


**Schriftenreihe  
Verkehr  
Heft 21**

**Thomas Otto**

**Kooperative Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung  
an signalisierten Knotenpunkten**

**Institut für Verkehrswesen  
Fachgebiet Verkehrstechnik  
und Transportlogistik  
Universität Kassel**

kassel  
university   
press

**Schriftenreihe Verkehr der Universität Kassel**

**Herausgeber:**

**Institut für Verkehrswesen**



**Thomas Otto**

**Kooperative Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung  
an signalisierten Knotenpunkten**

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Bauingenieurwesen an der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Robert Hoyer  
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich

Tag der mündlichen Prüfung

7. April 2011

ISBN print: 978-3-86219-190-1

ISBN online: 978-3-86219-191-8

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-1905>

Schriftenreihe Verkehr

Heft 21 – September 2011

Herausgeber:

Institut für Verkehrswesen

Universität Kassel

34109 Kassel

2011, kassel university press GmbH, Kassel

[www.uni-kassel.de/upress](http://www.uni-kassel.de/upress)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen

Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über

<http://dnb.d-nb.de> abrufbar

## Vorwort des Herausgebers

Lichtsignalanlagen ermöglichen auch bei hohem Verkehrsaufkommen die sichere Abwicklung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten. Hierfür ist allerdings die zyklische Unterbrechung der Verkehrsströme in Kauf zu nehmen, was zu Brems-, Halte- und Beschleunigungsvorgängen und somit zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs, der Emissionen und der Reisezeit gegenüber einer ungehinderten Fahrt führt. Eine allgemein akzeptierte Strategie für die Verteilung der verfügbaren Grünzeit auf die einzelnen Verkehrsströme verfolgt das Ziel, die Summe der Wartezeiten und Halte aller Fahrzeuge im Zulauf auf die Lichtsignalanlage zu minimieren. Die heutzutage praktizierte Erfassung des Verkehrs über stationäre Detektoren lässt eine direkte Messung dieser Kenngrößen indes nicht zu. Erst die allgemeine Verfügbarkeit von Satellitenortung und Mobilkommunikation eröffnete die Möglichkeit, die gesuchten Kenngrößen direkt aus dem Fahrtverlauf der Fahrzeuge zu gewinnen und den Lichtsignalanlagen zur Verfügung zu stellen. Im Gegenzug können diese ihre Schaltzeitpunkte an die Autofahrer übermitteln und somit eine Kooperation zwischen beiden begründen. Dies kann tiefgreifende Auswirkungen auf den Verkehrsablauf haben, sowohl durch die verkehrsabhängige Signalisierung selbst als auch wegen der zu erwartenden Beeinflussung des Fahrverhaltens durch die bisher nicht verfügbare Information. Hiermit verbunden ist eine direkte Einflussnahme auf die Energieeffizienz und die Emissionen im Zulauf auf sogenannte kooperative Lichtsignalanlagen.

Die vorliegende Arbeit greift diese recht neue Thematik auf und setzt sich das anspruchsvolle Ziel, die beiden Teilaspekte „Verkehrssteuerung durch verkehrsabhängige Signalisierung“ und „Verkehrsbeeinflussung durch Fahrerinformation“ in ihren Einzel- und Wechselwirkungen näher zu untersuchen.

Im Rahmen des Teilprojekts „Kooperative Lichtsignalanlage“ der Forschungsinitiative AKTIV-VM<sup>1</sup>, welches vom Fachgebiet Verkehrstechnik und Transportlogistik federführend bearbeitet wurde, hatte Herr Otto maßgeblichen Anteil an der Entwicklung eines entsprechenden Pilot-systems. Er konnte zeigen, dass mit üblichen mobilen Endgeräten unter Nutzung von GPS und WLAN verschiedene auf Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation beruhende Applikationen im öffentlichen Straßenraum realisierbar sind. Im Fokus der Arbeit standen hierbei die Information des Fahrers über seine raum-zeitliche Lage in der Grünen Welle und die Anzeige der verbleibenden Zeit bis zum nächsten Signalwechsel. Durch eine Vielzahl von Fahrversuchen konnten die Möglichkeiten und Randbedingungen eines derartigen kooperativen Systems aufgezeigt werden.

Um die Wirkungen einer kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung an signalisierten Knotenpunkten in ihrer ganzen Breite charakterisieren zu können, wurden die Fahrversuche durch umfassende Simulationen ergänzt. Anhand verschiedener Szenarien, in denen beispielsweise die Ausstattungsrate, die minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung, die Knotenpunktabstände oder der Koordinierungsgrad im Streckenabschnitt variiert wurden, konnten die wichtigsten Zusammenhänge aufgezeigt werden.

Kassel, im Juni 2011

Prof. Dr.-Ing. Robert Hoyer

<sup>1</sup> „Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr - Verkehrsmanagement“, gefördert vom Bundeswirtschaftsministerium, Förderkennzeichen 19P6018

## **Danksagung des Autors**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Verkehrstechnik und Transportlogistik im Institut für Verkehrswesen der Universität Kassel. Das Thema der Arbeit erschloss sich aus dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Projekt AKTIV – Teilprojekt „Kooperative Lichtsignalanlage“. Ich hatte das Glück, auf einige Forschungsergebnisse aufbauen zu können.

An erster Stelle gebührt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Hoyer als Hauptreferent der Arbeit. Als Fachgebietsleiter bot er mir den fruchtbaren Boden und die kreativen Freiräume für die vorliegende Arbeit. Dank gilt ihm auch für die fachlichen Auseinandersetzungen und die konstruktive Kritik bei der gesamtheitlichen Erfassung der Problematik.

Ebenso möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich (Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig) für die Übernahme des Koreferats, die fachlichen Hinweise und die Denkanstöße bedanken.

Mein Dank gilt schlussendlich all jenen, die auf ihre individuelle Art und Weise zum Gelingen und zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben. Ohne weitere Unterstützung von Familie, Freunden und Kollegen wären das Schreiben und letztlich auch das Beenden dieser Arbeit sicherlich nicht möglich gewesen.

Kassel, im Februar 2011

Thomas Otto

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Ziele .....	1
1.2	Aufbau der Arbeit.....	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen.....</b>	<b>4</b>
2.1	Technische Voraussetzungen .....	4
2.1.1	Stationäre und mobile Datenerfassung.....	4
2.1.2	Satellitengestützte Ortungssystem.....	7
2.1.3	Kommunikationssysteme .....	10
2.2	Verkehrsbeeinflussung über erweiterte Informationen.....	12
2.2.1	Ortsfeste Restzeitanzeige .....	12
2.2.2	Ortsfeste Grüne Welle Information.....	13
2.2.3	Mobile Grüne Welle Information.....	13
2.3	Verkehrssteuerung über Lichtsignalanlagen .....	20
2.3.1	Klassifizierung nach Steuerungsebenen.....	20
2.3.2	Klassifizierung nach Steuerungsarten.....	20
2.3.3	Steuerungsqualität .....	25
2.4	Fazit.....	29
<b>3</b>	<b>Entwicklung und Umsetzung der kooperativen Lichtsignalanlage.....</b>	<b>32</b>
3.1	Problemstellung .....	32
3.2	Systemanforderungen und Systemaufbau.....	33
3.3	Ortung und Georeferenzierung .....	35
3.3.1	Ortung .....	35
3.3.2	Georeferenzierung .....	39
3.4	Kommunikation.....	40
3.5	Testumgebung für die Hardware- und Softwareentwicklung .....	45
3.5.1	Devices-in-the-Loop-Ansatz.....	45
3.5.2	Feldversuche.....	47
3.6	Zusammenfassung .....	48
<b>4</b>	<b>Kooperative Verkehrsbeeinflussung .....</b>	<b>49</b>
4.1	Problemstellung .....	49
4.2	Anzeige von Restzeitinformationen .....	50
4.3	Anzeige von Geschwindigkeitsinformationen .....	50
4.3.1	Intention .....	50
4.3.2	Untersuchungsmethodik und Simulationswerkzeug .....	51
4.3.3	Einflussfaktoren auf die verkehrliche Wirksamkeit.....	59
4.3.4	Diskussion der Fahrtrajektorien .....	74
4.3.5	Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen.....	80
4.4	Zusammenfassung .....	82



