regelung des Fahrzeugs eine vorgegebene Geschwindigkeit exakt einhalten. Dies würde zu einer geringeren Streuung der Geschwindigkeiten und damit zur besseren Einhaltung der vom Pulkmanagement vorgegebenen Ankunftsverteilung führen. Zusätzlich ist das Verhalten eines fahrzeugseitigen Systems besser vorhersagbar als das eines menschlichen Fahrers. Dies ermöglicht auch anderen fahrzeugseitigen Systemen eine bessere Anpassung ihrer Regelung.

Das für die Bewertung verwendete Testfeld stellt bezüglich der Randbedingungen schlechte Voraussetzungen für das getestete System dar. So sind die Knotenpunktabstände relativ kurz, es gibt stärkere Abbiegeströme und die Anzahl der Richtungsfahrstreifen ist hoch. Zudem wurde das System, aufgrund von Erfahrungen realer Umsetzungen, nur mit einer minimalen Geschwindigkeitsempfehlung getestet, die 70 Prozent des Geschwindigkeitslimits beträgt. Ferner stellt die verwendete Rückstaulängenschätzung von SANTA [2014] nur eine Zwischenentwicklung dar. Die Rückstaulängenschätzung wurde nur mit den vorversorgten Standardparametern genutzt. Diese sind in der verwendeten Version nicht validiert. Die Ergebnisse stellen damit in Bezug auf die Rückstaulängenschätzung nur die minimal durch das System zu erreichenden Verbesserungen dar. Im Allgemeinen sind bei günstigeren Randbedingungen auch bessere Ergebnisse zu erwarten.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Im abschließenden Kapitel der Arbeit werden die wesentlichen Punkte noch einmal zusammengefasst. Zudem wird auf potentielle Verbesserungen des entwickelten Systems, Anknüpfungspunkte an die aktuelle Praxis und weiteren Forschungsbedarf eingegangen.

8.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein echt kooperatives Verfahren, bestehend aus einer Netzsteuerung und einem Pulkmanagement, entwickelt. Dazu wurde im ersten Schritt eine umfassende Literaturanalyse durchgeführt, die alle für die Entwicklung notwendigen Teilbereiche umfasst. Zudem werden die entwickelten Komponenten in einen Systemzusammenhang gebracht.

Die entwickelte Netzsteuerung optimiert dabei die Versatzzzeit und die Progressionsgeschwindigkeiten der Hauptverkehrsströme, die durch das Pulkmanagement entsprechend beeinflusst werden können. Da die Optimierung auf CO₂ Emissionen erfolgt, wird ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell (mit dem psycho-physischen Fahrzeugfolgemodell nach WIEDEMANN [1972] in VISSIM) in Kombination mit einem Emissionsmodell (EnViVer) verwendet. Eine Optimierung auf Grundlage der Anzahl der Halte führt mit einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell dabei nicht zu einer konsistenten Lösung. Da die Ankunftsverteilung durch das Pulkmanagement bekannt ist, kann die Optimierung abschnittsweise für je zwei benachbarte Knotenpunkte erfolgen. Es wird nachgewiesen, dass die Optimierung der Netzsteuerung technisch funktioniert und theoretisch für den Echtzeitbetrieb geeignet ist, da sich die Lösungssuche auch für größere Netze immer auf Teilnetze, reduzieren lässt, welche parallel in verteilten Systemen berechnet werden können.

Das entwickelte Pulkmanagement optimiert die Ankunftsverteilung der Fahrzeuge, indem sie ihnen fahrstreifenfein Zeitlücken an der Haltelinie zuweist. Zur Berücksichtigung der Verkehrslage wird die Rückstaulängenschätzung von SANTA [2014] verwendet, die den Rückstau fahrstreifenfein schätzt. Durch die Zuweisung der Zeitlücken kann, im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen, nicht nur das einzelne Fahrzeug, sondern auch die Steuerung einen Nutzen ziehen. Daher wird das Gesamtsystem von einem interagierenden zu einem echt kooperativen System.

Um das Fahrverhalten und damit die Emissionen mit und ohne fahrzeugseitigem System realitätsnah abzubilden wurde das Fahrverhalten mittels mehrerer Fahrsimulatorstudien und realen Messungen im Testfeld München für PKW anhand extra definierter Szenarien kalibriert und validiert. Es zeigt sich, dass die gefundenen Parameter deutlich von den in VISSIM vorgestellten Standardparametern abweichen.

Bei der abschließenden Bewertung des Systems zeigen sich mit den gegebenen Randbedingungen für alle verkehrlichen und Emissionskenngrößen zum Teil deutliche Verbesserungen.

8.2 Ausblick

Grundsätzlich ist eine Koordination für den reinen Durchgangsverkehr einfach und auch manuell mittels Zeit-Weg-Diagramm umsetzbar. Dies geschieht meistens über eine Maximierung des Grünbands. Je mehr Ein- und Abbieger und damit unterschiedliche Fahrbeziehungen es gibt und je ausgeglichener die Verkehrsströme der Hin- und Rückrichtung in ihrer Verkehrsstärke sind, desto sinnvoller ist die Verwendung von modellbasierten Ansätzen, welche zusätzlich auch vor dem Pulk der Hauptrichtung befindliche Rückstaus erkennen und so in der Koordination berücksichtigen können. Eine Optimierung der Koordination hinsichtlich Emissionen ist nur über Modelle möglich. Leider haben derartige Ansätze bisher, zumindestens in Deutschland, kaum Marktdurchdringung erreicht. Für einen flächendeckenden Einsatz von intelligenter Lichtsignalsteuerung und einer damit einhergehenden zu erwartenden Verbesserung der Steuerung gilt es die im Folgenden erläuterten Hemmnisse zu überwinden. Bei den Echtzeitsystemen ist dies aufgrund der komplexen technischen Systeme, der mit dem System häufig verbundenen Bindung an einen bestimmten Steuergerätehersteller und der damit verbundenen Kosten verständlicher. Im ersten Schritt können modellbasierte Ansätze dazu auch hierzulande zur Planung eingesetzt werden [BRAUN UND WEICHENMEIER, 2005] und nicht nur im englischsprachigen Raum, wo sie bereits seit längerem weiter verbreitet sind [ROBERTSON, 1969]. Auf diese Weise kann erstes Verständnis der Systeme geschaffen werden ohne technische Details beachten zu müssen. Ein weiterer Hinderungsgrund ist, dass die modellbasierte Optimierung für viele eine Art Blackbox darstellt. Das heißt, die Ergebnisse sind nicht unbedingt für jeden zu erschließen, da besonders makroskopische Modelle nicht ohne weiteres visualisierbar sind. Hier bietet der Einsatz von mikroskopischen Modellen, wie es in dieser Arbeit der Fall ist, einen Vorteil, da eine Visualisierung möglich und verständlich ist. Die Kosten intelligenter Lichtsignalsteuerung werden sich durch die bereits angestoßene Standardisierung über OCIT (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems) [ODG, 2014] und OTS (Open Traffic Systems) [OCA, 2014] reduzieren lassen, da sich durch die standardisierten Schnittstellen auch einzelne Komponenten eines Systems im Wettbewerb auszeichnen lassen und somit für den Betreiber günstiger werden.

Wie aus der Bewertung des Ausgangsszenarios ersichtlich ist eine Beibehaltung der Steuerungsparameter über einen längeren Zeitraum (hier von 6:00 Uhr bis 12:00 Uhr) nicht die optimale Lösung. Eine Möglichkeit kann die oben beschriebene adaptive Steuerung der Lichtsignalanlagen sein. Technisch und auch algorithmisch einfacher umsetzbar ist meist eine regel- oder auch modellbasierte Signalprogrammwahl. Ein weiterer Ansatz kann hier sein nicht die Steuerung an die Ankunftsverteilung der Fahrzeuge anzupassen sondern die Ankunftsverteilung der Fahrzeuge an die Steuerung. Dies kann, bei Verwendung lokaler Festzeit anstatt bisher üblicher regelbasierter Verkehrsabhängigkeit, zu einem geringeren Planungsaufwand führen. Durch die inzwischen sehr große Verbreitung von Smartphones, die neben den ins

Fahrzeug eingebauten Systemen zur Fahrerinformation dienen können, ist eine hohe Durchdringungsrate hier in einem absehbaren Zeitraum möglich. Zudem sollte sich, mit der Kenntnis derartiger Systeme, auch das Verhalten nicht informierter Fahrer ändern, da diese ein geändertes Fahrverhalten aufgrund von Geschwindigkeitsempfehlungen gegebenenfalls interpretieren können und so anders darauf reagieren, als dies bei bisherigen Pilotprojekten der Fall war.

Weiteres Verbesserungspotential bezüglich des in dieser Arbeit vorgestellten Systems besteht für die Netzsteuerung in der Berücksichtigung der Progressionsgeschwindigkeiten der Einbiegeströme im Rahmen der Optimierung. Dies vergrößert den Lösungsraum. Eine Erhöhung der Rechengeschwindigkeit der verwendeten mikroskopischen Verkehrsflusssimulation ist nicht möglich, wohl aber eine Parallelisierung der Bewertung der einzelnen Lösungen. Beispielsweise können Lösungsmengen mit jeweils gleichen Progressionsgeschwindigkeiten parallel bewertet werden.

Für das Pulkmanagement erscheint es sinnvoll, Abbiegeanteile bei der Zuweisung von Zeitfenstern an der Haltelinie zu berücksichtigen. Gerade bei hohen Abbiegeströmen, die nicht über die Signalgruppe des Hauptverkehrsstroms gesteuert werden und in der Regel über eigene Fahrstreifen verfügen, ist ohne diese Berücksichtigung zu beobachten, dass die vom Pulkmanagement beabsichtigte Verdichtung der Pulks nicht funktioniert. Hier könnte beispielsweise der Zeitbedarfswert mittels des Abbiegeanteils angepasst werden.

Wie gezeigt werden konnte, entsprechen die Standard VISSIM Parametersätze für PKW nicht der Realität. Aufgrund nicht zur Verfügung gestellter Daten konnte für das Fahrverhalten der LKW weder für unbeeinflusste Fahrer noch für beeinflusste Fahrer eine Kalibrierung vorgenommen werden. Die Funktionen für Wunschbeschleunigung und Wunschverzögerung beruhen daher teilweise auf Annahmen. Für eine realitätsnahe Bewertung, vor allem hinsichtlich der Emissionen, ist ein realitätsnahes Fahrverhalten allerdings essentiell. Da anzunehmen ist, dass auch Fahrerassistenzsysteme für LKW zu einer Reduzierung der Emissionen führen können, ist zu empfehlen auch die Parameter für LKW entsprechend zu kalibrieren, sobald entsprechende Daten vorliegen. Ein weiteres Augenmerk sollte in diesem Zusammenhang auch auf die Emissionsmodelle gerichtet werden. Da sich die Modellierung in mikroskopischen Verkehrsflussmodellen auf Fahrzeuge im Ganzen beschränkt, können für den Emissionsausstoß wichtige Eingangsdaten wie etwa die Gangwahl nicht abgebildet werden. Fahrerassistenzsysteme können darauf allerdings Einfluss nehmen. Gerade bei der Modellierung von Emissionen für LKW ist diese, aufgrund der im Vergleich zu PKW höheren Anzahl an Gängen, von größerem Einfluss.

Ein letzter Punkt, der im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden konnte, ist das Langzeitverhalten bezüglich der Geschwindigkeitsempfehlungen. Da es sich bei allen bisherigen Systemen um Pilotanwendungen handelt, liegen auch nur über einen kurzen Zeitraum Daten, meist weniger Fahrer vor, so dass nur kurzfristige Verhaltensänderungen messbar sind. Langfristig besteht hier einerseits die Möglichkeit, dass beim Fahrer ein Lerneffekt eintritt und er

später auch ohne Assistenzsystem eine optimierte Fahrweise hat. Andererseits kann auch der Effekt auftreten, dass der Fahrer sich über längere Zeit vom System bevormundet fühlt und dessen Anweisungen nicht mehr folgt oder das System abschaltet. Um diese Effekte in der Netzsteuerung und im Pulkmanagement berücksichtigen zu können, müsste dies in einer Langzeitstudie analysiert werden. „...aber das ist eine andere Geschichte und soll ein andermal erzählt werden.“ [ENDE, 1979]

Literaturverzeichnis

- AHN, K.; RAKHA, H.; TRANI, A.; VAN AERDE, M. [2002]: Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels, *Journal of Transportation Engineering*, 2002, Vol. 128, No.2,
- ALMASRI, E. [2006]: A New Offset Optimization Method for Signalized Road Networks. Doctoral thesis at the Institute of Transport, Road Engineering and Planning, Leibniz Universität, Hannover, Hannover, Germany
- AXHAUSEN, K. [1987]: Anmerkungen zu Robertson's Pulkauflösungmodell, *Straßenverkehrstechnik* 03/1987, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn
- BARTH, M.; AN, F.; YOUNGLOVE, T.; SCORA, G.; LEVINE, C.; ROSS, M.; WENZEL, T. [2000]: The development of a comprehensive modal emissions model, Final report to the National Cooperative Highway Research Program
- BELTRÁN, V. C. [2012]: Traffic data collection and statistical analysis of parameters used for urban traffic flow simulation within VISSIM (for the test site Munich), Masterarbeit am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München
- BELZNER, H. [2009]: Erkennung von Verkehrsstörungen unter Verwendung erweiterter fahzeuggenerierter Daten, Dissertation am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München
- BEZEMER A.; JANSE J.; VAN KONINGSBRUGGEN P.; KOENDERS E.; VAN DEN BIGGELAAR L. [2009]: ODYSA IN-CAR in Eindhoven. An in-car optimised dynamic speed advice helps to fine tune green sequences, *Proceedings of the 16th ITS World Congress*. Stockholm, Schweden
- BÖTTGER, R. [1972]: Optimale Koordinierung von Signalanlagen in einem Straßennetz (Planungs- und Steuerungsprogramm VERO)", *Straßenverkehrstechnik* 02/1972, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn
- BOLTZE, M.; BUSCH, F.; FRIEDRICH, B.; FRIEDRICH, M.; KOHOUTEK, S.; LÖHNER, H.; LÜßMANN, J.; OTTERSTÄTTER, T. [2010]: Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen – Endbericht. Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)
- BOLTZE, M.; BUSCH, F.; FRIEDRICH, B.; FRIEDRICH, M.; KOHOUTEK, S.; LÖHNER, H.; LÜßMANN, J.; OTTERSTÄTTER, T. [2011]: Amones - Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen. *Straßenverkehrstechnik* Hefte 5-7, 2011, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn
- BRAUN, R. [2008]: Ein echtzeitfähiger Evolutionärer Algorithmus zur netzweiten Optimierung der Lichtsignalsteuerung, Dissertation am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München

- 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
- BRAUN, R.; WEICHENMEIER, F. [2005]: Automatische Offline-Optimierung der lichtsignaltechnischen Koordinierung des MIV im städtischen Netz unter Verwendung genetischer Algorithmen. Straßenverkehrstechnik Hefte 5, 2005, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn
- BRILON, W.; WIETHOLT, T.; WU, N. [2007]: Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen. Berichte der BASt, Reihe Verkehrstechnik, Heft V 162
- BRILON, W.; HOHMANN, S.; GIULIANI, S.; WIETHOLT, T. [2013]: Verkehrsadaptive Netzsteuerungen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Verkehrstechnik, Heft V 230
- BROCKMANN, M.; LÖWENAU, J. [2012]: ecoSmartDriving HMI, Presentation Special Interest Session 41, Human Machine Interface to encourage an environmentally friendly driving behaviour, 19th ITS World Congress, Wien
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT [2013]: 39. Bundes-Immissionsschutzgesetz - Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge
- BUSCH, F.; KRUSE, G. [1993]: MOTION - ein neues Verfahren für die städtische Lichtsignalsteuerung in Netzen. Tagungsband HEUREKA '93, Karlsruhe.
- BUSCH, F., KRUSE, G. [2002]: MOTION for SITRAFFIC – Optimierung der Lichtsignalsteuerung im Einsatz, HEUREKA'02, Karlsruhe.
- BUSCH, F.; FRIEDRICH, M.; SCHILLER, C.; BAKIRCIOGLU, I.; BELZNER, H.; FIEDLER, I.; KOLLERMATSCHKE, I.; MANDIR, E.; PILLAT, J.; RIESS, S.; SNETHLAGE, M.; WINKLER, C.; ZIMMERMANN, F. [2012]: Wirkungen individueller und kollektiver Verkehrsinformation in Straßennetzen, Straßenverkehrstechnik Hefte 10-11, 2012, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn
- CEYLAN, H., BELL, M. [2004]: Traffic Signal Timing Optimisation based on Genetic Algorithm Approach, including Drivers' Routing. In: Transportation Research B 38
- CHAUFFEUR 2 [1999]: Automated road transport and vehicles under electronic control, www.linuxworks.com/solutions/industrial/in-action/chauffeur2.php, abgerufen am 5.11.2013
- COHEN, D., HEAD, L., SHELBY, S.G. [2007]: Performance Analysis of Coordinated Traffic Signals During Transition. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2035, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- COMERT, G.; CETIN, M. [2009]: Queue length estimation from probe vehicle location and the impacts of sample size. European Journal of Operational Research, 197(1)
- DAGANZO, C. [1994]: The Cell Transmission Model: A dynamic Representation of Highway Traffic consistent with the Hydrodynamic Theory. In: Transportation Research B 28 (4)