<b>5</b>	<b>Kooperative Verkehrssteuerung .....</b>	<b>85</b>
5.1	Problemstellung .....	85
5.2	Gegenüberstellung mobil erfasster Parameter .....	86
5.2.1	Untersuchungsmethodik.....	86
5.2.2	Wartezeit und Verlustzeit .....	89
5.2.3	Wartezeit und Rückstaulänge .....	91
5.2.4	Anzahl der Halte.....	100
5.2.5	Zusammenfassung.....	101
5.3	Kooperative Lichtsignalsteuerung .....	102
5.3.1	Datenaustausch in der Zufahrt .....	102
5.3.2	Ausstattungsraten kooperationsfähiger Fahrzeuge.....	105
5.4	Zusammenfassung.....	109
<b>6</b>	<b>Kooperatives Gesamtsystem .....</b>	<b>112</b>
6.1	Problemstellung .....	112
6.2	Einsatzgebiete und Einsatzgrenzen .....	112
6.2.1	Einzelknotenpunkt und Streckenzug .....	112
6.2.2	Verkehrsnetz .....	115
6.3	Empfehlungen für den Einsatz.....	117
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>118</b>
7.1	Zusammenfassung.....	118
7.2	Grenzen und Ausblick .....	119
7.3	Fazit .....	121
	Literaturverzeichnis.....	III
	Abkürzungsverzeichnis.....	IX
	Abbildungsverzeichnis und Tabellenverzeichnis .....	X
	Anhangverzeichnis .....	XII

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation und Ziele

Signalisierte Knotenpunkte sind unerlässliche Bestandteile des innerstädtischen Hauptstraßennetzes. Sie beeinflussen maßgeblich die Qualität des Verkehrsablaufs und sind damit von besonderer Bedeutung in Bezug auf die verkehrliche Steuerung und die mitunter verkehrspolitisch motivierte Lenkung des Verkehrsgeschehens. Seit geraumer Zeit rücken telematische Ansätze in das Blickfeld von Praxis und Forschung. Die Grundidee der Kooperation zwischen der Lichtsignalanlage (LSA) als infrastrukturseitige Einrichtung und dem Fahrzeug inklusive Fahrer besteht im gegenseitigen Informationsaustausch zur Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit.

Vielversprechende Funktionalitäten des kooperativen Gesamtsystems sind die Verkehrsbeeinflussung einerseits und die Verkehrssteuerung andererseits.

Alle Applikationen, die dem Verkehrsteilnehmer Hinweise zur Verkehrssituation oder zu aktuellen und zukünftigen Steuerungsentscheidungen der Lichtsignalanlagen geben, werden in dieser Arbeit als Verkehrsbeeinflussung bezeichnet. Sie stellen eine Fahrerassistenzfunktion dar. Ein Beispiel sind Geschwindigkeitsempfehlungen zum Erreichen der stromabwärtigen Lichtsignalanlage bei Grün. Diese sind rechtlich nicht bindend.

Die Funktion der Verkehrssteuerung umfasst in dieser Arbeit vorwiegend die Anpassung der Lichtsignalsteuerung an die aktuelle Verkehrssituation. Diese Funktionalität ergibt sich direkt aus der Signalisierung und Steuerung der Lichtsignalanlagen. Sie ist rechtlich bindend.

Ziele der Kooperation sind die Erschließung neuer bzw. bislang ungenutzter Potenziale sowie die Kompensation der bestehenden Einsatzgrenzen der Einzelfunktionen durch die Einsatzgebiete des jeweilig anderen Partners. Die bidirektionale Kommunikation zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage umfasst die folgenden zwei Kommunikationswege:

### **Lichtsignalanlage → Fahrzeug:**

Durch die Übertragung von Signalisierungs- und Verkehrsinformationen von der Infrastruktur zum Fahrzeug kann eine Beeinflussung des Fahrverhaltens erfolgen. Informationen zu zukünftigen Steuerungsentscheidungen, zum Verkehrsablauf, zu möglichen Gefahrenstellen oder zu Umleitungsempfehlungen können so übermittelt werden. Damit wird das Konzept des informierten Fahrers als Baustein einer telematischen Gesamtlösung verwirklicht (MENIG ET AL.-2005). Verkehrliche Effekte sind vorwiegend aus der Tatsache zu erwarten, dass der Fahrzeugführer heute keine oder nur spärlich Informationen über zukünftige Steuerungsentscheidungen von Lichtsignalanlagen erhält. In Zufahrten zu Lichtsignalanlagen sind in Deutschland eher selten statische und fast nie dynamische Informationen zur optimalen Geschwindigkeit in der Grünen Welle vorhanden. Ein Austausch von Informationen über Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation ermöglicht die Anzeige von dynamischen Informationen zukünftiger Steuerungsentscheidungen direkt im Fahrzeug. Daraus resultiert die Möglichkeit der Beeinflussung der Fahrweise über längere Streckenabschnitte. Durch den Informationsgewinn beim Kraftfahrzeugführer kann infolge der Anpassung der

Fahrgeschwindigkeit an aktuelle und zukünftige Steuerungsentscheidungen der Lichtsignalanlage die Anzahl der Halte in der Zufahrt reduziert werden. Die Funktionalität der kooperativen Verkehrsbeeinflussung erschließt im Hinblick auf die Qualität des Verkehrsablaufs genau dort bislang ungenutzte Potenziale, wo die herkömmliche Lichtsignalsteuerung an ihre Grenzen stößt.

### **Fahrzeug → Lichtsignalanlage:**

Die zweite Kommunikationsrichtung der kooperativen Gesamtlösung ist die Übermittlung der vom fahrzeugseitigen mobilen Endgerät gesammelten individuellen Daten und der daraus abgeleiteten Verkehrskenngrößen an die Lichtsignalanlage. Die Datenerfassung im Rahmen von verkehrsabhängig signalisierten Knotenpunkten basiert derzeit auf der stationären Erfassung der lokalen Verkehrskenngrößen Verkehrsstärke, Belegung und Zeitlücke. Wesentlicher Nachteil der stationären Datenerfassung ist die mangelnde Repräsentativität des ermittelten Verkehrszustands für die gesamte Zufahrt einer Lichtsignalanlage aufgrund zeitlicher Instationaritäten und räumlicher Inhomogenitäten im innerstädtischen Verkehrsablauf. Neben stationären Erfassungseinrichtungen bietet die mobile Erfassung von Verkehrskenngrößen eine sinnvolle Ergänzung zur Abschätzung und Prognose der aktuellen Verkehrssituation. Über eine permanente mobile Erfassung von individuellen Bewegungskenngrößen entsteht aus räumlich-zeitlichen Verkehrskenngrößen ein detailliertes Verkehrslagebild der Umgebung kooperationsfähiger Fahrzeuge. Die kooperative Verkehrssteuerung kann sich durch einen erweiterten Erfassungshorizont und einen zeitlichen Informationsvorlauf gegenüber der stationären Erfassung hinsichtlich ihrer Steuerungsentscheidungen besser an die aktuelle Verkehrssituation anpassen.

Im Zusammenspiel der Teilfunktionalitäten der Verkehrsbeeinflussung und der Verkehrssteuerung über einen wechselseitigen Austausch von Informationen mittels Funknetzwerken kann das telematische Gesamtsystem vermutlich seine vollen Potenziale entfalten. Augenscheinlich stehen bei dieser Kooperation jedoch folgende zwei Interessen im Zielkonflikt:

- Die Grundlage der kooperativen Verkehrsbeeinflussung ist eine sichere Prognose von Steuerungsentscheidungen und deren Anzeige im Fahrzeug. Ein großer Vorhersagehorizont kann aber nur dann gewährleistet werden, wenn das zugrundeliegende Steuerungsprogramm wenig oder gar nicht flexibel arbeitet. Eine exakte Vorhersage von Steuerungsentscheidungen ist lediglich bei Festzeitsteuerungen oder im Phasenübergang verkehrsabhängiger Steuerungen möglich.
- Die kooperative Verkehrssteuerung sollte jedoch dem gegenüber bestrebt sein, möglichst flexibel auf sich ändernde Verkehrssituationen reagieren zu können. Die Anpassung der Lichtsignalsteuerung an die aktuelle bzw. prognostizierte Verkehrssituation verkürzt den Prognosehorizont zur Ermittlung zukünftiger Steuerungsentscheidungen stark und steht den Anforderungen der kooperativen Verkehrsbeeinflussung entgegen.

Die Erörterung und Bewertung des augenscheinlichen Konflikts ist nach der Ermittlung des Nutzens der Teilfunktionalitäten Bestandteil der Arbeit. Gesamtziel und Mittelpunkt der wissenschaftlichen Betrachtung der Arbeit ist die Ermittlung und Bewertung der verkehrlichen Nutzen unter Berücksichtigung der Ausstattungsraten kooperationsfähiger Fahrzeuge, der Zusammenhänge zwischen den mobil erfassten Kenngrößen sowie der Möglichkeit des

Datenaustauschs in der Zufahrt. Eine verbesserte Qualität des Verkehrsablaufs kann zudem zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit und einer verbesserten Umweltverträglichkeit führen. Abgesehen vom Fokus auf die verkehrlichen Effekte eines solchen kooperativen Gesamtsystems zur Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung, wird diese Arbeit auch den technischen Aufbau und die Realisierung des Systems beschreiben.

## **1.2 Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit gliedert sich neben diesem Kapitel 1 „Einführung“ in sechs weitere Kapitel.

In Kapitel 2 „Grundlagen“ erfolgt eine umfassende Literaturrecherche zur Anpassung der Lichtsignalsteuerung und der Beeinflussung des Fahrverhaltens. Dabei werden der Forschungsbedarf erörtert sowie Abgrenzungen der eigenen Arbeit zu anderen Veröffentlichungen gezogen.

Der Systemaufbau in all seinen Bestandteilen wird in Kapitel 3 „Entwicklung und Umsetzung der kooperativen Lichtsignalanlage“ dieser Arbeit beschrieben. Dabei wird die telematische Lösung vorwiegend technisch beleuchtet.

Die verkehrliche Wirksamkeit der Funktionalität der Verkehrsbeeinflussung wird in Kapitel 4 beschrieben. Es wird vorwiegend der verkehrliche Nutzen dynamischer Geschwindigkeitsempfehlungen erörtert.

Für die Funktionalität der kooperativen Verkehrssteuerung relevante mobil erfasste Daten werden in Kapitel 5 untersucht und einander gegenübergestellt. Die aus den Funktionalitäten resultierenden Einsatzgebiete und Einsatzgrenzen werden analysiert.

Die Kooperation im System zur Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung wird in Kapitel 6 thematisiert. Es werden vor allem sich verstärkende oder gegenseitig auslöschende verkehrliche Wirkungen der Teilfunktionen im Zusammenspiel beleuchtet und Empfehlungen für den Einsatz solcher Systeme gegeben.

Abgeschlossen wird die Arbeit im Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse, der Klärung des weiteren Forschungsbedarfs sowie mit einem Fazit.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Technische Voraussetzungen

#### 2.1.1 Stationäre und mobile Datenerfassung

Die Erfassung und Bewertung der aktuellen Verkehrssituation an Knotenpunkten, in Straßenzügen und in Straßennetzen ist Voraussetzung nahezu jedes Systems zur Verkehrssteuerung und Verkehrsbeeinflussung. Neben konventionellen stationären Erfassungseinrichtungen rücken die mobil erfassten Daten immer mehr ins Blickfeld bei der Umsetzung telematischer Gesamtlösungen.

##### **Stationäre Datenerfassung**

Die stationäre Datenerfassung hat sich als Basistechnologie zur Erfassung der aktuellen Verkehrssituation im Straßenverkehr und vor allem im Umfeld signalisierter Knotenpunkte etabliert. „Detektoren sind Geräte zur automatischen Erfassung von Zuständen und Zustandsänderungen sowie von besonderen Merkmalen und Eigenschaften des Verkehrs. Ein Detektor besteht aus einer Wahrnehmungseinrichtung (Sensor) und einer Auswerteschaltung. Je nach ‚Intelligenz‘ des Detektors werden als Ausgabegröße nur Grundinformationen (Anwesenheit, Abwesenheit) oder aber bereits abgeleitete Verkehrskenngrößen (z. B. Geschwindigkeit) geliefert.“ (FGSV-1991A). Stationäre Erfassungseinrichtungen sind ortsfest installiert und haben einen begrenzten Erfassungshorizont.

Lokal erfasste Daten sind wesentliche Eingangsgrößen heutiger verkehrsabhängiger Steuerungsverfahren. Sie dienen der Abbildung der aktuellen Verkehrssituation im Umfeld des Knotenpunktes. Verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerungen können durch die Auswertung von Detektorwerten bspw. Freigabeanforderungen realisieren, Freigabezeiten anpassen oder die Signalprogrammauswahl beeinflussen.

In Tabelle 2-1 sind die gebräuchlichsten stationären Detektorarten nach ihrem physikalischen Messprinzip dargestellt und mit Beispielen hinterlegt. Die für die LSA-Steuerung relevanten Detektoren werden nachfolgend näher beschrieben.

Ein *Induktivschleifendetektor* ist eine in den Fahrbahnbelag verlegte Drahtschleife inklusive der Auswerteeinheit und Stromversorgung. In dieser Schleife wird aus einer oszillatorisch erzeugten Wechselspannung ein magnetisches Wechselfeld erzeugt, wobei der magnetische Fluss durch sich über die Schleife bewegendes Metall verändert wird. Die Änderung wird ausgewertet. Die Kenngrößen Verkehrsstärke, Belegungszeit, Zeitlücke, Fahrzeuggeschwindigkeit und Fahrzeugart können direkt erhoben bzw. abgeleitet werden (FGSV-1991A). Induktivschleifendetektoren sind die gebräuchlichste Detektorart und gelten als besonders zuverlässig, da sie nahezu unabhängig von Witterungseinflüssen ist (LEHNHOFF-2005). Es handelt sich um die Erfassungstechnik mit den meisten praktischen Erfahrungen (FGSV-2006B).

LEHNHOFF-2005 untersuchte im Jahr 2005 mehrere Induktivschleifendetektoren innerstädtischer Knotenpunktzufahrten im Stadtgebiet Hannover. Dabei stellte sich heraus, dass

etwa ein Drittel der Detektoren mit einer sehr hohen Genauigkeit von über 90 % arbeiten. Für die Qualitäts- und Funktionssicherung von Induktivschleifendetektoren ist eine jährliche Funktionsprüfung nach DIN1-2002 vorzunehmen.