- DAGANZO, C. [1995]: The Cell Transmission Model, Part II: Network Traffic. In: Transportation Research B 29 (2)
- DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT UND RAUMFAHRT (DLR) [2013]: Dynamischer Fahrsimulator www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-1236/1690_read-3257/, abgerufen am 29.10.2013
- DIAKAKI, C.; PAPAGEORGIU, M.; ABOUDOLAS, K. [2002]: A Multivariable Regulator Approach to Traffic-responsive Network-wide Signal Control, in Control Engineering Practice 10
- DINKEL, A.; KRAUS, M.; BENGLER, K.; ETTINGER, R.; VON DOBSCHÜTZ, A.; BÖLLINGER, F. [2013]: Cooperative Optimization of Traffic Signal Control and Driver Assistance Outside Urban Areas, Tagungsband mobil.TUM 2013 - ITS for Connected Mobility
- DITTRICH, C.; BUSCH, F. [2011]: Rückstaulängenschätzung zur verbesserten Geschwindigkeitsempfehlung im Fahrzeug, In Tagungsband HEUREKA '11, Optimierung in Verkehr und Transport, FGSV Verlag, Köln
- DONATI, F.; MAURO, V.; RONCOLINI, G.; VALLAURI, I. [1984]: A Hierarchical-Decentralized Traffic Light Control System – The First Realization: “Progetto Torino”. Proceedings of the 9th IFAC World Congress, Budapest, Hungary
- ECoMOVE [2011a]: Deliverable 2.3 Communication platform design specifications
- ECoMOVE [2011b]: Deliverable 5.2 Architecture and System Specification
- ECoMOVE [2012a]: Deliverable 5.4 Prototype Implementation of the applications and components. Internes Dokument
- ECoMOVE [2012b]: Deliverable 5.7 Development and Testing of Traffic Management and Control Measures
- ECoMOVE [2012c]: Deliverable 2.2 High level architecture
- ECoMOVE [2012d]: Deliverable 2.6 ecoMap specifications, Internes Dokument
- ECoMOVE [2012e]: Deliverable 2.13 Final report ecoMessages, internes Dokument
- ECoMOVE [2012f]: Deliverable 2.10 ecoStrategic Model
- ECoMOVE [2012g]: Deliverable 5.6 Prototype Implementation of the applications and components
- EIJK, A.; LIGTERINK, N.; INANC, S. [2011]: EnViVer 3.0 Pro and Enterprise Manual
- ENDE, M [1979]: Die unendliche Geschichte, Thienemann Verlag
- EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT [2007]: Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge.
- EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT [2008]: Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa

- EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE [2013]: EN 302 637-2 (Draft), Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service
- FAKLER O.; GEBENHARDT J.; LÜßMANN J.; BUSCH F. [2014]: Structures of Traffic Management and Control in German Cities, Proceedings 10th ITS European Congress, Helsinki
- FARZANEH, M. [2005]: Modeling traffic dispersion, Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg, VA.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA) [2004], Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software. Report FHWA-HRT-04-040, Washington, D.C.
- FLÖTTERÖD, G., NAGEL, K. [2005]: Some practical extensions to the Cell Transmission Model, Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Vienna, Austria, September 13-16
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN UND VERKEHRSWESEN (FGSV) [2001]: Leitfaden für die Verkehrsplanungen, FGSV Verlag, Köln
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN UND VERKEHRSWESEN (FGSV) [2003]: Hinweise zur Strategieentwicklung im dynamischen Verkehrsmanagement, FGSV Verlag, Köln
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) [2006], Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, FGSV Verlag, Köln
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN UND VERKEHRSWESEN (FGSV) [2009]: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2001, Fassung 2009, FGSV Verlag, Köln
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) [2010a], RiLSA, Richtlinien für Lichtsignalanlagen, FGSV Verlag, Köln
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN UND VERKEHRSWESEN (FGSV) [2010b]: Begriffsbestimmungen Verkehrsplanung, Straßenentwurf, Straßenbetrieb, unveröffentlichter Entwurf, FGSV Verlag, Köln
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN UND VERKEHRSWESEN (FGSV) [2014]: Hinweise für die Lichtsignalsteuerung in Straßennetzen, FGSV Verlag, Köln
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT KRAFTFAHRWESEN [2012]: PELOPS White paper
- FRIEDRICH, B. [1999]: Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen, Dissertation am Fachgebiet für Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München
- FRIEDRICH, B. [2002]: Verkehrsadaptive Steuerung von Lichtsignalanlagen - Ein Überblick, Festschrift zum Ehrenkolloquium für Univ.- Prof. Dr./UCB Hartmut Keller 1.3.2002 an der Technischen Universität München, Veröffentlichungen des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, München.

- FRIEDRICH, B.; WAGNER, P.; NIEBEL, W.; HERRMANN, A.; NAUMANN, S.; BLEY, O.; KUTZNER, O.; MAURER, M.; SAUST, F.; SCHÜLER, T.; POPPE, H.; JUNGE, M.; LANGENBERG, J. [2013]: KOLINE – Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt, Förderkennzeichen 19P9002, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Februar 2013
- FULLERTON, M. [2013]: Description of EcoApproachAdvice, internes Arbeitspapier, August 2013.
- GARTNER, H. N.[1983]: OPAC: A demand-responsive strategy for traffic signal control. Transportation Research Record 906
- GAZIS, D.C.; HERMAN, R.; ROTHERY, R.W. [1961]: Nonlinear Follow the Leader Models of Traffic Flow, Operations Research 9
- GE, Q. [2010]: Split optimization and cycle-time selection for SITRAFFIC Motion, Masterarbeit am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München
- GIPPS, P. G. [1981]: A behavioural car-following model for computer simulation. In: Transportation Research Part B: Methodological 15 (2)
- HAUSBERGER, S.; REXEIS, M.; ZALLINGER, M.; LUZ, R. [2009]: Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3
- Head, L.; Mirchandani, P. [1998]: The RHODES Prototype: A Technical Review, presented at the TRB Midyear Meeting, Adaptive Traffic Signal Control Systems Workshop, Asilomar, Pacific Grove, Calif., July 12–14, 1998, www.signalsystems.org.vt.edu/documents/July1998AnnualMeeting/rhodes.pdf, abgerufen am 18.2.2014
- HENRY, J.J.; FARGES, J.L.; TUFFAL, J. [1983]: The Prodyn Real Time Traffic Algorithm, IFAC Control in Transportation Systems, Baden-Baden, Deutschland
- HILL, C.; GARETT, K. [2014]: AASHTO Connected Vehicle Infrastructure Deployment Analysis, Final Report June 17, Publication Number: FHWA-JPO-11-090
- HIRSCHMANN, K. UND FELLENDORF, M. [2009]: Emission minimizing traffic control – simulation and measurements. Tagungsbeitrag mobil.TUM 2009 - International Scientific Conference on Mobility and Transport - ITS for larger Cities. 12. & 13. Mai 2009, München.
- HIRSCHMANN, K.; FELLENDORF, M. [2010]: A toolbox to quantify emission reductions due to signal control, Proceedings Transportation Research Board (TRB), 89nd Annual Meeting, Washington
- HOFFMANN, G [1989]: Geschwindigkeitsempfehlungen im Kraftfahrzeug – Ein Beitrag zur Kraftstoff einsparung durch das Informationssystem "Wolfsburger Welle", Straßenverkehrstechnik, Heft 5/1989, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn
- HOOGENDOORN, S.; BOVY P. [2001]: State-of-the-Art of Vehicular Traffic Flow Modelling, Proceedings Institution of Mechanical Engineers, vol. 215, no. 1
- HOYER, R.; OTTO, T.; PRIEMER, C.; REIFERT, D.; REUSSWIG, A.; WOLF, F. [2012]: Optimierungspotenziale des Verkehrsablaufs durch kooperative Lichtsignalanlagen, Straßenverkehrstechnik, Heft 6/2012, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn

- HUBER, W. [2001]: Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von Verkehrsinformationen, Dissertation am Fachgebiet für Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München
- HUNT, P.B.; ROBERTSON, D.I.; BRETHERTON, R.D.; WINTON, R.I. [1981]: SCOOT—A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals, Report TRRL 1014, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, England
- INFRAS [2010]: Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs – HBEFA
- InSync [2014]: How Insync works, www.rhythmtraffic.com/how-insync-works, abgerufen am 18.2.2014
- IZU [2014]: Informationszentrum UmweltWirtschaft, Berechnung der CO₂-Emissionen, http://www.izu.bayern.de/praxis/detail_praxis.php?pid=0203010101217, abgefragt am 29.06.2014
- KILLAT, M.; SCHMIDT-EISENLOHR F.; HARTENSTEIN, H.; RÖSSEL, C.; VORTISCH, P.; ASSENMACHER, S.; BUSCH F. [2007]: Enabling efficient and accurate large-scale simulations of VANETS for vehicular traffic management, Proceedings of the fourth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET), Montreal
- KIMBER, R. M.; HOLLIS, E. M. [1979]: Traffic Queues and Delays at Road Junctions. TRRL Laboratory Report 909.
- KLUNDER, G.; STELWAGEN, U.; TAALE, H. [2013]: Integrating a Macro Emission Model with a Macroscopic Traffic Model, in Proceedings European Transport Conference 2013, Frankfurt, Germany
- KOHOUTEK, S. [2010]: Quantifizierung der Wirkungen des Straßenverkehrs auf Partikel- und Stickoxid-Immissionen, Dissertation am Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität Darmstadt
- KOHOUTEK, P. NAGEL; C. FELLENDORF, M.; VORTISCH, P.; BROSTHAUS, J. [1999a]: ADVANCE: Integrierte Simulation von Verkehrsnachfrage, Verkehrsfluß und Kfz-Emissionen; In Tagungsband Heureka'99 Optimierung in Verkehr und Transport, FGSV, Köln
- KOHOUTEK, P.; NAGEL, C.; FELLENDORF, M.; HAUSBERGER, S.; BROSTHAUS, J. [1999b]: Integrated Simulation of Traffic Demand, Traffic Flow, Traffic Emissions and Air Quality, 8th International Symposium on Transport and Air Pollution, Graz, Austria
- KOUKOU MIDIS, E.; MARTONOSI, M.; PEH, L. [2012]: Leveraging Smartphone Cameras for Collaborative Road Advisories. IEEE Transactions on mobile computing Vol 11, No 5
- KRASCHL-HIRSCHMANN, K.; ZALLINGER, M.; LUZ, R.; FELLENDORF, M.; HAUSBERGER, S. [2011]: A method for emission estimation for microscopic traffic flow simulation, IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, Vienna Austria, June 29 – July 1
- KRAUSS, S.; NAGEL, K.; WAGNER, P. [1999]: The mechanism of flow breakdown in traffic flow models, Proceedings of the 14th International Symposium of Transportation and Traffic Theory

- KRASCHL-HIRSCHMANN, K. [2013]: Energieorientierte Straßennetzbewertung für Routensuchverfahren, Dissertation, Technischen Universität Graz, Fakultät für Bauingenieurwissenschaften
- KRUMNOW, M. ; PAPE, S. ; KRETSCHMER, A. ; KRIMMLING, J. [2014]: Schaltzeitprognose verkehrsabhängiger Lichtsignalanlagen im Rahmen des Forschungsprojektes EFA 2014/2, Tagungsband HEUREKA'14 – Optimierung in Transport und Verkehr, Stuttgart
- KRUSE, G. [2003] in Arbeitsbericht Steuerung kommunaler Verkehrsnetze (Hrsg. Steierwald, M.; Martens, S): MOTION Netzsteuerung - Optimierung der Lichtsignalsteuerung im Einsatz, Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart
- LÄMMER S.; KRIMMLING J.; HOPPE A. [2009]: Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen - Regelungstechnischer Ansatz und Simulation. Straßenverkehrstechnik 9/2009, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn
- LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN [2006]: Verkehrsentwicklungsplan, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, Hauptabteilung Stadtentwicklungsplanung, Abteilung Verkehrsplanung, München
- LARBURU, M.; URQUIZA, A.; SANCHEZ, J.; [2012]: Safe Road Trains for the Environment (SARTRE): Validation of SARTRE Platoon service and the SARTRE HMI. Proceedings 19th ITS World Congress, Wien.
- LEHNHOFF, N. [2005]: Überprüfung und Verbesserung der Qualität von automatisch erhobenen Daten an Lichtsignalanlagen, Dissertation am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover
- LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE (LFE) [2013]: Statischer Fahrsimulator, <http://www.lfe.mw.tum.de/forschung/methoden-und-laboreinrichtungen/statischer-fahrsimulator>, abgefragt am 29.10.2013
- LEONHARDT, A. [2008]: Ein Instanzbasiertes Lernverfahren zur Prognose von Verkehrskenngrößen unter Nutzung Räumlich-Zeitlicher Verkehrsmuster, Dissertation am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München
- LI J.; VAN ZUYLEN, H.; CHEN, Y.; VITI, F.; WILMINK, I. [2009]: Optimizing Traffic Control for Emission Reduction: the calibration of the model, Proceeding mobil.TUM 2009 - International Scientific Conference on Mobility and Transport - ITS for larger Cities. 12&13 May 2009, Munich
- LI, J.; VAN ZUYLEN, H.; CHEN, Y.; VITI, F.; WILMINK, I. [2013]: Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 31, June 2013, Pages 172–184
- LIGTERINK, N.; VAN BALEN, J.; EIJK, A.; MAK, W.; BROEDERS, W.; VORTISCH, P. [2008]: Predicting Local Vehicle Emissions Using VERSIT+ and VISSIM, 7th European Congress and Exhibition on the Intelligent Transport Systems and Services, Geneva, Switzerland.

- LIGTERINK, N. E.; DE LANGE R. [2009]: Refined Vehicle and Driving-behaviour Dependencies in the VERSIT+ Emission Model, In Proceedings of the Joint 17th Transport and Air Pollution, Symposium and 3rd Environment and Transport Symposium (ETTAP), Toulouse, France.
- LIGHTHILL, M.J., WHITHAM, J.B. [1955]: On Kinematic Waves. I. Flow Movement in Long Rivers. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. Proceedings of Royal Society (A229)
- LIN, W.-H.; WANG, C. [2004]: An enhanced 0-1 mixed-integer LP formulation for traffic signal control, In IEEE Trans. Intelligent Transport Systems, vol. 5, no. 4
- LÜBMANN, J.; DITTRICH, C. [2012]: Netzweite Bewertung kooperativer Verkehrssysteme mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation am Beispiel des eCoMove Projektes, ASIM/GI Fachgruppentreffen STS/GMMS, 23. - 24. Februar 2012, Wolfenbüttel, ISBN 978-3-901608-39-1
- LÜBMANN, J.; ROMMERSKIRCHEN, C.; BENGLER, K.; BUSCH, F [2012a]: Netzweite Wirkungsermittlung kooperativer Fahrerassistenzsysteme zur Verbrauchsreduzierung mittels Simulation - Beispiel eCoMove. 5. Tagung Fahrerassistenz
- LÜBMANN, J.; VREESWIJK, J.; MATHIAS, P. [2012b]: The co-operative traffic light control approach of the eCoMove system. Proceedings 19th ITS World Congress, Wien.
- LÜBMANN, J.; VREESWIJK, J.; VAN KATWIJK, R.; BLOKPOEL, R.; FULLERTON, M. [2014]: Impact Assessment for Cooperative Urban Traffic Management based on Microscopic Traffic Flow Simulation, Proceedings 21th ITS World Congress, Detroit
- LIU, X.; WU, X.; MA, W.; HU, H. [2009]: Real time queue length estimation for congested signalized intersections. Transportation Research, Part C, 17(4)
- LUYANDA, F.; GETTMAN, D.; HEAD, L.; SHELBY, S.; BULLOCK, D.; MIRCHANDANI, P. [2003]: ACS Lite Algorithmic Architecture: Applying Adaptive Control System Technology to Closed-Loop Traffic Signal Control Systems, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1856, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- MAIER, F. [2010]: Abschnittsweise Regressionsanalyse zur Schätzung von Verkehrskenngrößen, Dissertation am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München
- MAIER, P.; FINKE, T. [2013]: Quality Assessment and Surveillance of Detector Data – Practical Experiences from TrafficIQ, in Proceedings mobil.TUM 2013, ITS for Connected Mobility, June 18 & 19, 2013
- MALLIG, N.; STREIT, T.; VORTISCH, P. [2012]: Driving Behavior at Traffic Signals, Schlussbericht, im Auftrag der PTV AG, unveröffentlicht.
- MARGREITER, M.; KRAUSE, S.; TWADDLE, H.; LÜBMANN, J. [2014]: Evaluation of environmental impacts of adaptive network signal controls based on real vehicle trajectories, Proceedings mobil.TUM 2014: Sustainable Mobility in Metropolitan Regions, 19-20 May