Tabelle 2-1: Stationäre Erfassungseinrichtungen (FGSV-1991A)

Gruppe	Messprinzip	Beispiele
<b>Berührungs-Detektor</b>	mechanische Betätigung eines elektrischen Kontakts	pneumatischer Detektor, Anforderungstaster, Schienenschalter, Fahrdrachtschalter, Piezo-Koaxialkabel
<b>magnetischer Wechselfeld-Detektor</b>	Metallteile am Fahrzeug oder Personen verändern das vom Detektor erzeugte Wechselfeld	Induktivschleifendetektor, Koppelspule, Leiterschleife, Schienenschalter, magnetischer Wechselfeld-Detektor, Gleisfreimeldesystem, Weichensperrkreis, kapazitive Anforderungstaster
<b>magnetischer Gleichfeld-Detektor</b>	Metallteile am Fahrzeug verändern das vom Detektor erzeugte Gleichfeld	magnetischer Schienenschalter
<b>Strahlungsfeld-Detektor</b>	Veränderung, Unterbrechung bzw. Reflexion innerhalb von Strahlungsfeldern werden ausgewertet	Ultraschall-Detektoren, Radar-Detektoren, Schlitz-Detektoren, passive Infrarot-Detektoren, aktive Infrarot-Detektoren

Ein *Passiv-Infrarot-Detektor* erkennt einen Gegenstand über die Auswertung des Strahlungsunterschieds zwischen diesem Gegenstand und dem Hintergrund (vgl. Tabelle 2-1). Vorteil dieser Messtechnik ist das genau definierte Messfeld, in dem eine kurzfristige Erfassung der Anwesenheit stehender Fahrzeuge möglich ist. Die Erfassung von Einzelgeschwindigkeiten ist infolge von Abschattungsproblemen bei schräger Ausrichtung des Detektors und dichtem Verkehr schwierig (FGSV-2006B).

Für die *Videoerfassung* wird die Änderung der Grautöne im Videobild ausgewertet und über im Bild festgelegte virtuelle Detektoren die An- bzw. Abwesenheit eines Fahrzeugs ermittelt. Kompliziert wird die Erfassung vor allem durch Schlagschatten von Bäumen, Häusern oder Fahrzeugen sowie ungünstige Sonneneinstrahlung, ungünstige Wetterbedingungen wie Nebel, Schnee bzw. Regen oder die Erfassung bei Nacht und in den Stunden der Dämmerung (FGSV-2006B).

Mit Fokus auf die Fehleranfälligkeit der stationären Erfassungseinrichtungen ergeben sich laut FGSV-2006A zwei Ursachen für die Ungenauigkeiten solcher Systeme. Erstens ist eine fehlerfreie Erfassung infolge von Naturgesetzen und Aspekten der Wirtschaftlichkeit nie möglich und zweitens wird die geforderte Genauigkeit in der Mehrzahl der Fälle technisch überwacht. Es gibt aber keine Referenzsysteme, die eine 100-prozentige Genauigkeit aufweisen. LISTL-2003 überprüfte einige der vorgestellten Verfahren auf ihre Zuverlässigkeit. Induktivschleifen haben mit einem Fehler zwischen 0,1 und 0,6 % bei der Erfassung der Anwesenheit von Fahrzeugen die höchste Genauigkeit. Infrarotsensoren erzeugen ein wenig schlechteres Ergebnis. In WIEDEMANN ET AL.-1991 wurde eine Gegenüberstellung von Infrarot-, Radar- und Induktivschleifendetektoren im Jahr 1990 auf Bundesautobahnen vorgenommen. Untersucht wurde die Bestimmung der Geschwindigkeit und der Verkehrsstärke mittels dieser Detektoren. Im Allgemeinen kann es bei Radar-, Infrarot- und induktiver

Erfassung durch Fahrstreifenwechselforgänge zu Problemen in Bezug auf die Verkehrsstärkeerfassung kommen.

### **Mobile Datenerfassung**

Seit den 1980er Jahren gibt es Forschungsansätze zur exakten Erfassung von Verkehrszuständen über die mobile Verkehrsdatenerfassung. Die Begrifflichkeit Floating Car Data (FCD) wurde aus dem Angelsächsischen übernommen. Synonyme hierfür sind auch „Moving Observers“ oder „Probes“. FCD sind über im Verkehr mitschwimmende Fahrzeuge erfasste mobile Verkehrsdaten. Im übergeordneten Netz der Bundesautobahnen und im innerstädtischen Netz ergänzen sie die vorhandenen Daten. Im nachgeordneten Außerortsnetz, in dem bislang nur wenig stationäre Erfassungseinrichtungen vorhanden sind, bieten FCD den größten Nutzen. Über eine permanente Datenerfassung der Bewegungskenngrößen einzelner Fahrzeuge entsteht aus räumlich-zeitlichen Verkehrsdaten und daraus abgeleiteten Verkehrskenngrößen ein detailliertes Verkehrslagebild der Umgebung der Fahrzeuge. In den meisten Fällen werden die gesammelten Daten aggregiert und ereignis- bzw. anlassbezogen an die Infrastruktur übermittelt. Vorteil dieser Online-Erfassung und Online-Auswertung ist die Möglichkeit einer sofortigen Reaktion der Systeme zur Verkehrssteuerung und Verkehrsbeeinflussung auf sich ändernde Verkehrszustände. Somit können, im Vergleich zur heute üblichen stationären Erfassung, Störungen besser detektiert und präzisere Gefahrenwarnungen übermittelt werden.

Ein noch breiteres Spektrum zur Erfassung und Auswertung der verkehrlichen Kenngrößen bieten Extended Floating Car Data (X-FCD). Aus dem fahrzeuginternen Datennetzwerk können Temperatur, Fahrtrichtungsanzeigen, Abblend-, Fern- oder Nebelschlusslicht, Navigation, Warnblinkanlage, Scheibenwischer etc. ausgelesen werden. Kritische Umfeldsituationen wie Nebel, Stau, Glätte und Niederschlag sind so detektierbar und können an die in den Gefahrenbereich fahrenden Fahrzeuglenker übermittelt werden. X-FCD-Meldeinhalte unterstützen Verkehrsinformationsdienste sowie Systeme der dynamischen Zielführung oder der lokalen Gefahrenwarnung (BREITENBERGER ET AL.-2004).

Auch mobil erfasste Daten weisen heute eine hohe Genauigkeit auf. Die über das Global Positioning System (GPS) ermittelte Geschwindigkeit zeigt kaum Abweichungen von mit Videosystemen erfassten Referenzmessungen (STEINAUER ET AL.-2006). Laut BREITENBERGER ET AL.-2004 reichen bei einer Verkehrsstärke von  $q = 3.000 \text{ Fz/h}$  auf Bundesautobahnen schon 0,6 % ausgestattete Fahrzeuge aus, um in einem 10-Minuten-Intervall mittels FCD ein Stauereignis detektieren zu können. Weiter wurde am Beispiel einer mit 373 Fz/h belasteten innerstädtischen Hauptverkehrsstraße ermittelt, dass eine Ausstattungsrate von 10,2 % am Tag und 20,3 % in der Nacht genügt, um Störungen zu erkennen. Die zunehmende Wahrnehmung der X-FCD Potenziale sowie die sinkenden Preise der Hardware und der Datenübertragung begünstigen den Durchbruch der mobilen Verkehrsdatenerfassung im europäischen Straßennetz.

### **Gegenüberstellung stationär und mobil erfasster Daten**

Nahezu alle heute angewendeten Steuerungsverfahren im Verkehrssektor benötigen als Eingangsgrößen für die Abbildung der aktuellen Verkehrssituation und Prognose zukünftiger

Verkehrszustände kollektiv erfasste Daten bzw. daraus abgeleitete Kenngrößen. Diese können über stationäre Erfassungseinrichtungen ermittelt werden. Da sich diese Arbeit jedoch mit der Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung auf der Grundlage von mobil erfassten individuellen Verkehrsdaten beschäftigt, ist eine Differenzierung zwischen kollektiv und individuell erhobenen Messgrößen zwingend erforderlich. In den zusätzlich gewonnenen Informationen wird die Erschließung bislang ungenutzter Potenziale vermutet.