- MATHEUS, K.; MORICH, R.; PAULUS, I. ; MENIG, C.; LÜBKE, A.; RECH, B.; SPECKS W. [2005]: Car-to-car communication – Market introduction and success factors, Proceedings 5th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Hannover, Germany, July 2005
- MATHIAS, P. [1999]: Statische und dynamische Verkehrsumlegung mit Rekurrenten Neuronalen Netzen. Shaker Verlag (ISBN 3-8265-6720-X), Herzogenrath
- MENIG, C.; Hildebrandt, R.; Braun, R. [2008]: Der informierte Fahrer –Optimierung des Verkehrsablaufs durch LSA-Fahrzeug-Kommunikation, In Tagungsband HEUREKA '08, Optimierung in Verkehr und Transport, FGSV Verlag, Köln.
- MENIG, C. [2012]: Optimierung von LSA-Fahrzeug-Systemen durch Car-2-X-Kommunikation, Dissertation am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München
- MERTZ, J. [1996]: Munich COMFORT, Abschlussbericht, Arbeitsbereich Städtische Verkehrssteuerung, Fachgebiet für Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München
- MERTZ, J. [2001]: Ein mikroskopisches Verfahren zur verkehrsadaptiven Knotenpunktsteuerung mit Vorrang des öffentlichen Verkehrs, Dissertation, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München.
- MÜCK J. [2002]: Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren. Straßenverkehrstechnik, 11/2002, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn.
- Mück, J. [2008]: Neue Schätz- und Optimierungsverfahren für Adaptive Netzsteuerungen, Straßenverkehrstechnik Hefte 12, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn
- MÜCK, J.; POSCHINGER, A. [2009]: Modellbasierte Netzsteuerungen – Neue Algorithmen und aktuelle Evaluierungsergebnisse von Motion, Proceedings mobil.TUM 2009, 12 & 13 May 2009, Munich, Germany
- NAGEL, K. [1996]: Particle hopping models and traffic flow theory, Physical Review E 53
- Neumann, T.; Wagner, P. [2012]: DPAnalyzer - Rückstaulängenschätzung mit Floating-Car-Daten für das Qualitätsmanagement an Lichtsignalanlagen. Straßenverkehrstechnik, Heft 6, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag
- NEWELL, G.F. [1961]: A Theory of Traffic Flow in Tunnels, Theory of Traffic Flow
- NIEUWLAND, A.; DOBBELAERE, P.; PETTI, S.; RESS, C. [2012]: Vehicle to infrastructure communication with today's telecommunication systems, in Tagungsband 5. Tagung Fahrerassistenz, 15. – 16. Mai 2012, München
- NTZIACHRISTOS, L.; GKATZOFLIAS, D.; KOURIDIS, CH.; SAMARAS, Z. [2009]: COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model, 4th International ICSC Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering, May, 28-29, Thessaloniki, Greece.
- OCA [2014]: Open Traffic Systems City Association, www.opentrafficsystems.org, abgerufen am 28.5.2014

- ODG [2014]: Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems Development Group, www.ocit.org, abgerufen am 28.5.2014
- OTTO T. [2011]: Kooperative Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung an signalisierten Knotenpunkten, Dissertation am Fachgebiet für Verkehrstechnik und Transportlogistik, Universität Kassel
- PAPAGEORGIOU, M.; LEIBOLD, M; BUSS, M. [2012]: Optimierung - Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung, 3., neu bearbeitete und ergänzte Auflage, ISBN 978-3-540-34013-3 (eBook), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- PARK, J.Y.; NOLAND, R. B.; POLAK, J. W. [2001]: Microscopic Model of Air Pollutant Concentrations: Comparison of Simulated Results with Real-world and Macroscopic Estimates, In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1750, Washington, D.C.
- PIPES, L.A. [1953]: An operational analysis of traffic dynamics. J. Appl. Physics, 24(1)
- POHLMANN, T. [2010]: New Approaches for Online Control of Urban Traffic Signal Systems. Dissertation an der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- PRIEMER, C.; FRIEDRICH, B. [2008]: Optimierung von modellierten Warteprozessen im Rahmen adaptiver Netzsteuerungen durch C2I – Daten, In Tagungsband HEUREKA '08, Optimierung in Verkehr und Transport, FGSV Verlag, Köln.
- PTV AG [2011]: VISSIM 5.40-01 – COM Interface Manual
- PTV AG [2012a]: VISSIM 5.40 – Benutzerhandbuch
- PTV AG [2012b]: VISSIM Signal Controller DLL Interface
- PTV AG [2012c]: VISSIM 5.40-00 - Car2X Interface Manual
- PTV AG [2013]: VISUM 12 –Grundlagen
- ROBERTSON, D.I. [1969]: TRANSYT: a traffic network study tool. *RRL Report LR 253*. Berkshire, Road Research Laboratory Crowthorne.
- RoTraNoMo [2004]: ROad TRAffic NOise Model, www.rotranomo.com, abgerufen am 5.11.2013.
- SANTA, C. [2014]: Ein selbstlernender Algorithmus zur Schätzung von Staulängen an signalisierten Knotenpunkten (Arbeitstitel), Dissertation am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München, unveröffentlicht, Stand 01/2014
- SCHMIDT, D.; MAIER, P.; POPPENBORG, R.; WEICHENMEIER, F. [2008]: Datenfusionstechniken für eine ballungsraumübergreifende Verkehrslageerkennung. Tagungsband HEUREKA '08, 5./6. März 2008. Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- SCOOT [2014]: www.scoot-utc.com/DetailedHowSCOOTWorks.php, abgerufen am 10.2.2014
- SAE [2014]: Society of Automotive Engineers, J2735, Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary
- 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)

- SIMTD W5.9 [2011]: Workingpaper Analyse Ausgestaltungsoptionen sowie Organisations- und Betreibermodelle, interne Projektberichte, 2011.
- SONG, G.; YU, L.; XU, L. [2013]: Comparative Analysis of Car-Following Models for Emission Estimation, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Volume 2341 / Air Quality 2013, Vol. 2
- STATISTA [2013]: de.statista.com/statistik/daten/studie/158064/umfrage/verteilung-der-fahrzeuge-im-strassenverkehr-nach-treibstoffart-2010, abgefragt am 13.1.2014
- STAUBACH, M.; KASSNER, A.; FRICKE, N.; SCHIEßL, C.: [2012]: Driver reactions on ecological driver feedback via different HMI. Proceedings 19th ITS World Congress, Wien.
- STEVANOVIC, A.; MARTIN, P.T.; STEVANOVIC, J. [2007]: VisSim-Based Genetic Algorithm Optimization of Signal Timings, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Volume 2035/2007.
- STEVANOVIC, A. [2010]: Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice, A Synthesis of Highway Practice
- Stevanovic, A.; STEVANOVIC, J.; KERGAYE, C. [2013]: Comparative Evaluation of Traffic Signal Optimization and Green Light Optimized Speed Advisory Systems, Proceedings mobil.TUM 2013 - ITS for Connected Mobility
- THEMANN, P.; UHRNER, T.; KUCK, D.; MÜLLER, M.; KLUBAL, M. [2012]: ecoDriving Support based on cooperative prediction models. Proceedings 19th ITS World Congress, Wien.
- THEMANN, P.; ECKSTEIN, L [2013]: Prediction of driver behaviour by situational models in a cooperative environment to optimize energy efficiency, 9th ITS European Congress 2013, Dublin, Irland, 04.-07.06.2013.
- TISA [2014]: Travel Information Service Assosiation, www.tisa.org/technologies, abgerufen am 27.2.2014
- TRAVOLUTION [2014]: www.travolution-ingolstadt.de, abgerufen am 31.3.2014
- VAN VLIET, K.; TURKSMA, S. [2013]: ImFlow: Policy-based adaptive urban traffic control - First field experience, 9th ITS European Congress, Dublin, Ireland, 4-7 June 2013
- VITI, F.; HOOGENDOORN, S.P.; VAN ZUYLEN, H.J.; WILMINK, I.R.; VAN AREM, B. [2008]: Speed distributions at a controlled junction using microscopic real data from image processing, proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, October 12-15, Beijing, China.
- VAN KATWIJK, R.; BAKRI, T.; VUKOVIC, D.; HOGEMA, J. H.; STEENDIJK, J. [2013]: Providing Speed Advice to Vehicles Approaching an Intersection: Evaluation and Lessons Learned, Transportation Research Board 92nd Annual Meeting Compendium of Papers, Washington
- VON STEIN, W. [1961]: So fand ich den Düsseldorfer Trichter. Polizei, Straße und Verkehrsteilnehmer
- VON STEIN, W. [1978]: Untersuchungen über die Verkehrsbedeutungen von Vor- und Geschwindigkeits-Signalen, Straßenverkehrstechnik 01/1978, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn

- WAGNER, P.; AMME, F.; ERNST, H.; FORSBLAD, C.; MICHAEL, M.; POPPE, H.; UND RING, D. [2009]: Wirksamkeit einer kooperativen Verkehrssteuerung, Straßenverkehrstechnik, Heft 7/2009, Kirschbaum Verlag.
- Wardrop, J.G. [1952]: Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institute of Civil Engineering, London
- WEBSTER, F.V. [1958]: Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper, vol.39.
- WEISHEIT, T. [2014]: Algorithmenentwicklung zur Prognose von Schaltzeitpunkten an verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen, Tagungsband HEUREKA´14 – Optimierung in Transport und Verkehr, Stuttgart
- WENZEL, M. [2012]: Untersuchung der Zeitbedarfswerte mittels Videoanalyse, Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- WIEDEMANN, R. [1974]: Simulation des Verkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 8, Universität (TH) Karlsruhe
- WIEDEMANN, R. [1991], Modelling of RTI-Elements on multi-lane roads, Advanced Telematics in Road Transport, DG XIII, Brussels
- WILLIAMS, J.C. [2001]: Macroscopic Flow Models, Traffic Flow Theory A State-of-the-Art Report
- WILLUMSEN, L.G. [1981]: An Entropy Maximizing Model for Estimating Trip Matrices from Traffic Counts, Ph.D. Thesis, University of Leeds, UK.
- WILMINK, I.; VITI, F.; VAN BAALEN, J.; LI, M. [2009]: Emission Modelling at Signalised Intersections Using Microscopic Models, Proceedings 16th ITS World Congress, Stockholm
- ZENG, M. [2012]: Modelling horizontal queues for offset optimization: Adapting the Cell Transmission Model for signalized urban networks, Masterarbeit am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- ZIMDAHL, W. [1983]: Wolfsburger Welle, VW Forschung, Wolfsburg

Abkürzungsverzeichnis

ACS LITE	<u>A</u> daptive <u>C</u> ontrol <u>S</u> oftware Lite
BALANCE	<u>B</u> alancing <u>A</u> daptive <u>N</u> etwork <u>C</u> ontrol m <u>E</u> thod
C2CCC	<u>C</u> ar to <u>C</u> ar <u>C</u> ommunication <u>C</u> onsortium
CAM	<u>C</u> ar <u>A</u> wareness <u>M</u> essage
CO₂	Kohlendioxid
DENM	<u>D</u> ecentralized <u>E</u> nvironmental <u>N</u> otficator <u>M</u> essage
EnViVer	<u>E</u> nvironmental <u>V</u> ISSIM <u>V</u> ERSIT+
ETSI	<u>E</u> uropean <u>T</u> elecommunications <u>S</u> tandards <u>I</u> nstitute
FCD	<u>F</u> loating <u>C</u> ar <u>D</u> ata
FGSV	<u>F</u> orschungsgesellschaft für <u>S</u> traßen- und <u>V</u> erkehrswesen
Fz	<u>F</u> ahrzeug
g	<u>G</u> ramm
GPRS	<u>G</u> eneral <u>P</u> acket <u>R</u> adio <u>S</u> ervice
GPS	<u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem
GSM	<u>G</u> lobal <u>S</u> ystem for <u>M</u> obile Communications
HBS	<u>H</u> andbuch für die <u>B</u> emessung von <u>S</u> traßenverkehrsanlagen
HMI	<u>H</u> uman- <u>M</u> achine <u>I</u> nterface
ID	Identifikator
ITM	<u>I</u> ntersection <u>T</u> opology <u>M</u> essage
km/h	Kilometer pro Stunde
LKW	<u>L</u> ast <u>k</u> raft <u>w</u> agen
LSA	<u>L</u> icht <u>s</u> ignal <u>a</u> nlage
LTE	<u>L</u> ong <u>T</u> erm <u>E</u> volution
m	<u>M</u> eter

Motion	<u>M</u> ethod for the <u>O</u> ptimization of <u>T</u> raffic Signals <u>I</u> n <u>O</u> nline Controlled <u>N</u> etworks
NO_x	Stickstoffoxid
NS	<u>N</u> etz <u>s</u> teuerung
OCIT	<u>O</u> pen <u>C</u> ommunication <u>I</u> nterface for Road <u>T</u> raffic Control Systems
OPAC	<u>O</u> ptimized <u>P</u> olicies for <u>A</u> daptive <u>C</u> ontrol
ÖPNV	<u>Ö</u> ffentlicher <u>P</u> ersonen <u>n</u> ah <u>v</u> erkehr
OSGi	<u>O</u> pen <u>S</u> ervices <u>G</u> ateway <u>i</u> nitiative
OTS	<u>O</u> pen <u>T</u> raffic <u>S</u> ystems
ÖV	<u>Ö</u> ffentlicher <u>V</u> erkehr
PKW	<u>P</u> ersonen <u>k</u> raft <u>w</u> agen
PM₁₀	<u>P</u> articulate <u>M</u> atter mit weniger als <u>10</u> Mikrometer
PM	<u>P</u> ulk <u>m</u> anagement
PRODYN	<u>D</u> ynamic <u>P</u> rogramming
RILSA	<u>R</u> ichtlinien für <u>L</u> icht <u>s</u> ignal <u>a</u> nlagen
RHODES	<u>R</u> eal-Time <u>H</u> ierarchical <u>O</u> ptimized <u>D</u> istributed <u>E</u> ffective <u>S</u> ystem
RSU	<u>R</u> oad <u>S</u> ide <u>U</u> nit
s	<u>S</u> ekunde
SAE	<u>S</u> ociety of <u>A</u> utomotive <u>E</u> ngineers
SCATS	<u>S</u> ydney <u>C</u> oordinated <u>A</u> daptive <u>T</u> raffic <u>S</u> ystem
SCOOT	<u>S</u> plit <u>C</u> ycle <u>O</u> ffset <u>O</u> ptimization <u>T</u> echnique
SLAM	<u>S</u> peed and <u>L</u> ane <u>A</u> dvice <u>M</u> essage
TISA	<u>T</u> raveller <u>I</u> nformation <u>S</u> ervices <u>A</u> ssociation
TPEG	<u>T</u> ransport <u>P</u> rotocol <u>E</u> xperts <u>G</u> roup
TRANSYT	<u>T</u> raffic <u>N</u> etwork <u>S</u> tudy <u>T</u> ool
TSPDM	<u>T</u> raffic <u>S</u> ignal <u>P</u> hase <u>D</u> ata <u>M</u> essage

TUC	<u>T</u> raffic-responsive <u>U</u> rban <u>C</u> ontrol
UMTS	<u>U</u> niversal <u>M</u> obile <u>T</u> elecommunications <u>S</u> ystem
UTOPIA	<u>U</u> rban <u>T</u> raffic <u>O</u> ptimization by <u>I</u> ntegrated <u>A</u> utomation
VA	<u>v</u> erkehrs <u>a</u> bhängige Steuerung
VISSIM	<u>V</u> erkehr <u>I</u> n <u>S</u> tädten - <u>S</u> imulations <u>m</u> odell
WLAN	<u>W</u> ireless <u>L</u> ocal <u>A</u> rea <u>N</u> etwork

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Regelbasierte Umsetzung und modellbasierte Umsetzung einer Steuerung [FGSV 2010a]	7
Abb. 2-2	Funktion des in SCOOT verwendeten Pulkauflösungsmodell nach ROBERTSON [1969] (in Anlehnung an SCOOT [2014])	15
Abb. 2-3	Beispiel für Prädiktions- und Regelhorizont einer modellbasiert Steuerung mit rollendem Horizont	27
Abb. 2-4	Prinzip des Düsseldorfer Trichters [VON STEIN, 1961]	28
Abb. 2-5	Human Machine Interface (HMI) (links) und Infrarotempfänger (rechts) der Wolfsburger Welle [ZIMDAHL, 1983]	29
Abb. 2-6	HMI-Anzeige zur Information über die Restrotzeit (links) und HMI-Anzeige für die ideale Progressionsgeschwindigkeit. [MENIG ET AL., 2008]	30
Abb. 3-1	Übersicht über die Komponenten der kooperativen Lichtsignalsteuerung (in Anlehnung an [LÜßMANN ET AL., 2012b])	36
Abb. 3-2	Freigabezeitanforderungen unterschiedlicher Steuerungsverfahren auf mikroskopischer Ebene	39
Abb. 4-1	Parallele und abschnittsweise Optimierung	47
Abb. 4-2	Verlauf der Zielfunktion als Relation zum Minimum	49
Abb. 4-3	Sektor als Karte (Quelle: Openstreetmap), schematische Darstellung (Gegenrichtung hellgrau) und Umsetzung als VISSIM Model (von oben nach unten)	52
Abb. 4-4	Systemarchitektur der Netzsteuerung	56
Abb. 4-5	Anzahl der zu bewertenden Umläufe bei einer maximalen Abweichung von 0,5 Prozent vom Mittelwert und einem Konfidenzniveau von 90 Prozent	59
Abb. 5-1	Konzept der Zeitlückenzuweisung für ausgestattete Fahrzeuge (grün)	67
Abb. 5-2	Systemarchitektur des Pulkmanagements (in Anlehnung an eCOMOVE [2012g])	71
Abb. 6-1	HMI Outputs [BROCKMANN UND LÖWENAU, 2012]	75
Abb. 6-2	Darstellung der Fahrzustände in Abhängigkeit von Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz [PTV, 2012a] (nach WIEDEMANN [1974])	77
Abb. 6-3	Szenario Drehbuch für die Zufahrt auf eine Lichtsignalanlage mit Geschwindigkeitsempfehlung	80
Abb. 6-4	Blick vom Olympiaturm auf die Rampen. (in Anlehnung an BELTRÁN [2012])	81
Abb. 6-5	Fahrsimulatoren (von links nach rechts: statischer Fahrsimulator der Technischen Universität München [LFE, 2013], dynamischer Fahrsimulator des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt [DLR, 2013], statischer Fahrsimulator TECNALIA [LARBURU ET AL., 2012])	82
Abb. 6-6	Mittlere Wunschbeschleunigungsfunktion für Pkw verschiedener Kalibrierungen	84
Abb. 6-7	Mittlere Wunschverzögerungsfunktion für PKW verschiedener Kalibrierungen	85
Abb. 6-8	Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 50 km/h ohne Fahrerbeeinflussung für unterschiedliche Fahrsimulatoren	86
Abb. 6-9	Summenlinie der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen bei einem Geschwindigkeitslimit von 60 km/h aus den Fahrsimulatorstudien	87
Abb. 6-10	Mittlere Wunschbeschleunigungsfunktionen aus den unterschiedlichen Quellen	88
Abb. 6-11	Wunschbeschleunigungsfunktionen für Fahrer mit und ohne Fahrerassistenz	89
Abb. 6-12	Wunschverzögerungsfunktionen für Fahrer mit und ohne Fahrerassistenz	90
Abb. 6-13	Vergleich der Standardwunschbeschleunigungsfunktionen mit den angepassten Wunschbeschleunigungsfunktionen für LKW	91

Abb. 6-14	Vergleich der Standardwunschverzögerungsfunktionen mit den angepassten Wunschverzögerungsfunktionen für LKW.....	92
Abb. 6-15	Vergleich der Zeitbedarfswerte für Geradeausfahrstreifen.....	93
Abb. 7-1	Testfeld Moosacher Straße (Quelle: OpenSourceMap).....	96
Abb. 7-2	Verkehrsnachfrage des Testfeldes	97
Abb. 7-3	Übersicht über die Komponenten der Testumgebung [LÜßMANN UND DITTRICH, 2012] (in Anlehnung an ECOMOVE [2012b])	99
Abb. 7-4	Empfangswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger und der Anzahl der kommunizierenden Fahrzeuge pro Kilometer. [KILLAT et al., 2007].....	101
Abb. 7-5	Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug in Sekunden für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr.....	104
Abb. 7-6	Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug in Sekunden für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr.....	105
Abb. 7-7	Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr.....	107
Abb. 7-8	Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr.....	108
Abb. 7-9	Durchschnittliche CO ₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr.....	110
Abb. 7-10	Durchschnittliche CO ₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr.....	111
Abb. 7-11	Veränderungen der CO ₂ Emissionen gegenüber dem Ausgangsszenario mit Pulkmanagement für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr für PKW und LKW.....	112
Abb. 7-12	Veränderungen der CO ₂ Emissionen gegenüber dem Ausgangsszenario mit Pulkmanagement und Netzsteuerung für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr für PKW und LKW	113
Abb. 7-13	Vergleich der in VISSIM versorgten und der gefahrenen mittleren Beschleunigungen für PKW	114
Abb. 7-14	Vergleich der in VISSIM versorgten und der gefahrenen mittleren Beschleunigungen für LKW.....	114
Abb. 7-15	Durchschnittliche NO _x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr.....	115
Abb. 7-16	Durchschnittliche NO _x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr.....	116
Abb. 7-17	Teilpunktabstand in Abhängigkeit der Progressionsgeschwindigkeit und der Umlaufzeit	120
Abb. 7-18	Zeit-Weg-Diagramm mit Darstellung der durch die Geschwindigkeitsempfehlung erweiterten Grünbändern für das Testfeld	120
Abb. 0-1	Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 60 km/h ohne Fahrerbeeinflussung für unterschiedliche Fahrsimulatoren.....	149
Abb. 0-2	Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 50 km/h mit Geschwindigkeitsempfehlung von 50 km/h für unterschiedliche Fahrsimulatoren.	149
Abb. 0-3	Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 50 km/h mit Geschwindigkeitsempfehlung von 40 km/h für unterschiedliche Fahrsimulatoren.	150
Abb. 0-4	Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 50 km/h mit Geschwindigkeitsempfehlung von 35 km/h.....	150

Abb. 0-5	Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 60 km/h mit Geschwindigkeitsempfehlung von 50 km/h.....	151
Abb. 0-6	Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 60 km/h mit Geschwindigkeitsempfehlung von 40 km/h aus den Fahrsimulatorstudien.....	151
Abb. 0-7	Summenlinie der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen bei einem Geschwindigkeitslimit von 50 km/h aus den Fahrsimulatorstudien.....	152
Abb. 0-8	Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr	155
Abb. 0-9	Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr	156
Abb. 0-10	Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr	157
Abb. 0-11	Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr	158
Abb. 0-12	Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr	159
Abb. 0-13	Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr	160
Abb. 0-14	Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr	161
Abb. 0-15	Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr	162
Abb. 0-16	Durchschnittliche CO ₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr	163
Abb. 0-17	Durchschnittliche CO ₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr	164
Abb. 0-18	Durchschnittliche CO ₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr	165
Abb. 0-19	Durchschnittliche CO ₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr	166
Abb. 0-20	Durchschnittliche NO _x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr	167
Abb. 0-21	Durchschnittliche NO _x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr	168
Abb. 0-22	Durchschnittliche NO _x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr	169
Abb. 0-23	Durchschnittliche NO _x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr	170

Tabellenverzeichnis

Tab. 6-1	Übersicht über die durchgeführten Szenarien je Studie	81
Tab. 6-2	Kalibrierungsergebnisse der Parameter für den gewünschten Sicherheitsabstand.....	90
Tab. 6-3	Vergleich der Sättigungsverkehrsstärken.....	93
Tab. 7-1	Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde 7:00 bis 8:00 Uhr	104
Tab. 7-2	Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde 10:00 bis 11:00 Uhr	105
Tab. 7-3	Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr	107
Tab. 7-4	Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr	108
Tab. 7-5	Prozentuale Veränderungen der CO ₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr	110
Tab. 7-6	Prozentuale Veränderungen der CO ₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr	111
Tab. 7-7	Prozentuale Veränderungen der NO _x Emissionen für die Nachfragestunde von 7:00 bis 8:00 Uhr	116
Tab. 7-8	Prozentuale Veränderungen der NO _x Emissionen für die Nachfragestunde von 10:00 bis 11:00 Uhr	117
Tab. 0-1	VISSIM Wunschgeschwindigkeitseingangsparameter für ein Geschwindigkeitslimit von 50 km/h	152
Tab. 0-2	VISSIM Wunschgeschwindigkeitseingangsparameter für ein Geschwindigkeitslimit von 60 km/h	153
Tab. 0-3	VISSIM Wunschbeschleunigungseingangsparameter für PKW	153
Tab. 0-4	VISSIM Wunschverzögerungseingangsparameter für PKW	154
Tab. 0-5	Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr	155
Tab. 0-6	Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr	156
Tab. 0-7	Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr	157
Tab. 0-8	Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr	158
Tab. 0-9	Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr	159
Tab. 0-10	Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr	160
Tab. 0-11	Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr	161
Tab. 0-12	Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr	162
Tab. 0-13	Prozentuale Veränderungen der CO ₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr	163
Tab. 0-14	Prozentuale Veränderungen der CO ₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr	164

Tab. 0-15	Prozentuale Veränderungen der CO ₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr.....	165
Tab. 0-16	Prozentuale Veränderungen der CO ₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr.....	166
Tab. 0-17	Prozentuale Veränderungen der NO _x Emissionen für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr.....	167
Tab. 0-18	Prozentuale Veränderungen der NO _x Emissionen für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr.....	168
Tab. 0-19	Prozentuale Veränderungen der NO _x Emissionen für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr.....	169
Tab. 0-20	Prozentuale Veränderungen der NO _x Emissionen für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr.....	170

Anhang A

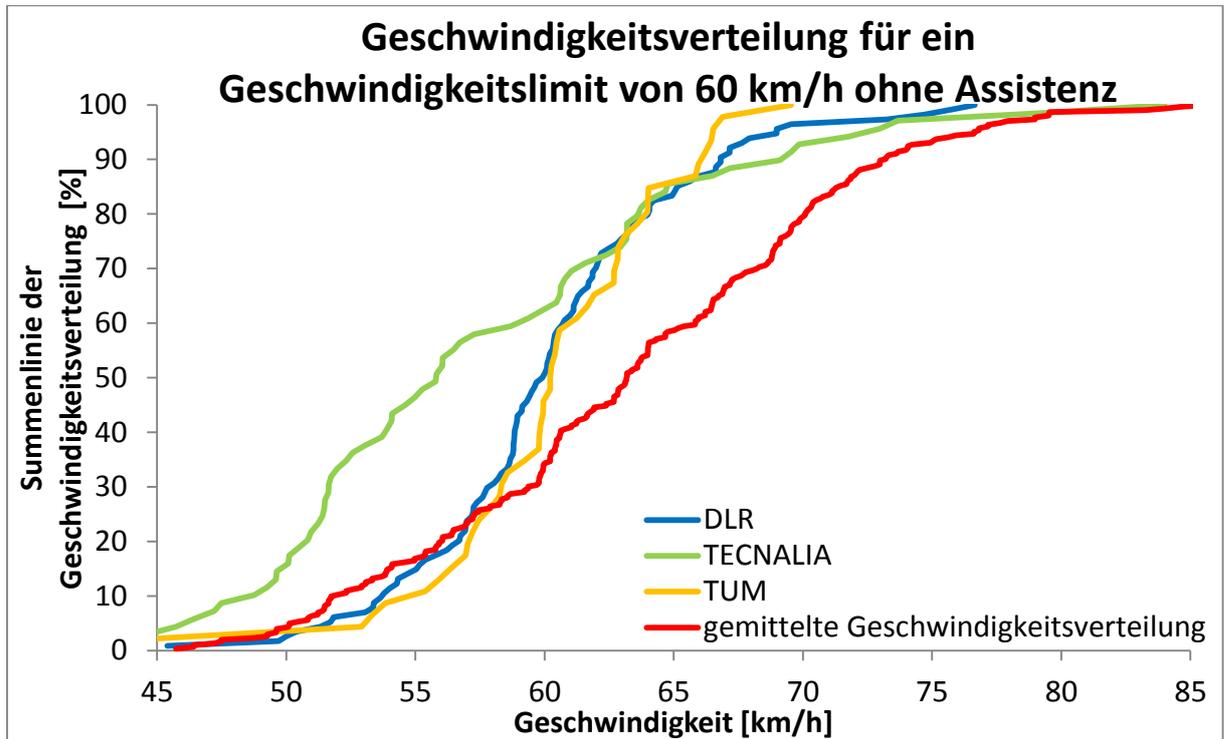


Abb. 0-1 Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 60 km/h ohne Fahrerbeeinflussung für unterschiedliche Fahrsimulatoren.

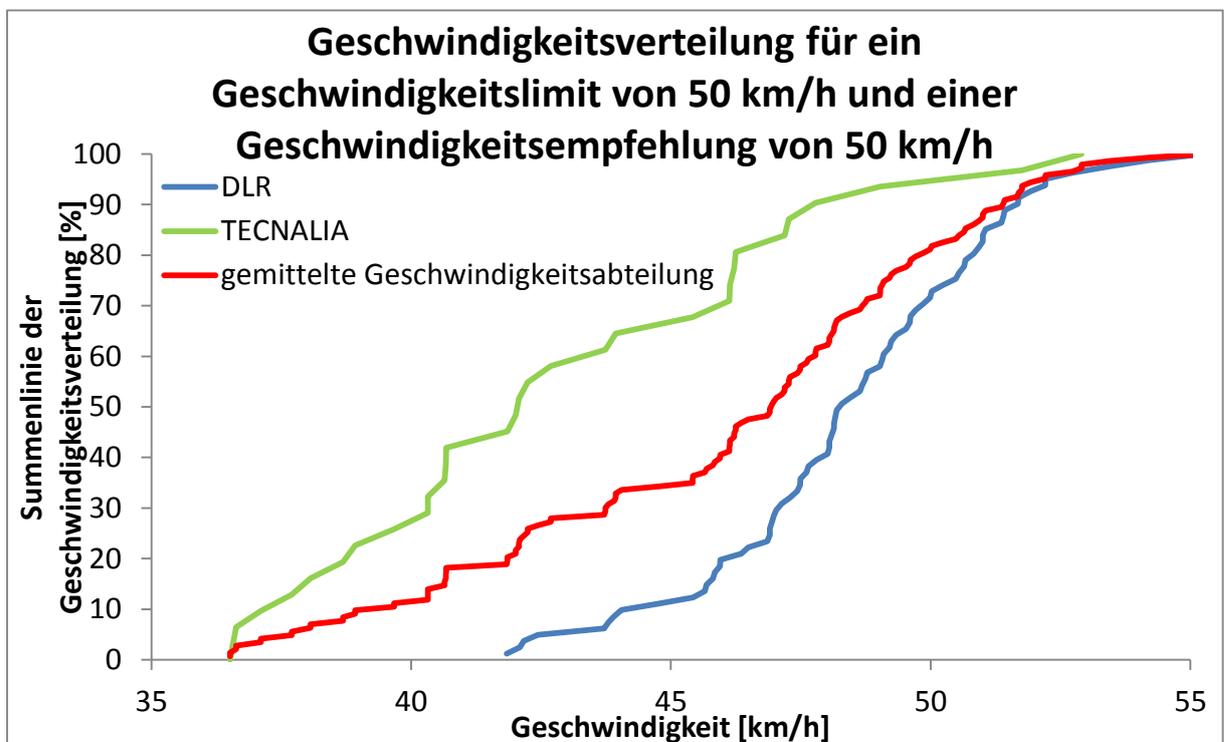


Abb. 0-2 Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 50 km/h mit Geschwindigkeitsempfehlung von 50 km/h für unterschiedliche Fahrsimulatoren.

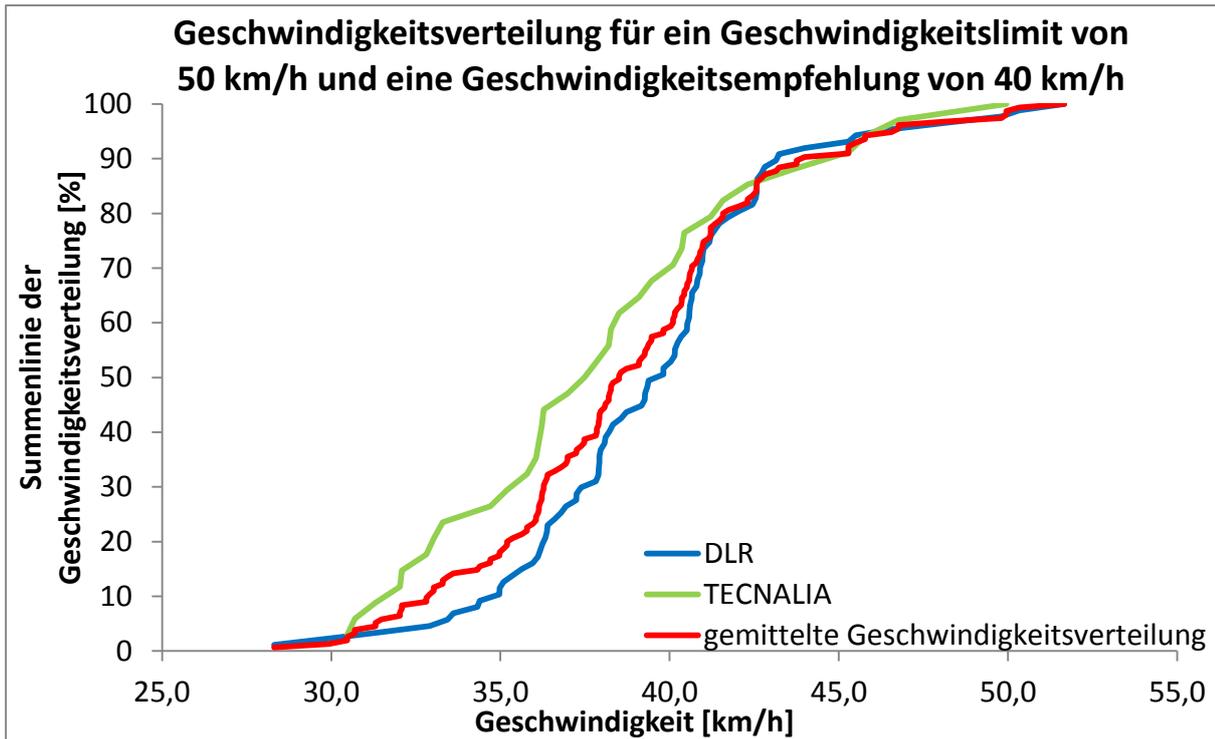


Abb. 0-3 Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 50 km/h mit Geschwindigkeitsempfehlung von 40 km/h für unterschiedliche Fahrsimulatoren.