Kollektiv erfasste Verkehrsdaten und daraus abgeleitete Kenngrößen werden über die Gesamtheit aller den Detektor passierenden Fahrzeuge erfasst. Individuelle Daten hingegen sind Fahrtverlaufsdaten einzelner Fahrzeuge und werden typischerweise aus FCD extrahiert. Eine Überführung von individuellen Daten in kollektive Kenngrößen ist streng genommen ohne weitere Algorithmik nur bei Vollausstattung kooperationsfähiger Fahrzeuge im Fahrzeugstrom möglich.

Allerdings sollen für die kooperative Verkehrssteuerung der Lichtsignalanlage Daten des Fahrtverlaufs oder der Routenwahl nutzbar gemacht werden. Mobil erfasste Kenngrößen wie Anzahl der Halte, Wartezeit, Rückstaulänge und die mittlere Reisegeschwindigkeit dienen dabei zum Abbilden der aktuellen Verkehrssituation in den einzelnen Zufahrten. Das Verhalten der Kenngrößen untereinander wird in Kapitel 5 umfassend beschrieben. Um den Aspekt der Ausstattungsrate näher zu erläutern, ist in Abbildung 2-1 eine Signalgruppenzufahrt dargestellt.

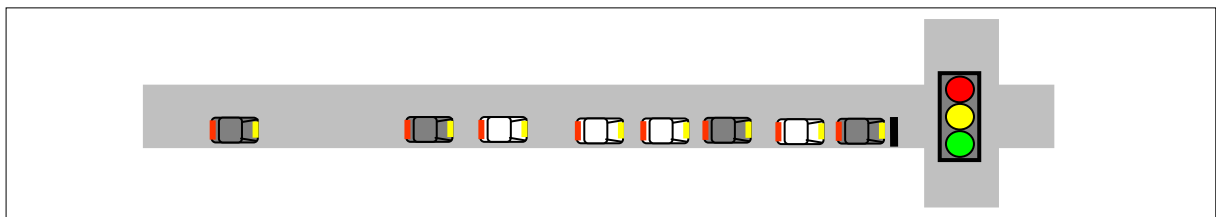


Abbildung 2-1: Problematik der Ausstattungsrate

Bei einer Vollausstattung der Fahrzeugflotte mit FCD-Technologie wäre jedes Fahrzeug in der Lage Daten zu sammeln und mit der Lichtsignalanlage auszutauschen. In diesem Beispiel sind die vier weiß dargestellten Fahrzeuge ausgerüstet. Alle grau dargestellten Fahrzeuge sind aus Sicht der LSA über die mobil erfassten Daten nicht lokalisierbar. Es lässt sich erkennen, dass über die individuell erfassten Daten ein Rückstau in der Zufahrt nicht direkt detektiert werden kann. Bei der Verarbeitung der mobil erfassten Daten müssen so immer zusätzliche Algorithmen angewendet werden, um aus individuell erfassten Kenngrößen Aussagen zum tatsächlichen kollektiven Verkehrsgeschehen ableiten zu können. Nur so können verkehrsabhängige Steuerungen mittels mobil erfasster Daten adäquat auf die im Streckenabschnitt vorhandene Verkehrssituation reagieren. Eine Mindestausstattungsrate der Fahrzeugflotte wird hierfür vorausgesetzt und später erörtert.

### 2.1.2 Satellitengestützte Ortungssystem

Herkömmliche Verfahren der Verkehrserhebung mit dem Ziel der Bestimmung von Reisezeiten oder Reiserouten sind relativ zeit- und personalaufwendig. Untersuchungen werden infolgedessen nur selten durchgeführt. Verfahren wie Querschnittszählung,



Knotenstromerhebung, Kennzeichenerfassung, Zählmarkenmethode, Bezettelungsmethode oder Befragung (siehe FGSV-1991B bzw. SCHNABEL & LOHSE-1997B) ermöglichen keine Echtzeitauswertung. Bei kooperativen Anwendungen wie bspw. der Lichtsignalsteuerung mittels mobil erfasster Daten ist deren Online-Auswertung in nahezu Echtzeit jedoch unumgänglich.

Die Fahrzeugortung des öffentlichen Verkehrs mit dem Ziel einer frühzeitigen Anmeldung an LSA über bakengestützte Systeme wird seit den 1970er Jahren durchgeführt. Fahrleitungsschalter und induktive Erfassungssysteme wurden durch diese Technologie ergänzt bzw. ersetzt. Fast alle diese Systeme nutzen eine gemischte Ortung mit Hilfe der Ortsbaken zur Standortbestimmung und einer Korrektur durch eine logische Standortbestimmung über die Türschließeinrichtung (HERWIG & STERN-1990). Sowohl an der Strecke als auch in den Fahrzeugen müssen entsprechende Geräte vorgehalten werden. Prinzipbedingt setzten sich solche Systeme zur Fahrzeugortung des Individualverkehrs nicht durch. Zur Senkung des Installationsaufwands werden auch im öffentlichen Verkehr bakengestützte Systeme nach und nach durch satellitengestützte Ortungssysteme abgelöst.

Satellitengestützte Ortungsverfahren sind Grundlage vieler telematischer Anwendungen im Verkehr. 1964 hatte die Marine der Vereinigten Staaten von Amerika das System *TRANSIT* entwickelt. Vorgesehen war zunächst eine verbesserte Navigation der U-Bootflotte. Eine Erhöhung der Genauigkeit erfolgte in den Projekten *TIMATION* und System 621. Die Zusammenlegung beider Projekte führte zur Entwicklung des *NNSS GPS* (Global Positioning System) (BAUER-1994). Ab 1984 stand dieses System auch dem zivilen Nutzer unter künstlicher Verfälschung der Genauigkeit mit dem sogenannten C/A-Code zur Verfügung. 1995 wurde offiziell das *NAVSTAR-GPS* (Navigation System with Time and Ranging) in Betrieb genommen und löste das *NNSS GPS* ab (MANSFELD-1994). Im Jahr 2010 basiert dieses System auf 32 geostationären Satelliten, welche die Erde in einer Höhe von ca. 20 km auf sechs Bahnebenen mit je vier Satelliten umkreisen. Als Mindestanforderung für den Betrieb des Systems sind 24 Satelliten notwendig. Das heute in kommerziellen Anwendungen und Endgeräten gebräuchlichste System ist das *GPS*.

*GLONASS* (ГЛОНАСС – Global Navigation Satellite System) ist ein dem *GPS* sehr ähnliches satellitengestütztes Funkortungssystem (MANSFELD-1994). Die vollständige Inbetriebnahme des von Russland betriebenen Systems fand 1996 mit 24 im All befindlichen Satelliten statt. In der Straßenbautechnik werden auch heute schon gekoppelte *GPS-GLONASS*-Empfänger genutzt. Damit entsteht ein Satellitenortungssystem mit hoher Redundanz.

*GALILEO* ist von der Funktionsweise ähnlich dem *GPS* bzw. *GLONASS*. Ein wesentlicher Unterschied zu den vorher genannten Systemen ist, dass es nicht vom Militär eines Staates, sondern von der europäischen Union aufgebaut und betrieben wird. Der Endausbau mit 30 Satelliten soll in den nächsten Jahren abgeschlossen sein.

Die Funktionsweise von satellitengestützten Ortungssystemen ist bei den Systemen *GPS*, *GLONASS* und *GALILEO* grundlegend identisch. Alle Systeme sind passive Systeme, bei denen der Empfänger die Daten auswertet und entsprechende Ortungsinformationen

ableitet. Die Anzahl der Nutzer ist daher unbegrenzt (BAUER-1994). Am Beispiel des GPS soll die Funktionsweise unter Nutzung der Prinzipskizze in Abbildung 2-2 erläutert werden.