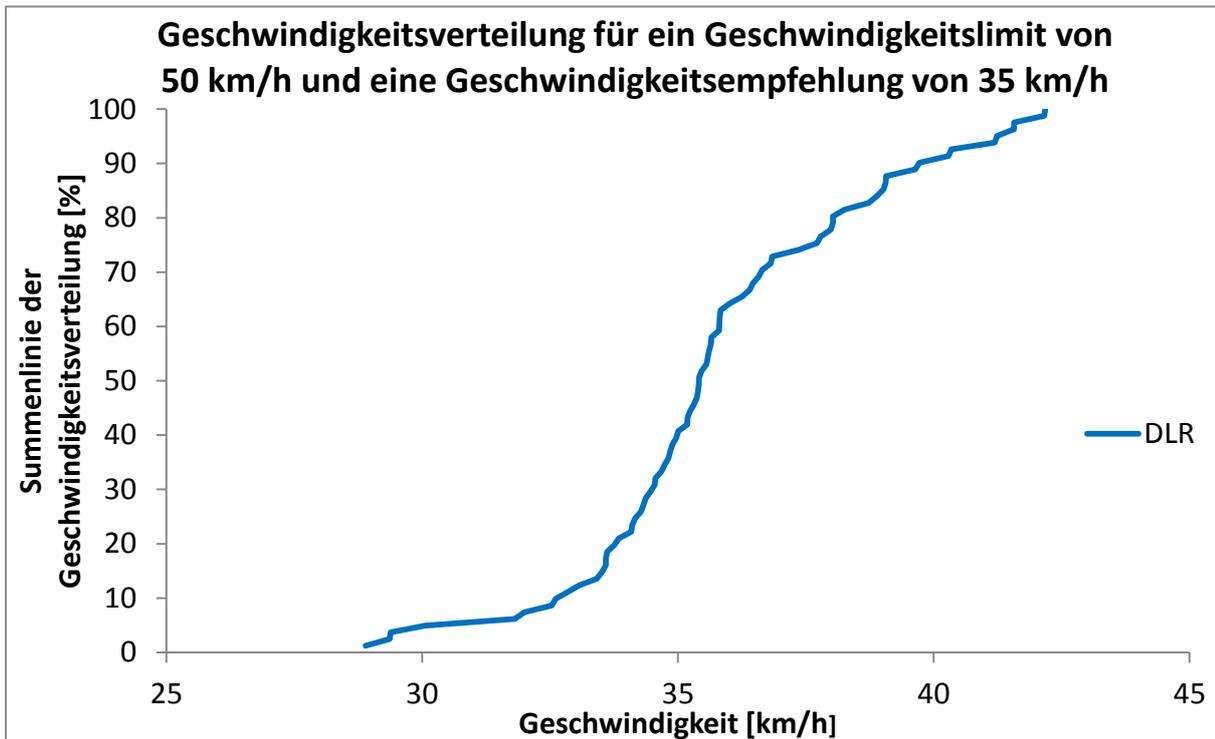


Abb. 0-4 Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 50 km/h mit Geschwindigkeitsempfehlung von 35 km/h.

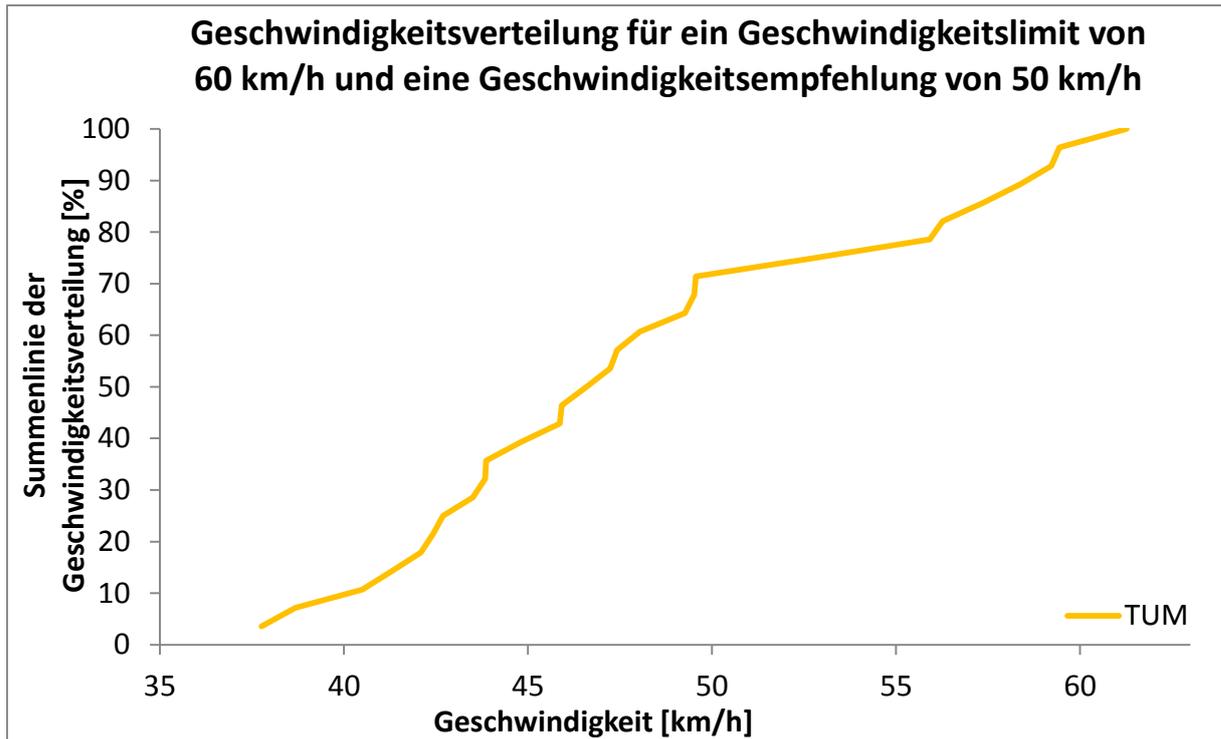


Abb. 0-5 Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 60 km/h mit Geschwindigkeitsempfehlung von 50 km/h.

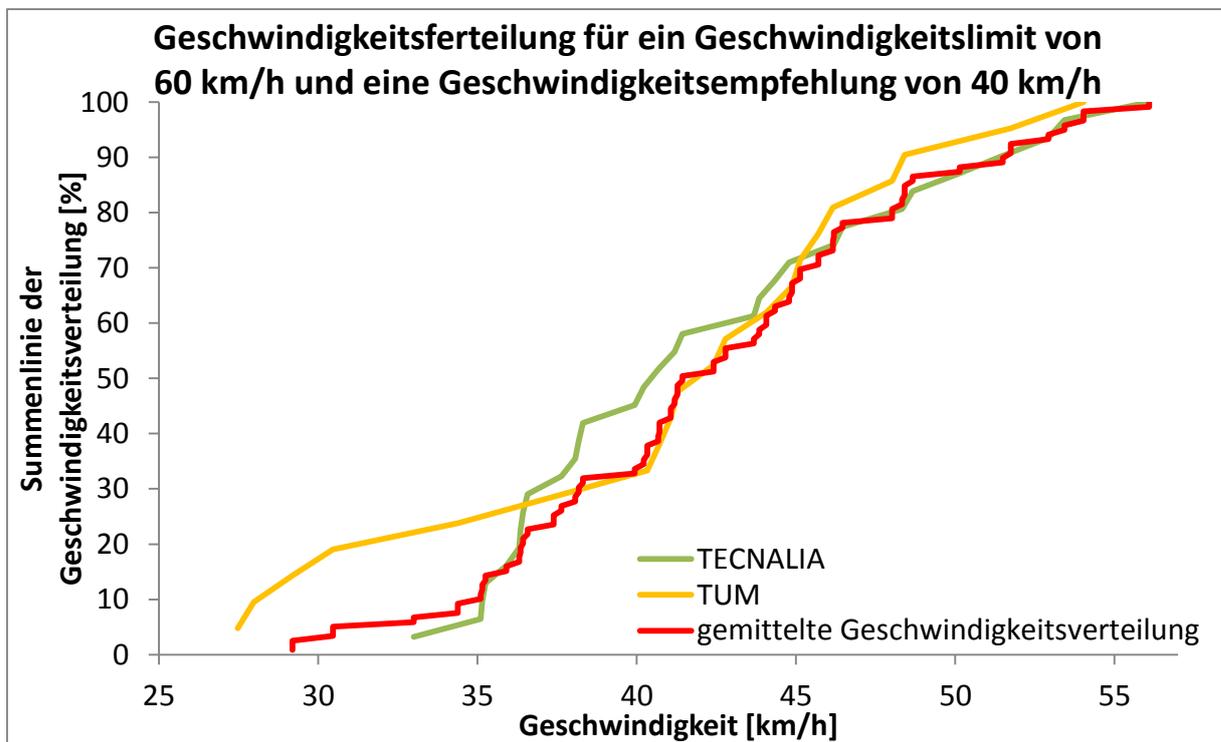


Abb. 0-6 Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung bei einem Geschwindigkeitslimit von 60 km/h mit Geschwindigkeitsempfehlung von 40 km/h aus den Fahrsimulatorstudien.

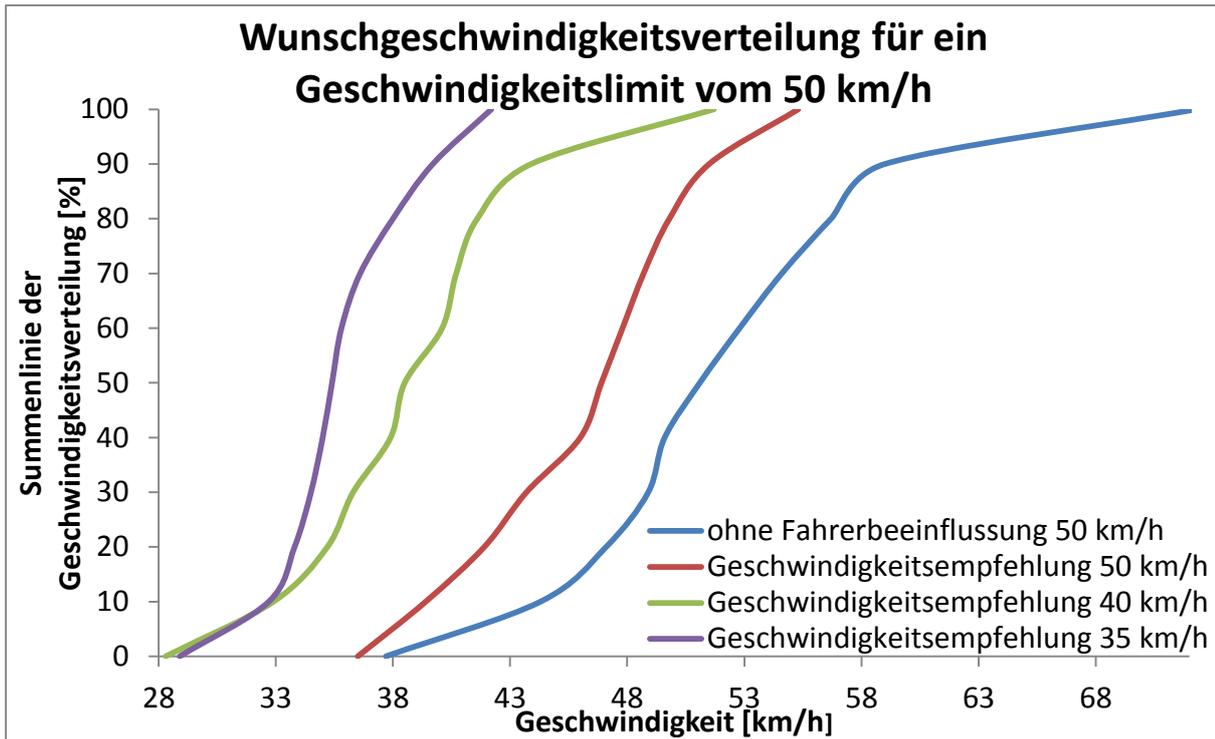


Abb. 0-7 Summenlinie der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen bei einem Geschwindigkeitslimit von 50 km/h aus den Fahrsimulatorstudien.

Summenlinie	Ohne Fahrerbeeinflussung	Geschwindigkeitsempfehlung 50 km/h	Geschwindigkeitsempfehlung 40 km/h	Geschwindigkeitsempfehlung 35 km/h
0	37,7	36,5	28,3	28,9
10	44,3	39,4	32,9	32,7
20	47,1	41,9	35,2	33,8
30	48,9	43,7	36,3	34,5
40	49,6	46	37,9	35
50	51,1	46,9	38,5	35,4
60	52,8	47,8	40,1	35,8
70	54,6	48,7	40,7	36,6
80	56,7	49,8	41,6	38
90	59	51,5	43,9	39,7
100	72,3	55,3	51,7	42,2

Tab. 0-1 VISSIM Wunschgeschwindigkeitseingangsparameter für ein Geschwindigkeitslimit von 50 km/h

Summenlinie	Ohne Fahrerbeeinflussung	Geschwindigkeitsempfehlung 60 km/h	Geschwindigkeitsempfehlung 55 km/h	Geschwindigkeitsempfehlung 50 km/h	Geschwindigkeitsempfehlung 45 km/h	Geschwindigkeitsempfehlung 40 km/h
0	46,5	47,8	42,8	37,8	33,5	29,2
10	52	50,3	45,3	40,3	37,7	35,1
20	56,1	52,3	47,3	42,3	39,4	36,5
30	59,7	53,7	48,7	43,7	40,95	38,2
40	60,7	55,4	50,4	45,4	43	40,6
50	63,2	56,6	51,6	46,6	44	41,4
60	66	58	53	48	46	44
70	68,6	59,8	54,8	49,8	47,6	45,4
80	70,2	63,9	58,9	53,9	50,95	48
90	73,6	66,8	61,8	56,8	54,15	51,5
100	95,8	73,2	68,2	63,2	59,65	56,1

Tab. 0-2 VISSIM Wunschgeschwindigkeitseingangsparameter für ein Geschwindigkeitslimit von 60 km/h

Geschwindigkeit	mittlere Wunschbeschleunigung	minimale Wunschbeschleunigung	maximale Wunschbeschleunigung
0	1,15	0,80	1,58
5	1,55	1,08	2,39
10	1,89	1,33	2,79
15	1,99	1,29	2,98
20	1,88	1,15	2,85
25	1,45	0,90	2,35
30	0,99	0,59	1,77
35	1,02	0,70	1,53
40	1,07	0,65	1,42
45	1,01	0,59	1,30
50	0,85	0,37	1,40
55	0,71	0,24	1,63
60	0,72	0,25	1,94
65	0,68	0,28	1,39
70	0,63	0,25	1,44

Tab. 0-3 VISSIM Wunschbeschleunigungseingangsparameter für PKW

Geschwindigkeit	mittlere Wunschverzögerung	minimale Wunschverzögerung	maximale Wunschverzögerung
0	-0,30	-0,40	-0,25
5	-0,30	-0,40	-0,25
10	-0,71	-0,92	-0,50
15	-1,01	-1,40	-0,62
20	-1,20	-1,73	-0,74
25	-1,27	-1,69	-0,92
30	-1,34	-1,69	-1,13
35	-1,33	-1,85	-0,90
40	-1,05	-1,73	-0,42
45	-1,00	-1,72	-0,40
50	-0,98	-1,75	-0,40
55	-0,98	-1,69	-0,40
60	-1,06	-1,71	-0,45
65	-1,07	-1,68	-0,44
70	-1,04	-1,69	-0,46

Tab. 0-4 VISSIM Wunschverzögerungseingangsparameter für PKW

Anhang B

Anhang B enthält die nicht im Kapitel Bewertung dargestellten Nachfragestunden.

Fahrtzeiten

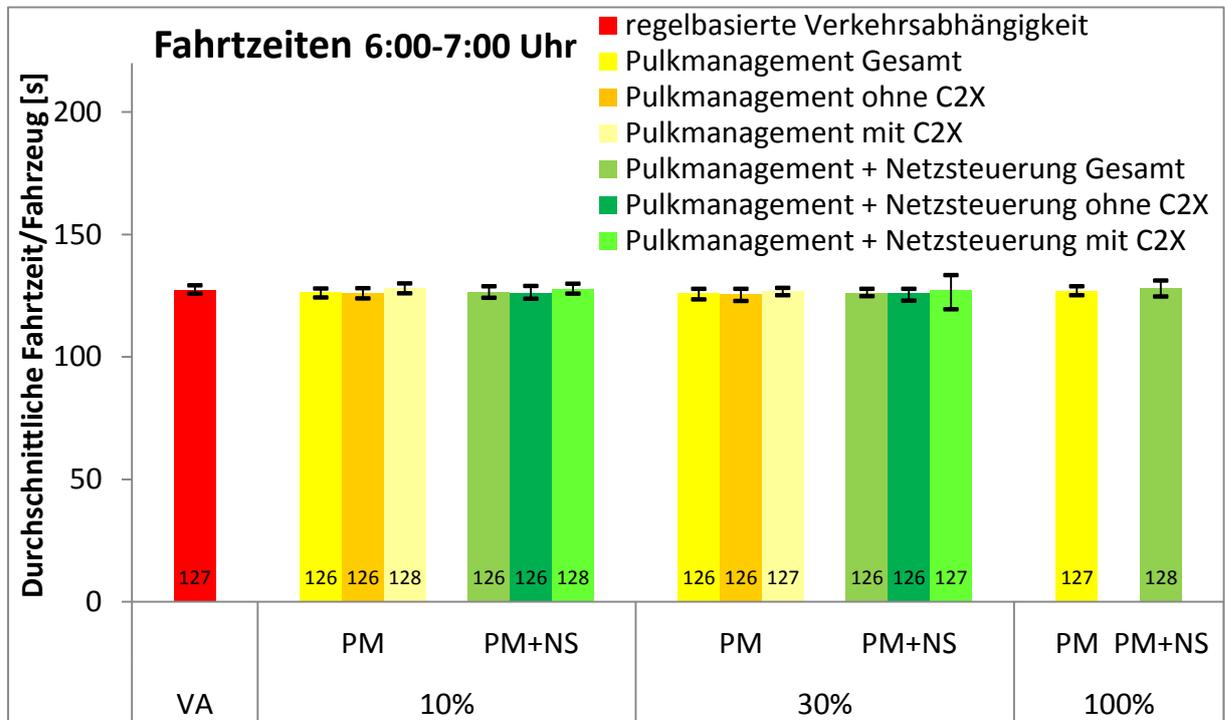


Abb. 0-8 Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
										> 95%
10%	-0,8%	-1,0%	0,5%	-0,9%	-1,0%	0,2%	-0,1%	-0,1%	-0,2%	>80% und < 95%
30%	-1,0%	-1,3%	-0,3%	-0,9%	-1,1%	-0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	< 80%
100%	-0,4%	-	-0,4%	0,5%	-	0,5%	0,9%	-	0,9%	nicht signifikant

Tab. 0-5 Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr

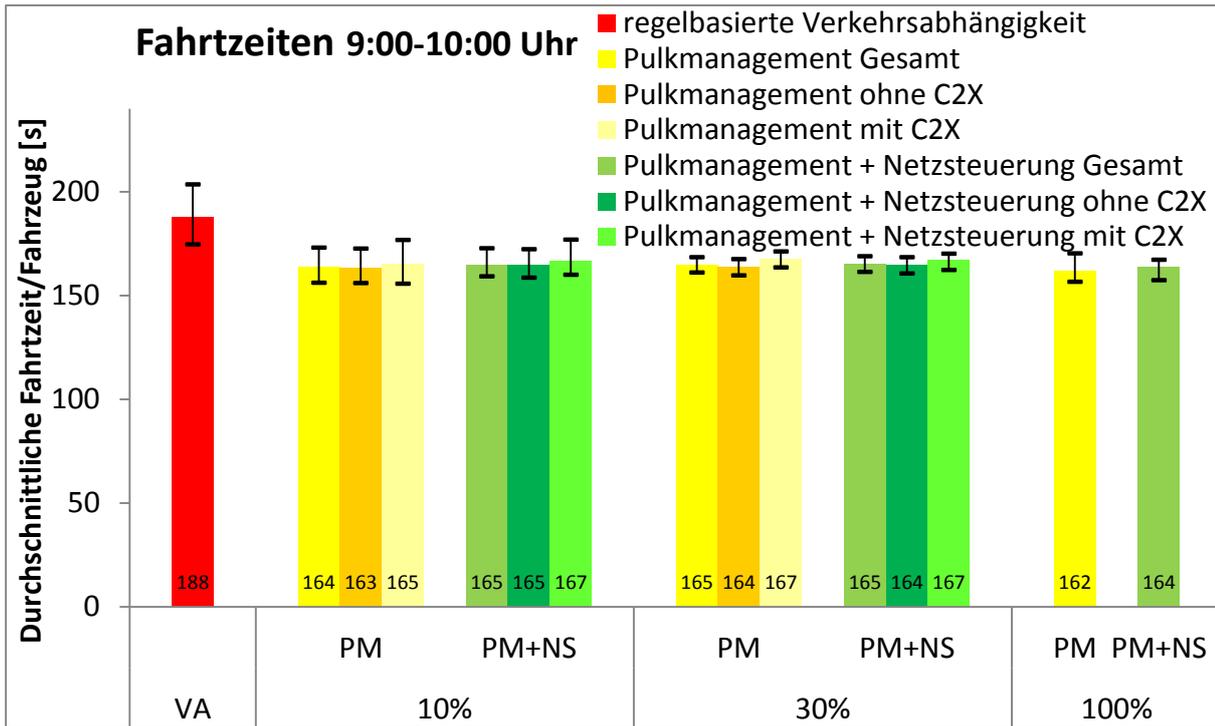


Abb. 0-9 Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr

Durchschnittliche prozentuale Veränderungen										Konfidenzintervall
Ausstattungsrate	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
										> 95%
10%	2,1%	2,1%	2,6%	0,8%	0,7%	1,6%	-1,3%	-1,4%	-0,9%	>80% und < 95%
30%	2,4%	1,9%	2,6%	1,5%	1,2%	2,1%	-0,9%	-0,7%	-0,4%	< 80%
100%	0,2%	-	0,2%	-1,0%	-	-1,0%	-1,2%	-	-1,2%	nicht signifikant

Tab. 0-6 Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr

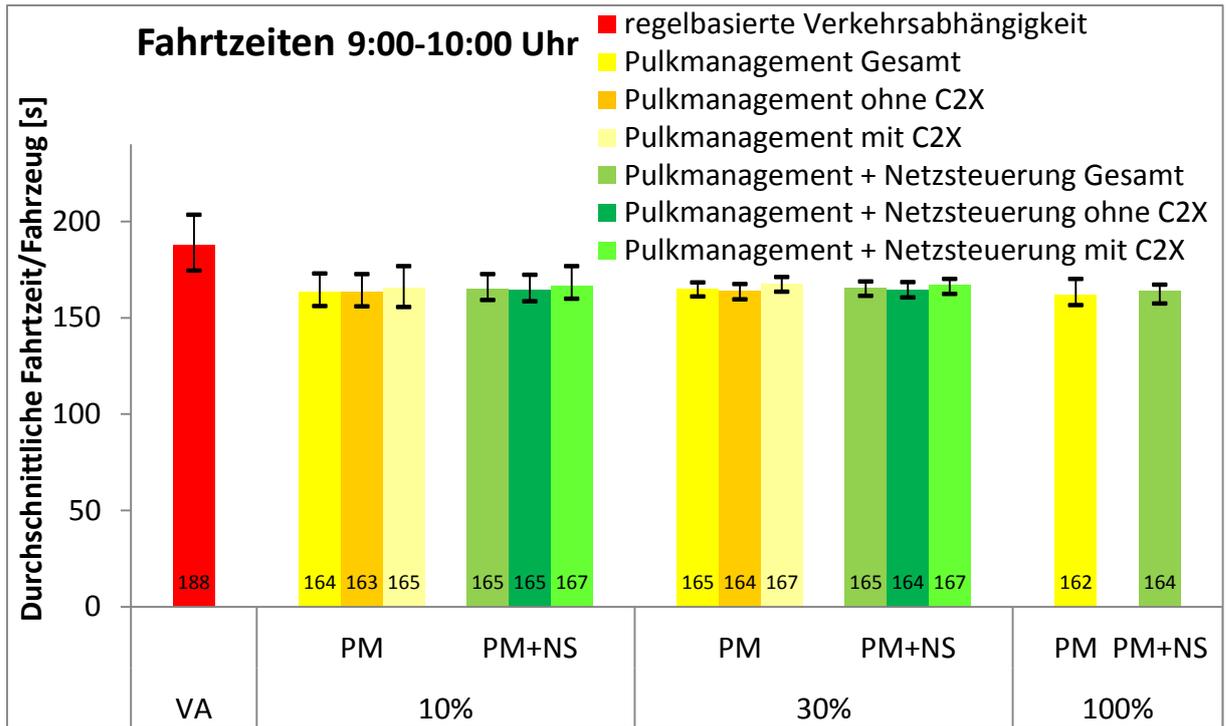


Abb. 0-10 Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-12,9%	-13,0%	-11,9%	-12,2%	-12,4%	-11,3%	0,7%	0,7%	0,7%	>80% und < 95%
30%	-12,2%	-12,8%	-10,8%	-12,0%	-12,4%	-11,0%	0,3%	0,5%	-0,2%	< 80%
100%	-13,8%	-	-13,8%	-12,8%	-	-12,8%	1,1%	-	1,1%	nicht signifikant

Tab. 0-7 Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr

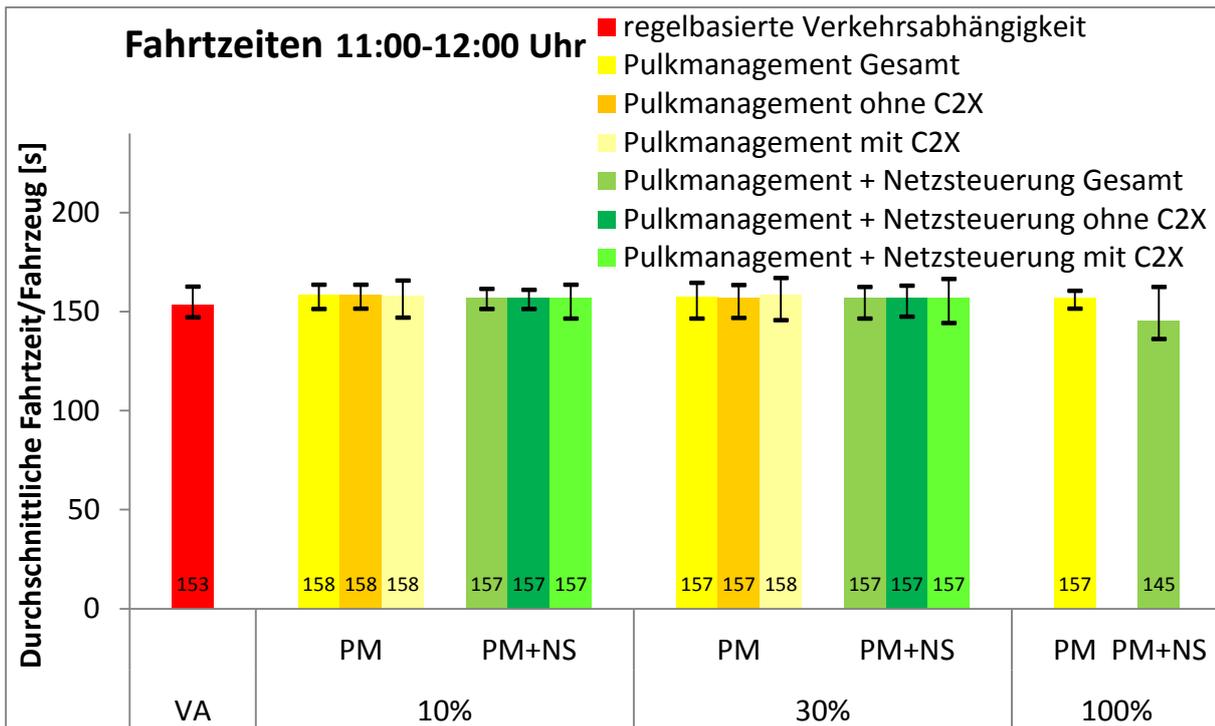


Abb. 0-11 Durchschnittliche Fahrtzeit je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
10%	3,4%	3,4%	3,1%	2,3%	2,3%	2,5%	-1,0%	-1,0%	-0,5%	>80% und < 95%
30%	2,7%	2,4%	3,4%	2,5%	2,5%	2,4%	-0,3%	0,0%	-0,9%	< 80%
100%	2,4%	-	2,4%	-5,1%	-	-5,1%	-7,3%	-	-7,3%	nicht signifikant

Tab. 0-8 Prozentuale Veränderungen der Fahrtzeiten für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr

Anzahl der Halte

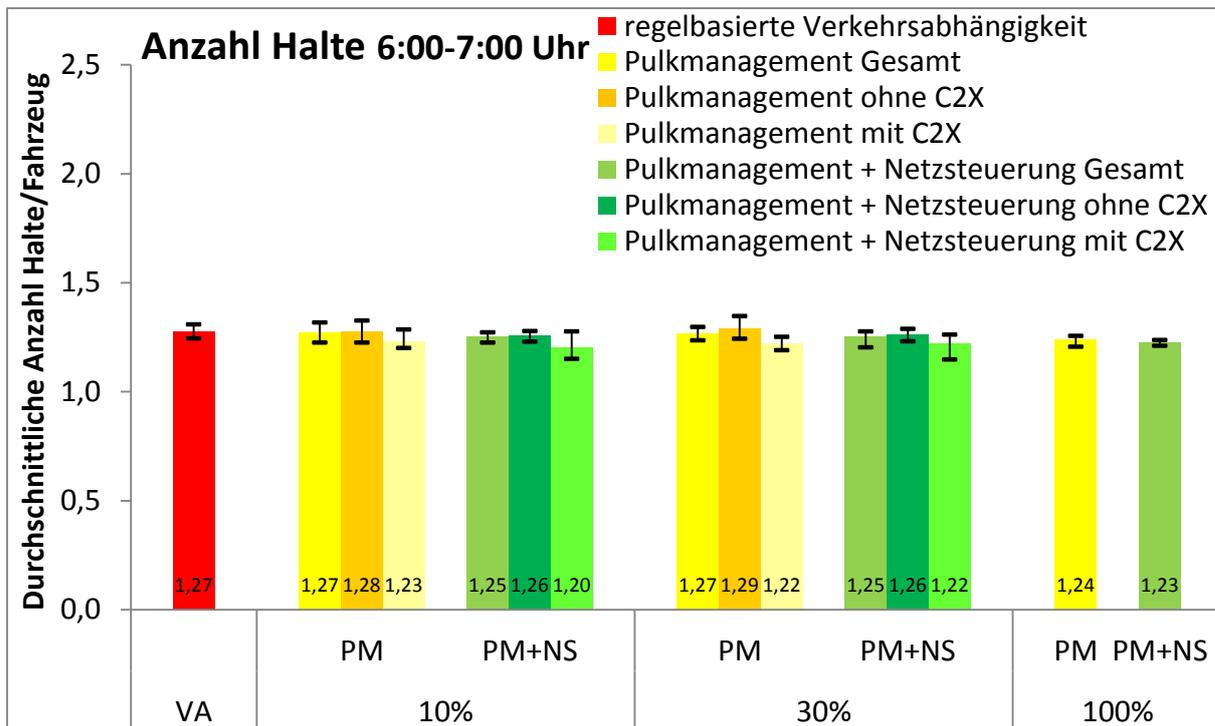


Abb. 0-12 Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-0,2%	0,2%	-3,6%	-1,8%	-1,4%	-5,8%	-1,6%	-1,5%	-2,3%	>80% und < 95%
30%	-0,6%	1,0%	-4,3%	-1,9%	-1,0%	-4,2%	-1,3%	0,1%	0,1%	< 80%
100%	-3,0%	-	-3,0%	-3,8%	-	-3,8%	-0,8%	-	-0,8%	nicht signifikant

Tab. 0-9 Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr

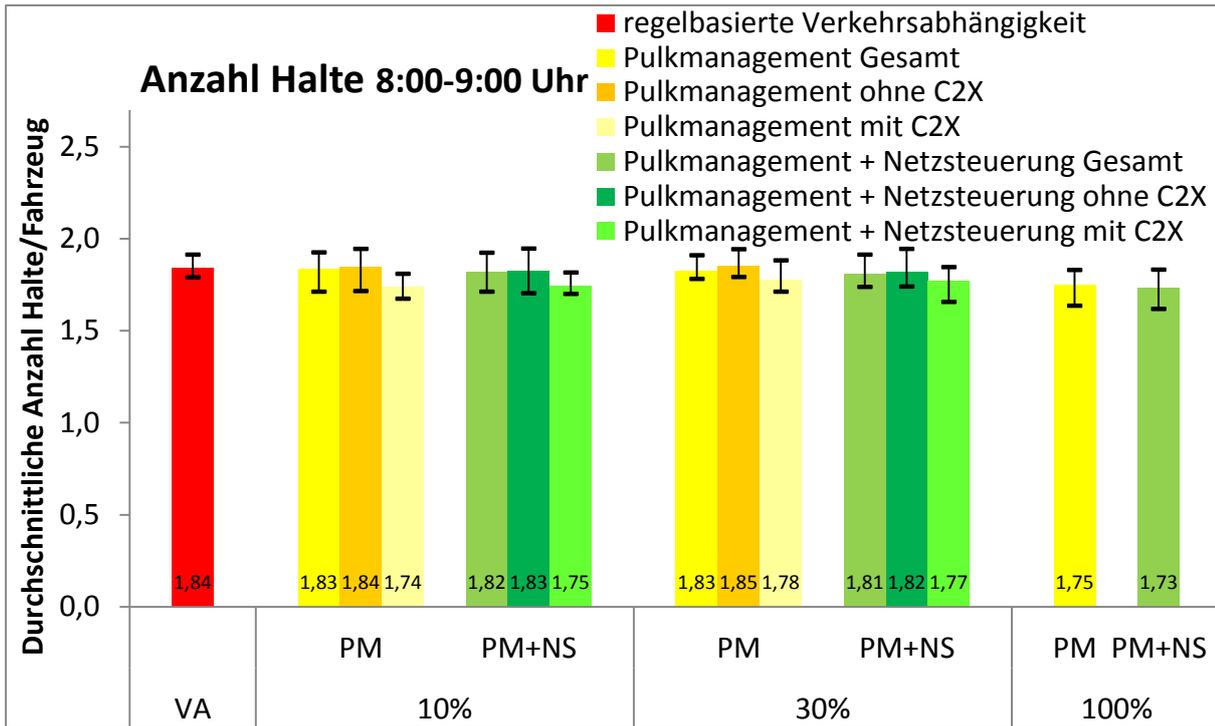


Abb. 0-13 Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-0,4%	0,2%	-5,4%	-1,2%	-0,8%	-5,1%	-0,9%	-1,0%	0,4%	>80% und < 95%
30%	-0,7%	0,5%	-3,5%	-1,9%	-1,2%	-3,8%	-1,2%	-0,3%	-0,3%	< 80%
100%	-5,0%	-	-5,0%	-5,8%	-	-5,8%	-0,8%	-	-0,8%	nicht signifikant