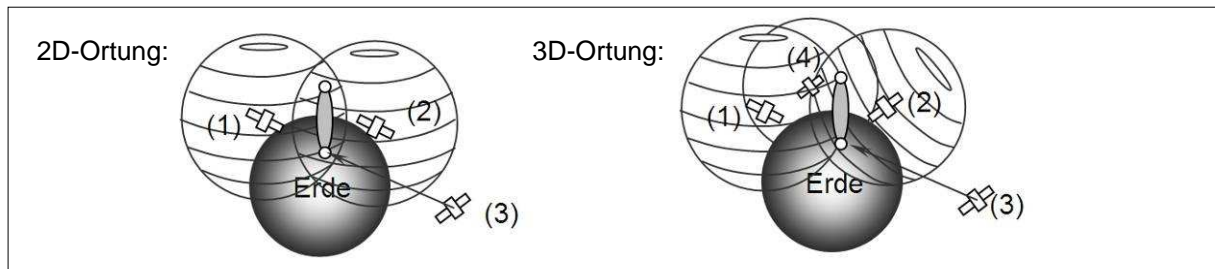


Abbildung 2-2: Funktionsweise satellitengestützter Ortungssysteme

Basis ist eine trigonometrische Netzlegung über die Entfernungsbestimmung vom Standort zu drei unterschiedlichen Satelliten, deren Positionen bekannt sind. Für eine vollständige dreidimensionale Ortung müssen die Signale von mindestens vier Satelliten empfangen werden. Mit Hilfe des ersten Satelliten kann ein Kreisbogen auf der Erdoberfläche ermittelt werden. Der Schnittpunkt der entstehenden Kreisbögen des ersten und zweiten Satelliten und der Erdoberfläche ergibt die zweidimensionale Koordinate des Empfängerstandorts. Da die Geräte aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht mit hochgenauen Uhren ausgerüstet sind, wird der dritte Satellit zur Korrektur der Uhrendifferenz und somit zur Kompensation des Entfernungsfehlers genutzt. Aus den berechneten Koordinaten der Satellitensignale werden Koordinaten im geodätischen Bezugssystem World Geodetic System 1984 (WGS 84) ermittelt. Für die dreidimensionale Ermittlung des Standortes ist somit das Signal eines vierten Satelliten notwendig.

Die fahrzeugseitige Datenerfassung zeichnet sich hauptsächlich durch die Genauigkeit der Ortungsdaten aus. Der GPS-Fehler beträgt bei günstigen Verhältnissen im Durchschnitt 5 m. Dieser Wert kann sich bei ungünstigen Abschattungen bis auf 10 m erhöhen (LISTL-2003). Eine fahrstreifengenaue Ortung der Fahrzeuge ist daher ohne weitere Maßnahmen nicht möglich. Da gerade der Fehler der Fahrzeugortung im Straßenverkehr für die Verkehrssteuerung und Verkehrsbeeinflussung in dieser Arbeit von Interesse ist, werden in Abschnitt 3.3.1 weiterführende detaillierte Untersuchungen durchgeführt. Auch Georeferenzierungsalgorithmen, welche die Korrektur der ermittelten Position mit Hilfe einer digitalen Karte vornehmen und somit Bestandteil beinahe jedes modernen Navigationssystems sind, können nur begrenzt genau den realen Standort von Fahrzeugen bestimmen. HUBER-2001 weist z. B. Schwierigkeiten bei der Ortung auf Bundesautobahnen nach. Eine sichere Unterscheidung der Fahrzeugstandorte zwischen der Autobahnraststätte und der Hauptfahrbahn der Autobahn ist nicht ohne Weiteres möglich.

Lediglich kostenintensive und aufwendige Differential-GPS-Systeme (DGPS) erreichen heute eine Genauigkeit im Zentimeterbereich. Noch genauere Ergebnisse können mit dem geodätischen GPS erzielt werden. Im Gegensatz zur Bestimmung des Standorts über Laufzeitmessungen, wird die Position über die zusätzliche Auswertung der Phasenverschiebungen zwischen Signalen verschiedener Satelliten bestimmt. Diese Systeme sind für Navigationszwecke kaum geeignet, da sie für eine exakte Positionsbestimmung relativ viel Zeit benötigen.

### 2.1.3 Kommunikationssysteme

Die ursprüngliche Art des elektronischen Austauschs von Daten ist die drahtgebundene Kommunikation über einen elektrischen Leiter. Dies ermöglicht einen leistungsfähigen und sicheren Transport einer verhältnismäßig großen Daten- bzw. Energiemenge. Drahtgebundene Kommunikation lässt sich auf Grundlage ihrer Reichweite und Ausdehnung informationstechnisch in mehrere Netzwerktypen untergliedern. Es wird unterschieden in Local Area Network (LAN), Metropolitan Area Network (MAN) und Wide Area Network (WAN). Für verkehrliche Anwendungen kooperativer Systeme, welche auf der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur aufbauen, kommen diese Lösungen nicht in Frage. Hier bieten drahtlose Netzwerke eine Option. Das Wireless Local Area Network (WLAN) ist die gängigste Form. Einer der heute gebräuchlichsten Standards der drahtlosen Kommunikation für den Datenaustausch zwischen Computern bzw. Kleinrechnern ist der WLAN-Standard IEEE 802.11. Innerhalb dieses Standards haben sich mehrere Ausprägungen entwickelt. Diese unterscheiden sich unter anderem im Datendurchsatz und der Reichweite, welche durch die Frequenz und abgestrahlte Leistung beeinflusst wird. Für handelsübliche Endgeräte wird derzeit der IEEE 802.11 b/g Standard angeboten. Der Aufbau eines kooperativen Systems zur Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung mit diesem Standard kann eine schnelle Marktdurchdringung ermöglichen. Um die Brauchbarkeit dieses Standards hinsichtlich der Nutzung für verkehrliche Anwendungen zu belegen, werden in Unterkapitel 3.4 eigene Untersuchungen vorgestellt.

Der General Packet Radio Service (GPRS) beschreibt die Netzwerkarchitektur für eine paketerorientierte Datenübermittlung im Mobilfunknetz. Konzipiert wurde dieses System im Wesentlichen für die mobile Erweiterung des Internets (BERGMANN ET AL.-2003). GPRS ist ein erweiterter Standard des Global System for Mobile Communications (GSM), mit dem eine flächendeckende Mobilfunkdatenübertragung mit der Übertragungsrate des Integrated Services Digital Networks (ISDN) geschaffen wurde. Im Gegensatz zum GPRS nutzt das Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) eine andere Modulation, was den Vorteil hat, dass höhere Datenübertragungsraten erzielt werden können.

Aus der grundlegenden Betrachtung hinsichtlich der Kommunikationspartner lassen sich die folgenden Übertragungsmodi unterscheiden:

Die Kommunikation zwischen zwei infrastrukturseitigen Einrichtungen (I2I-Kommunikation engl.: Infrastructure to Infrastructure Communication) wird schematisch in Abbildung 2-3 dargestellt. Vorteil dieser Kommunikation ist die Übermittlung von Informationen über weite Strecken. Auch bei großen Datenmengen kann eine verhältnismäßig schnelle Übermittlung realisiert werden. Da die Gefahr im Straßenverkehr immer dort ist, wo sie nicht gesehen oder vermutet wird, d. h. dort wo sowohl der Mensch oder die stationäre Erfassung auf der Strecke versagen, kann mit Hilfe der fahrzeugseitigen Erfassung frühzeitig gewarnt werden (NOW-2007). Im englischen Sprachraum werden die dargestellten infrastrukturseitigen Einrichtungen unter anderem als sogenannte Road Side Units (RSU) bezeichnet.

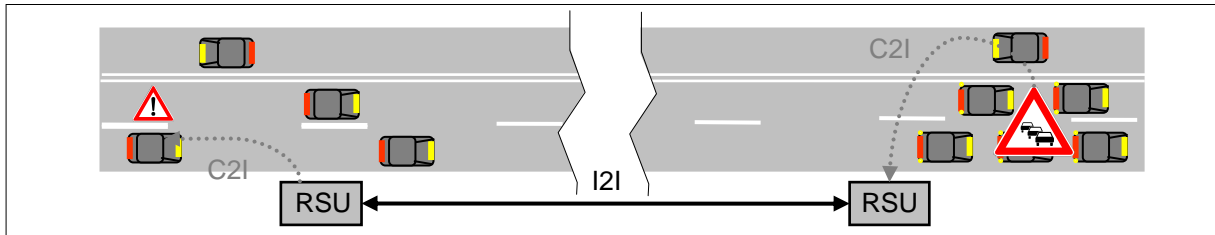


Abbildung 2-3: I2I-Kommunikation

Abbildung 2-4 zeigt die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander (C2C-Kommunikation engl.: Car to Car Communication). Mit Hilfe von drahtlosen ad hoc Netzwerken werden Datenpakete zwischen den Fahrzeugen übertragen. Die Übertragung der Daten und Informationen von Fahrzeug zu Fahrzeug wird als sogenanntes „Multi-Hopping“ bezeichnet. Vorteil dieser Methode ist eine verhältnismäßig schnelle Weitergabe von Informationen ohne zusätzliche infrastrukturseitige Einrichtungen. Aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeiten der sich entgegengesetzt bewegend Fahrzeuge stehen für den Datenverkehr nur kurze Übertragungszeiten zur Verfügung. Der Nachteil der hieraus entsteht, ist die reduziert übertragbare Datenmenge.

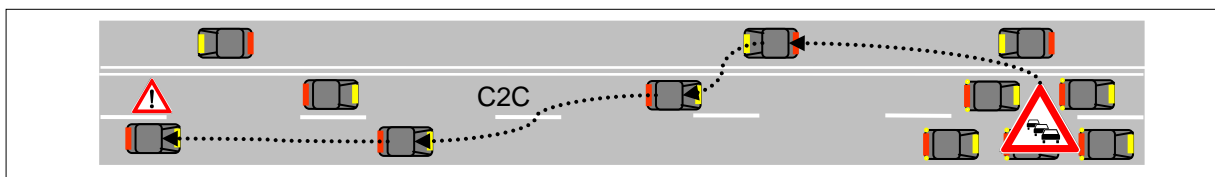


Abbildung 2-4: C2C-Kommunikation

Der Kommunikationsweg zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (C2I-Kommunikation engl.: Car to Infrastructure Communication) ist als dritter Übertragungsmodus in Abbildung 2-5 dargestellt. Die in dieser Arbeit untersuchte telematische Gesamtlösung nutzt vorwiegend diesen Kommunikationsweg.

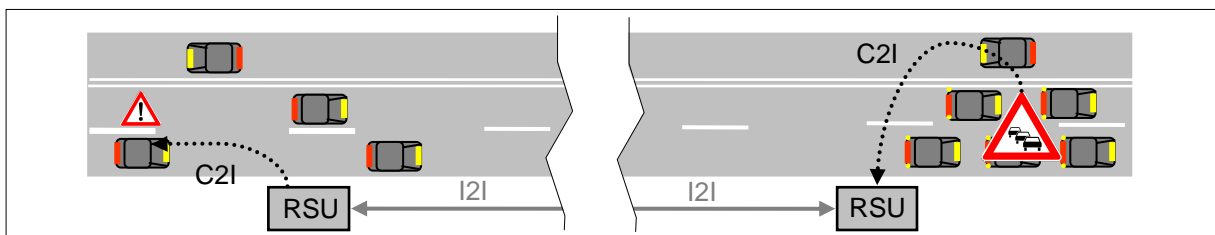


Abbildung 2-5: C2I-Kommunikation

Die Fahrzeuge stehen über WLAN im Datenaustausch mit der Lichtsignalanlage. So können die im Fahrzeug gesammelten Daten der aktuellen Verkehrssituation im Zufluss der LSA an diese übermittelt werden. Im Gegenzug werden dem Fahrer Informationen zu aktuellen und zukünftigen Steuerungsentscheidungen der stromabwärtigen LSA zur Verfügung gestellt. Diese Kooperation zielt auf eine verbesserte Qualität des Verkehrsablaufs und wird ausführlich in den Kapiteln 4, 5 und 6 erörtert.

## 2.2 Verkehrsbeeinflussung über erweiterte Informationen

### 2.2.1 Ortsfeste Restzeitanzeige

Eine kooperative Gesamtlösung resultiert prinzipiell aus den schon erläuterten zwei Funktionen. Einerseits ist dies die Anpassung der Lichtsignalsteuerung an die aktuelle Verkehrslage, andererseits die Beeinflussung des Fahrverhaltens mit Hilfe von Informationen zu aktuellen und prognostizierten Steuerungsentscheidungen der Lichtsignalanlage.

Im In- und Ausland wurden an festzeitgesteuerten Knotenpunkten schon einige Versuche mit permanent an der Lichtsignalanlage angebrachten Restzeitanzeigen für die jeweils verbleibende Sperr- und Freigabezeit durchgeführt. CELIKKAN ET AL.-2008 haben nachgewiesen, dass die Installation dieser ortsfesten Anzeigen infolge einer größeren Akzeptanz des Sperrsignals bei Fußgängern zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit führt. Dieselben Autoren zeigten in CELIKKAN ET AL.-2009 die Auswirkungen der Restzeitanzeige auf den Fahrzeugverkehr. Durch eine auch ohne Restzeitanzeige schon sehr hohe Akzeptanz des Sperrsignals konnten hier nur wenige Effekte beobachtet werden. Eine leichte Tendenz gibt es zu Frühstarts in die Rot-Gelb-Phase. Dem gegenüber steht ein Gewinn an Sicherheit durch die Abnahme der Spätfahrer, die den Knotenpunkt bei Gelb bzw. Rot passieren. Durch das frühere Anhalten verliert der Knotenpunkt gleichzeitig etwas an Leistungsfähigkeit, was jedoch durch den Sicherheitsgewinn volkswirtschaftlich kompensiert wird. Laut Befragungen nimmt die zumutbare Wartezeit zu und ein Drittel der Fahrzeugführer würden bei langen Wartezeiten den Motor ausstellen. Durch Videobeobachtung ließ sich das allerdings nicht bestätigen. Aufgrund des hohen finanziellen Aufwands zur Ausrüstung der Anlagen kann ein flächendeckender Einsatz nicht realisiert werden. Ein Eindruck zu einer solchen Anzeige gibt Abbildung 2-6.



Abbildung 2-6: Ortsfeste Restzeitanzeige

Eine grundsätzliche Kontroverse der ortsfesten Restzeitanzeige besteht im Zielkonflikt einer flexiblen verkehrsabhängigen Steuerung der Lichtsignalanlage gegenüber dem Aspekt einer sicheren Vorhersage der Restschaltzeiten. Eine Vorhersagewahrscheinlichkeit von 100 % kann nur bei festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen garantiert werden. Eine Anpassung an das aktuelle Verkehrsgeschehen oder die Beschleunigung öffentlicher Verkehrsmittel ist daher bei LSA mit ortsfesten Restzeitanzeigen nicht ohne Weiteres möglich.

### 2.2.2 Ortsfeste Grüne Welle Information

Ortsfeste Geschwindigkeitsempfehlungen werden schon seit vielen Jahren in Haupteinfallstraßen innerstädtischer Straßennetze eingesetzt. Sie haben zum Ziel, den Autofahrern eine Information über die optimale Geschwindigkeit zu geben, mit der sie die stromabwärtige Lichtsignalanlage bei Grün erreichen. Statische Grüne Welle Informationen sind im einfachsten Fall Schilder mit der Aufschrift der hinterlegten Progressionsgeschwindigkeit. Textzüge wie „Grüne Welle bei 50 km/h“ sind für alle Kraftfahrzeugführer verständlich.

Neben diesen einfachen statischen Anzeigen kommen auch ortsfeste, aber dynamische Geschwindigkeitssignale zum Einsatz. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2-7.