Tab. 0-10 Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr

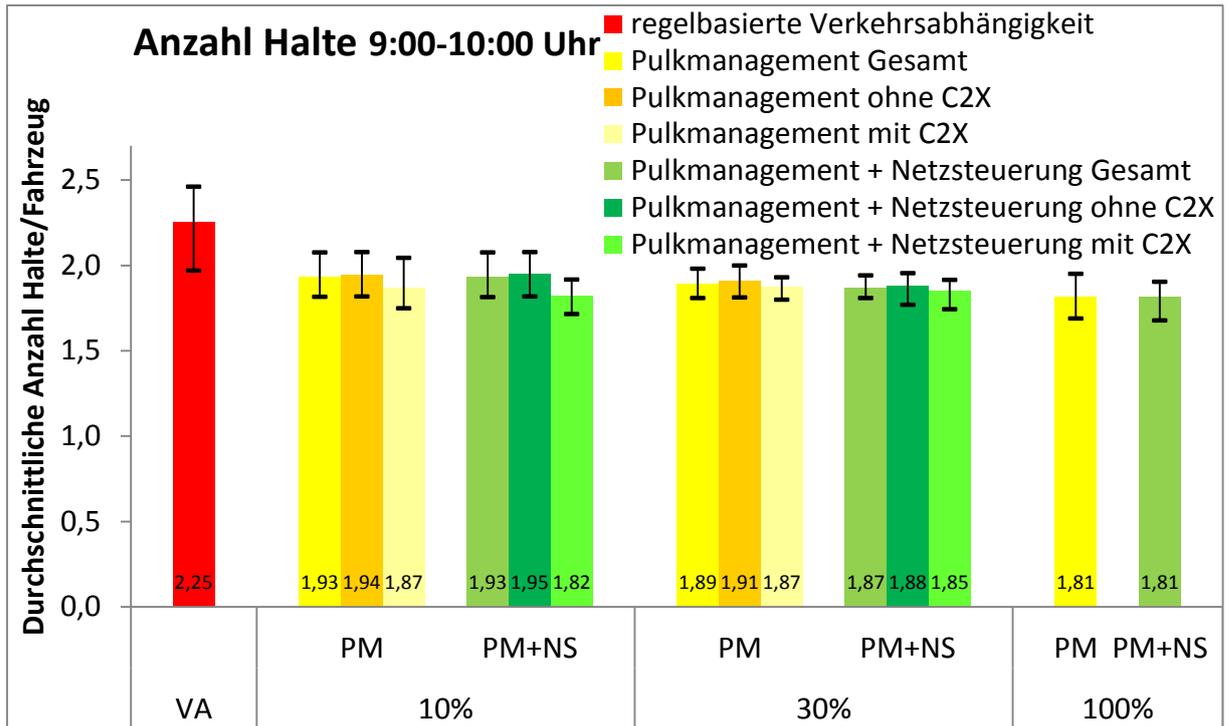


Abb. 0-14 Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-14,2%	-13,8%	-17,1%	-14,1%	-13,6%	-19,2%	0,0%	0,3%	-2,5%	>80% und < 95%
30%	-16,0%	-15,3%	-16,9%	-17,1%	-16,6%	-18,0%	-1,3%	-1,2%	-1,2%	< 80%
100%	-19,6%	-	-19,6%	-19,5%	-	-19,5%	0,0%	-	0,0%	nicht signifikant

Tab. 0-11 Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr

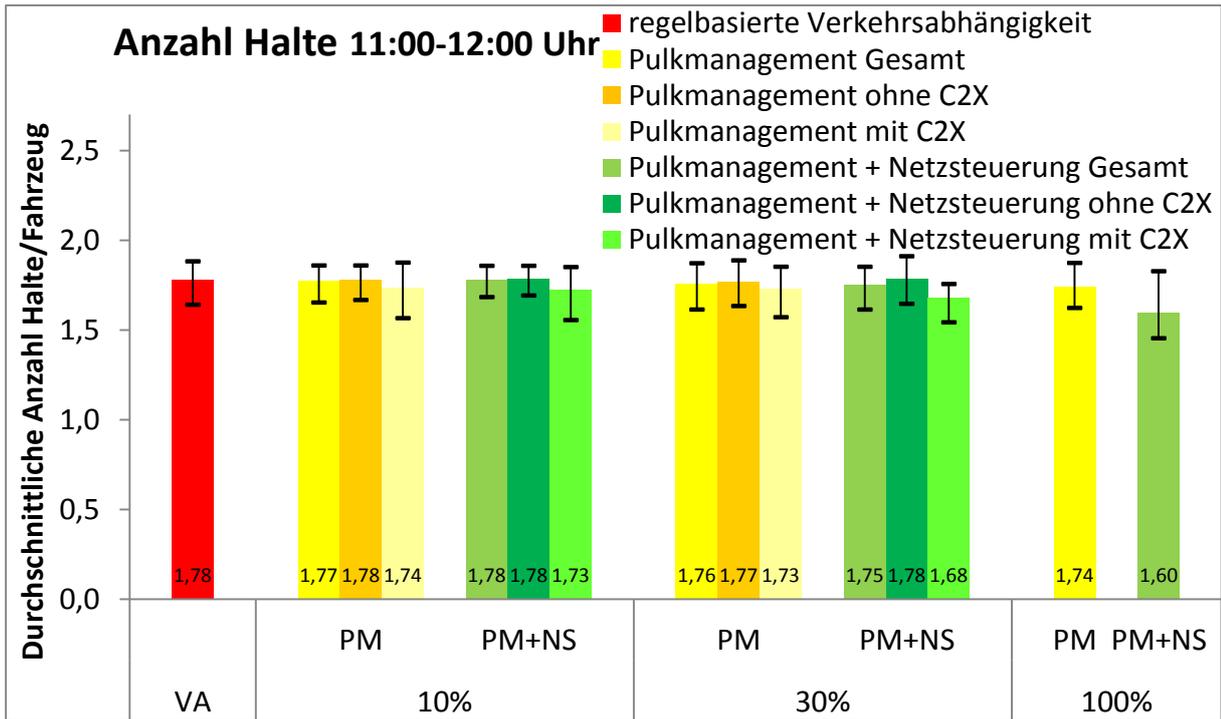


Abb. 0-15 Durchschnittliche Anzahl der Halte je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-0,3%	-0,1%	-2,3%	0,0%	0,3%	-3,0%	0,3%	0,4%	-0,7%	>80% und < 95%
30%	-1,1%	-0,5%	-2,7%	-1,5%	0,3%	-5,5%	-0,4%	-2,9%	-2,9%	< 80%
100%	-2,1%	-	-2,1%	-10,3%	-	-10,3%	-8,4%	-	-8,4%	nicht signifikant

Tab. 0-12 Prozentuale Veränderungen der Anzahl der Halte für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr

CO2 Emissionen

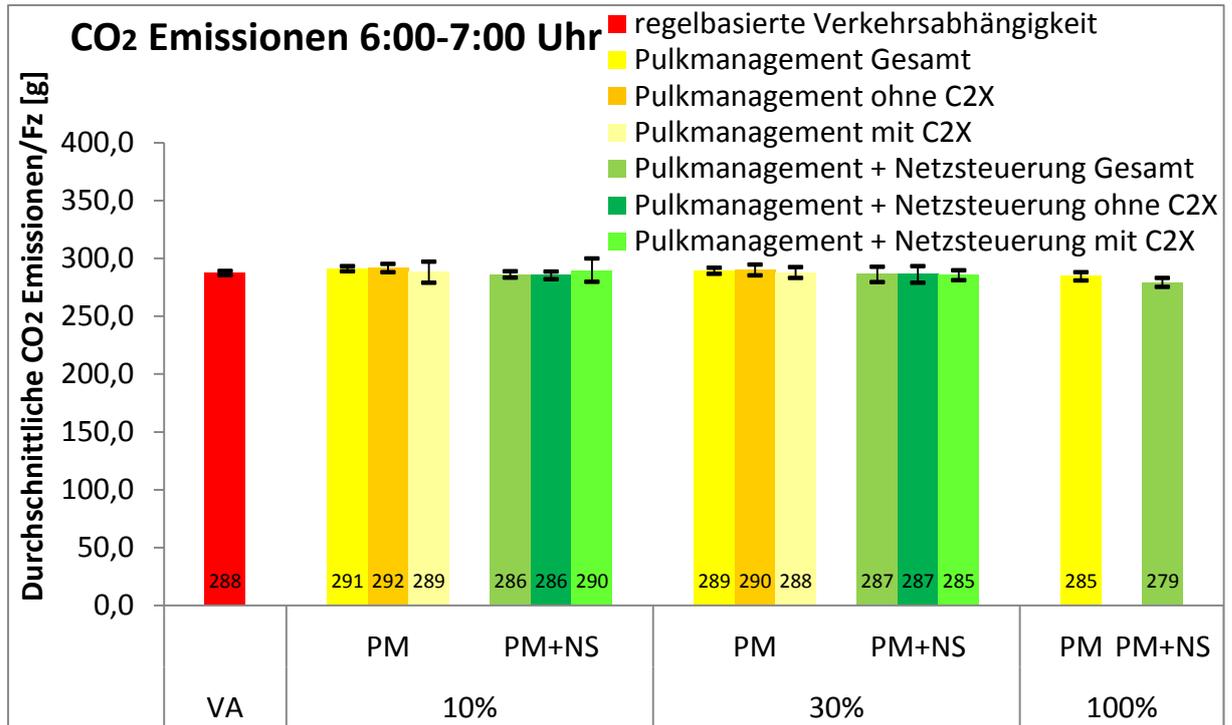


Abb. 0-16 Durchschnittliche CO₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	
10%	1,3%	1,4%	0,4%	-0,4%	-0,6%	0,7%	-1,7%	-1,9%	0,3%	>80% und < 95%
30%	0,5%	0,8%	0,0%	-0,4%	-0,2%	-0,8%	-0,9%	-0,8%	-0,8%	< 80%
100%	-1,1%	-	-1,1%	-2,9%	-	-2,9%	-1,9%	-	-1,9%	nicht signifikant

Tab. 0-13 Prozentuale Veränderungen der CO₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr

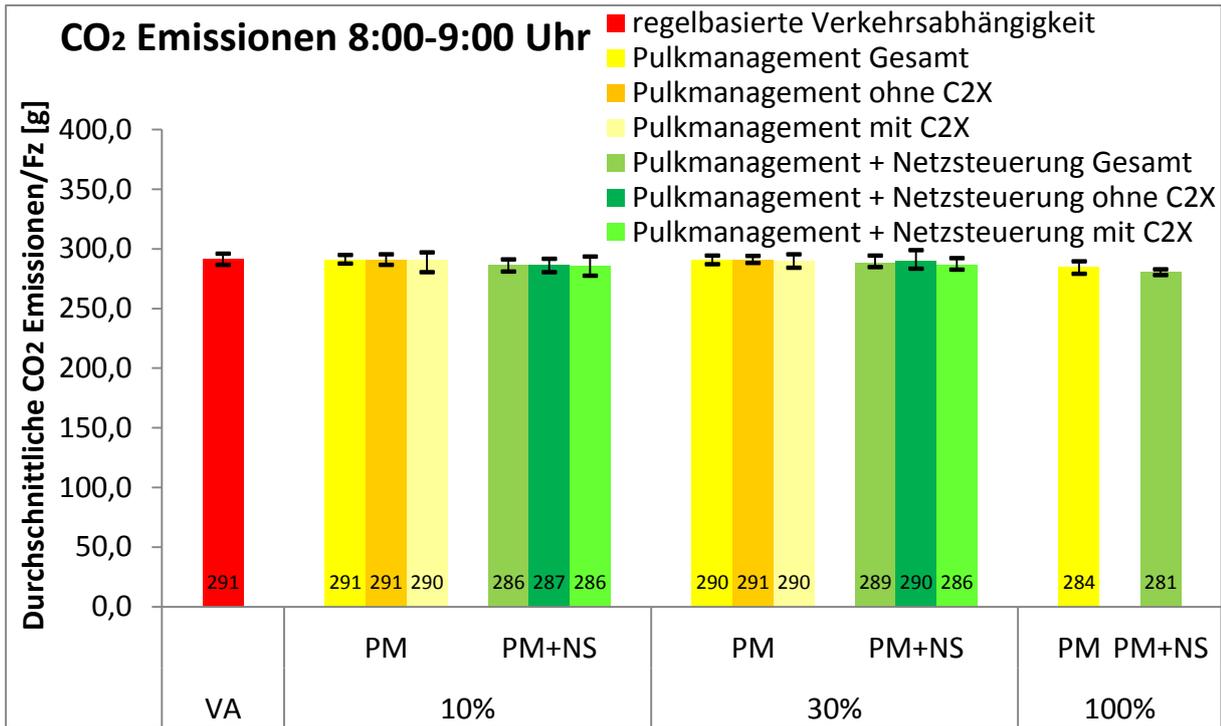


Abb. 0-17 Durchschnittliche CO₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-0,1%	0,0%	-0,2%	-1,6%	-1,5%	-1,8%	-1,5%	-1,5%	-1,5%	>80% und < 95%
30%	-0,2%	-0,1%	-0,4%	-0,8%	-0,5%	-1,6%	-0,6%	-1,1%	-1,1%	< 80%
100%	-2,2%	-	-2,2%	-3,6%	-	-3,6%	-1,4%	-	-1,4%	nicht signifikant

Tab. 0-14 Prozentuale Veränderungen der CO₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr

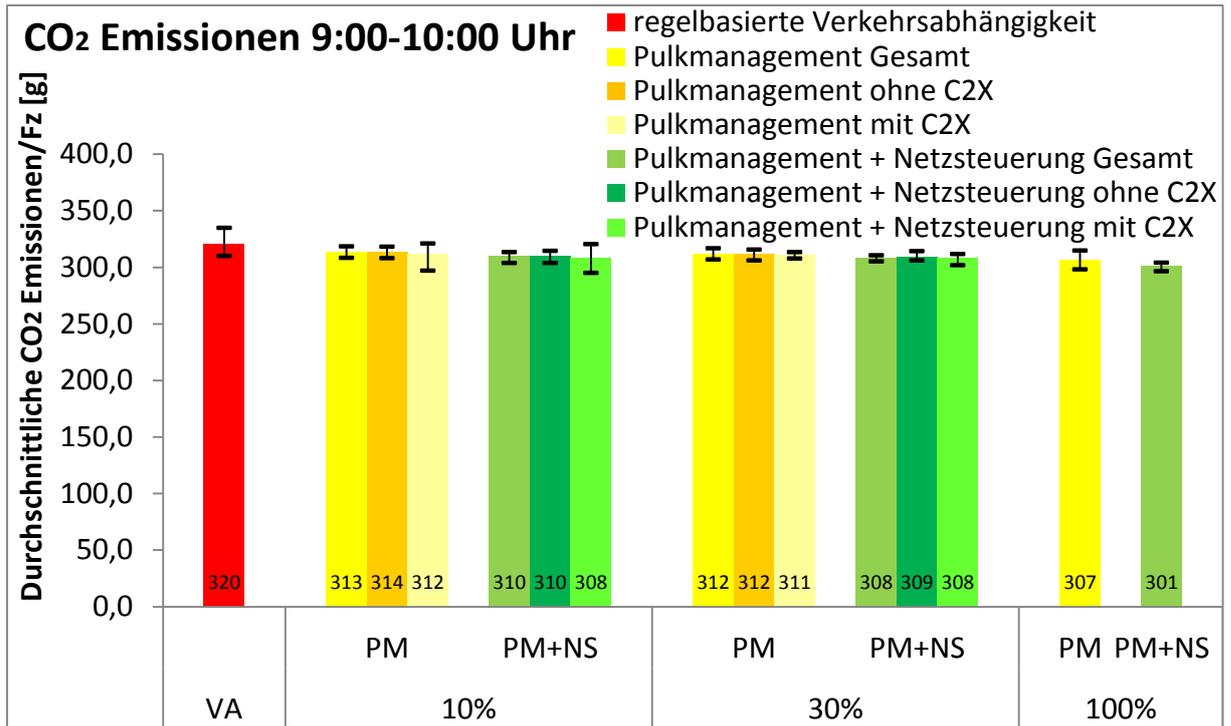


Abb. 0-18 Durchschnittliche CO₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-2,1%	-2,1%	-2,7%	-3,4%	-3,3%	-3,7%	-1,2%	-1,3%	-1,1%	>80% und < 95%
30%	-2,7%	-2,5%	-2,9%	-3,7%	-3,5%	-3,8%	-1,1%	-0,9%	-0,9%	< 80%
100%	-4,2%	-	-4,2%	-5,9%	-	-5,9%	-1,8%	-	-1,8%	nicht signifikant

Tab. 0-15 Prozentuale Veränderungen der CO₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr

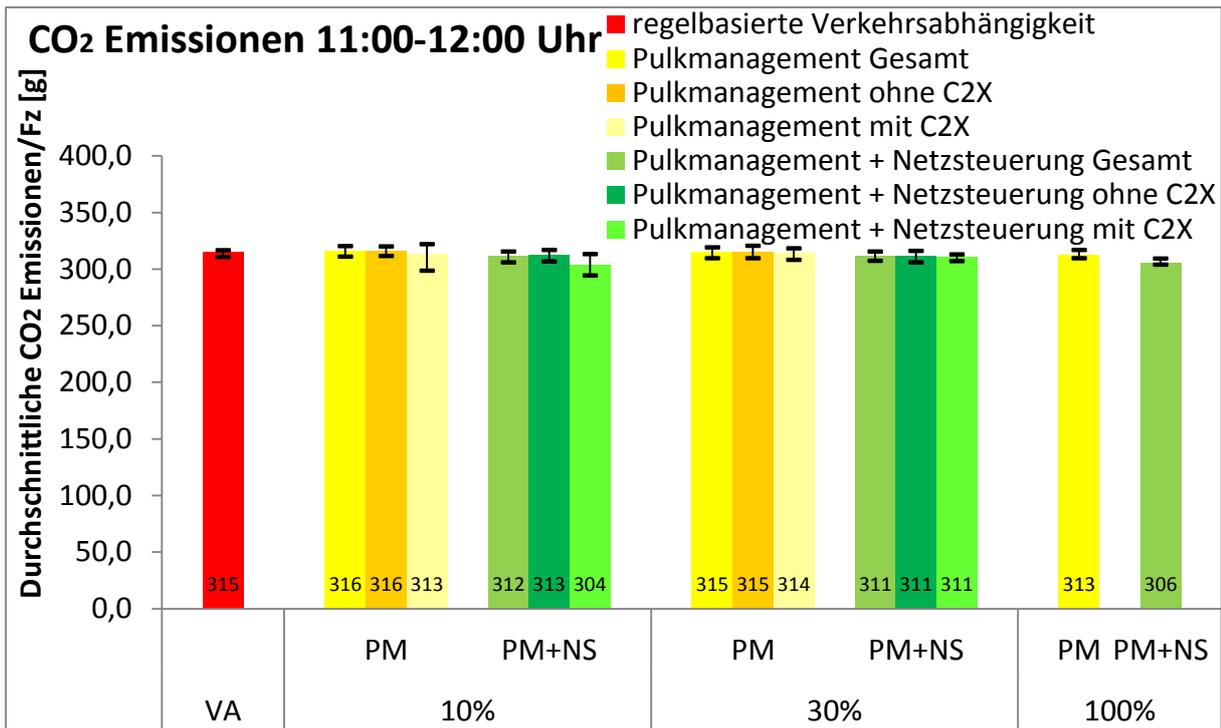


Abb. 0-19 Durchschnittliche CO₂ Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
10%	0,3%	0,4%	-0,5%	-0,9%	-0,6%	-3,5%	-1,2%	-1,0%	-3,0%	>80% und < 95%
30%	0,1%	0,2%	-0,2%	-1,1%	-1,1%	-1,2%	-1,2%	-1,0%	-1,0%	< 80%
100%	-0,7%	-	-0,7%	-2,9%	-	-2,9%	-2,2%	-	-2,2%	nicht signifikant

Tab. 0-16 Prozentuale Veränderungen der CO₂ Emissionen für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr

NO_x Emissionen

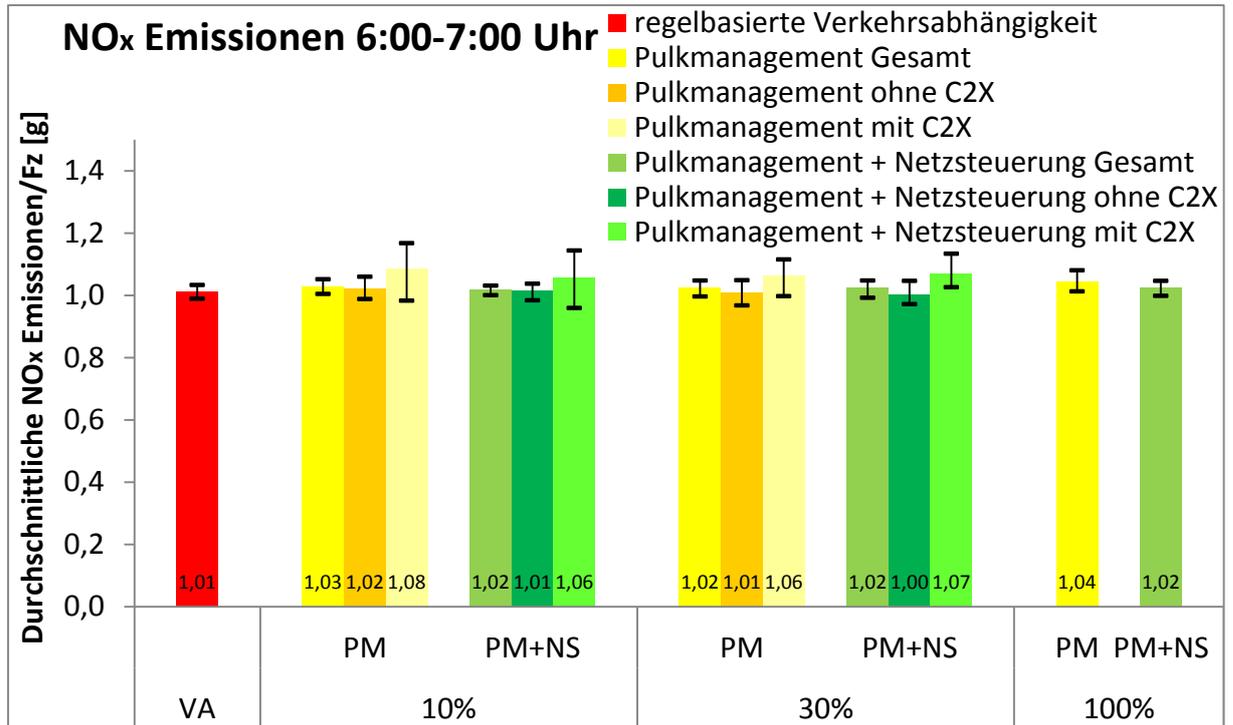


Abb. 0-20 Durchschnittliche NO_x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	
										> 95%
10%	1,6%	0,9%	7,2%	0,7%	0,3%	4,4%	-0,8%	-0,6%	-2,6%	>80% und < 95%
30%	1,3%	-0,4%	5,2%	1,3%	-0,8%	5,9%	0,0%	0,7%	0,7%	< 80%
100%	3,1%	-	3,1%	1,2%	-	1,2%	-1,8%	-	-1,8%	nicht signifikant

Tab. 0-17 Prozentuale Veränderungen der NO_x Emissionen für die Nachfragestunde von 6:00 bis 7:00 Uhr

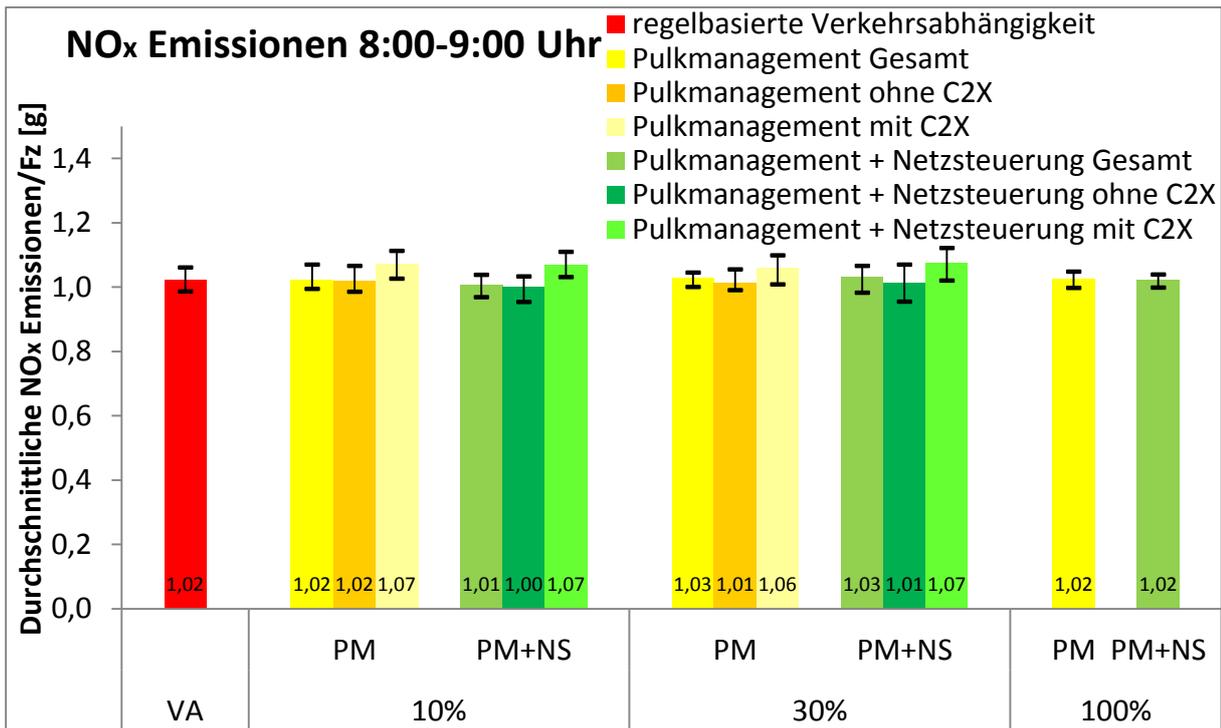


Abb. 0-21 Durchschnittliche NO_x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
										> 95%
10%	0,1%	-0,4%	4,9%	-1,7%	-2,3%	4,4%	-1,8%	-1,9%	-0,5%	>80% und < 95%
30%	0,4%	-0,9%	3,4%	0,7%	-1,1%	5,1%	0,3%	1,6%	1,6%	< 80%
100%	0,1%	-	0,1%	-0,1%	-	-0,1%	-0,2%	-	-0,2%	nicht signifikant

Tab. 0-18 Prozentuale Veränderungen der NO_x Emissionen für die Nachfragestunde von 8:00 bis 9:00 Uhr

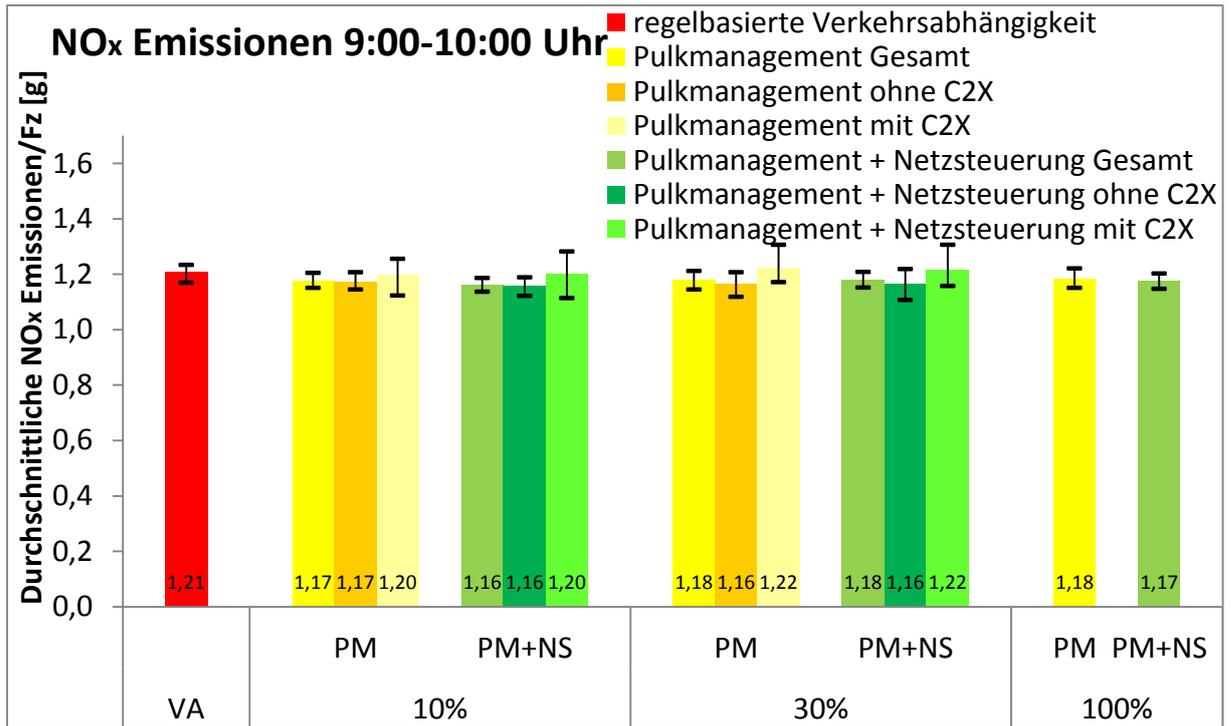


Abb. 0-22 Durchschnittliche NO_x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	Ge-samt	ohne C2X	mit C2X	
10%	-2,6%	-2,7%	-0,8%	-3,7%	-4,0%	-0,4%	-1,2%	-1,3%	0,4%	>80% und < 95%
30%	-2,0%	-3,5%	1,2%	-2,1%	-3,4%	0,9%	-0,1%	-0,3%	-0,3%	< 80%
100%	-1,8%	-	-1,8%	-2,6%	-	-2,6%	-0,8%	-	-0,8%	nicht signifikant

Tab. 0-19 Prozentuale Veränderungen der NO_x Emissionen für die Nachfragestunde von 9:00 bis 10:00 Uhr

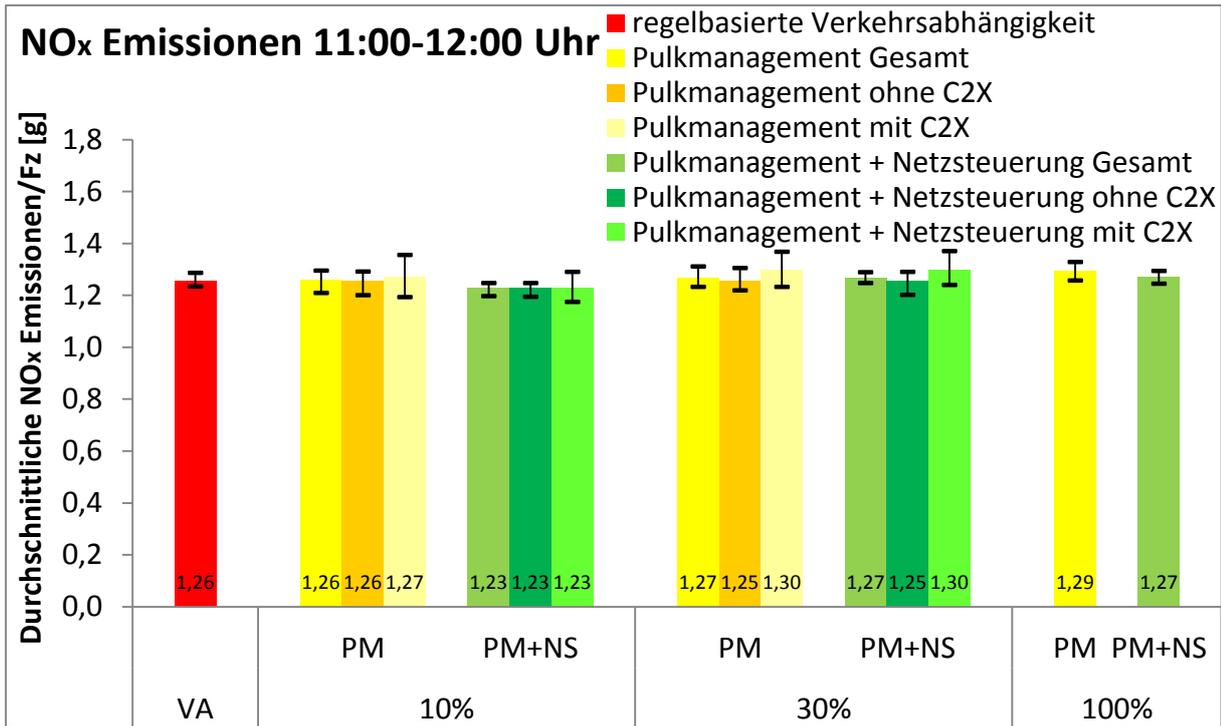


Abb. 0-23 Durchschnittliche NO_x Emissionen je Fahrzeug für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr

Ausstattungsrate	Durchschnittliche prozentuale Veränderungen									Konfidenzintervall
	PM/VA			PM+NS/VA			PM+NS/PM			
	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	Gesamt	ohne C2X	mit C2X	
10%	0,2%	0,0%	1,3%	-2,3%	-2,3%	-2,1%	-2,4%	-2,3%	-3,3%	>80% und < 95%
30%	0,9%	-0,1%	3,3%	0,9%	-0,2%	3,3%	0,0%	0,0%	0,0%	< 80%
100%	2,9%	-	2,9%	1,2%	-	1,2%	-1,7%	-	-1,7%	nicht signifikant

Tab. 0-20 Prozentuale Veränderungen der NO_x Emissionen für die Nachfragestunde von 11:00 bis 12:00 Uhr