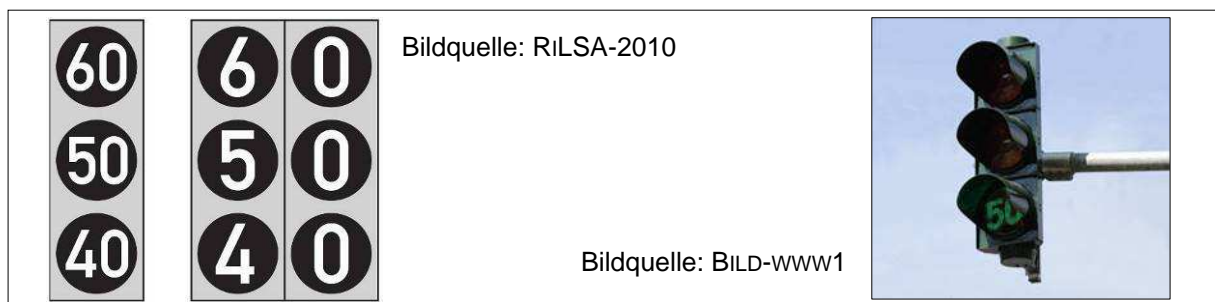


Abbildung 2-7: Ortsfeste dynamische Grüne Welle Anzeige

Diese Art der Signalgeber wirkt sich positiv auf den Zusammenhalt des Fahrzeugpulk aus. Je nach aktueller Lage in der Grünen Welle wechselt die Geschwindigkeitsempfehlung. So ist es möglich, planerisch schlecht realisierbare Grüne Wellen mit konstanter Progressionsgeschwindigkeit durch die Weitergabe dynamischer Geschwindigkeitsempfehlungen und somit dynamischer Progressionsgeschwindigkeiten zu realisieren. „Obwohl die Wirksamkeit einer Geschwindigkeitsanzeige für die Kraftfahrer in einem koordinierten Straßenzug unbestritten ist, wird wegen des technischen Aufwands weitgehend auf Geschwindigkeitssignalgeber verzichtet.“ (SCHNABEL & LOHSE-1997A).

Sowohl die in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten ortsfesten Restzeitanzeigen als auch die oben beschriebenen ortsfesten Grüne Welle Informationen haben genau das Problem, dass sie eben ortsfest sind. Damit ist ihr Wirkungsbereich nur sehr lokal und letztlich stark auf das Umfeld der Anzeigen begrenzt. Dieses Defizit ist bei der Restzeitanzeige noch stärker ausgeprägt als bei der ortsfesten Grüne Welle Information. Die Anzeige der Informationen im gesamten Streckenzug kann durch mobile Systeme realisiert werden. Die erzielbaren verkehrlichen Effekte, die aus den Funktionen dieser Systeme resultieren, sind vermutlich um ein Vielfaches höher als bei ortsfesten Systemen. Aus diesem Grund liegt der Fokus dieser Arbeit vorwiegend auf mobilen Systemen zur Verkehrsbeeinflussung.

### 2.2.3 Mobile Grüne Welle Information

#### Projekt: „Wolfsburger Welle“

Die ersten für die Forschung relevanten Ansätze zur Übertragung der mobilen Grünen Welle Informationen direkt in das Fahrzeug entstanden 1983. Das Projekt „Wolfsburger Welle“ wurde durch die VW-Forschung initiiert. Ziel war es, das Fahrverhalten bezüglich der Wahl



der Fahrgeschwindigkeit an die aktuelle räumliche und zeitliche Lage im Grünband relativ zu den Steuerungszuständen der stromabwärtigen LSA anzupassen. Zunächst wurde dies mit zusätzlichen Signalgebern zwischen den signalisierten Knotenpunkten, welche die Zustände der LSA wiederholten, in einem Testfeld außerhalb des öffentlichen Verkehrsraums realisiert. Dies stellte einen großen infrastrukturseitigen Aufwand dar. Zudem führte die Anzeige zu hohen Ablenkungen des Fahrers. Eine fahrzeuginterne Lösung mit Anzeige eines beweglichen Balkens auf einem Gelb-Grün-Gelb-Hintergrund wurde als Lösung entwickelt. Die möglichen Varianten der Anzeige im Fahrzeug können der Abbildung 2-8 entnommen werden (ZIMDAHL-1983).

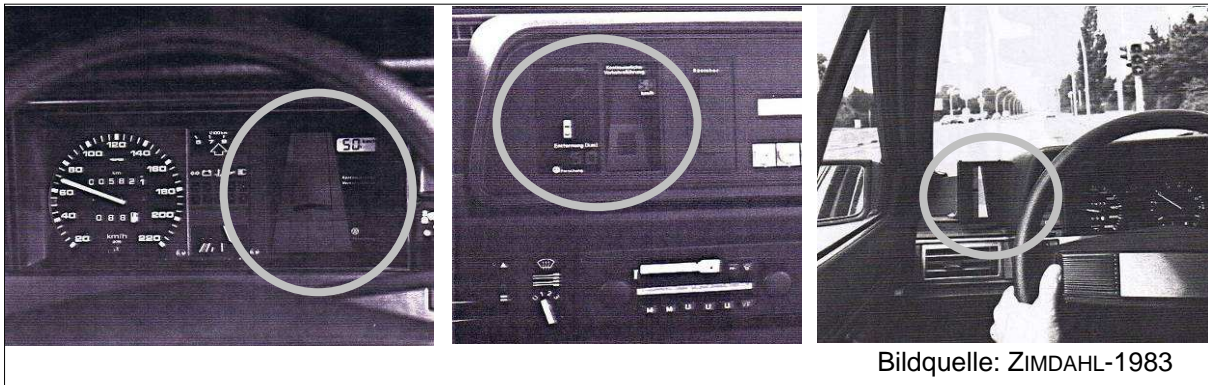


Abbildung 2-8: Mobile dynamische Grüne Welle Anzeige – Fahrzeug

ZIMDAHL beschreibt die Komponenten des Systems wie folgt:

- ortsfeste Sendeeinrichtung an den Lichtsignalanlagen und Empfangseinrichtung im Fahrzeug für die Datenübertragung
- Wegimpulszähler im Fahrzeug zur Ermittlung der momentanen Geschwindigkeit und Position – Anschluss an Fahrtrichtungsanzeiger ist vorgesehen
- Recheneinheit und LC-Display

Zur Übertragung der Daten in das Fahrzeug wurde im Jahr 1983 die Infrarottechnik genutzt, da deren Datenübertragungsrate zum damaligen Zeitpunkt verhältnismäßig gut war. Die Reichweiten betrugen 50 bis 70 m. In Wolfsburg wurden 16 Baken mit rund 100 Infrarot-sendern an elf LSA über eine Streckenlänge von 3,6 km installiert. Vier Fahrzeuge wurden mit Empfangseinheiten ausgerüstet.

Das Prinzip der Anzeige der Lage des Fahrzeugs in der Grünen Welle ist recht intuitiv und wird im linken Teil von Abbildung 2-9 angelehnt an die Darstellung von HOFFMANN ET AL.-1986 dargestellt. Die prognostizierte Relativposition zu den momentanen und erwarteten Steuerungszuständen der LSA wird über einen Balken im Display angezeigt. Befindet sich der Balken im grün unterlegten Bereich, so fährt man mit der optimalen Geschwindigkeit. Die Stellung des Balkens oberhalb des Grünbands bedeutet, dass das Fahrzeug verzögern muss. Bei Balkenstellung unterhalb des Grünbands muss das Fahrzeug beschleunigen. Im rechten Teil der Abbildung 2-9 ist ein Verbesserungsvorschlag mit Integration der Anzeige direkt in das Tachometer aufgezeigt, der sich jedoch nicht bewährt hat. Die Hintergründe bezüglich der Signalsteuerung in koordinierten Streckenabschnitten werden im Unterkapitel 2.3 erläutert.

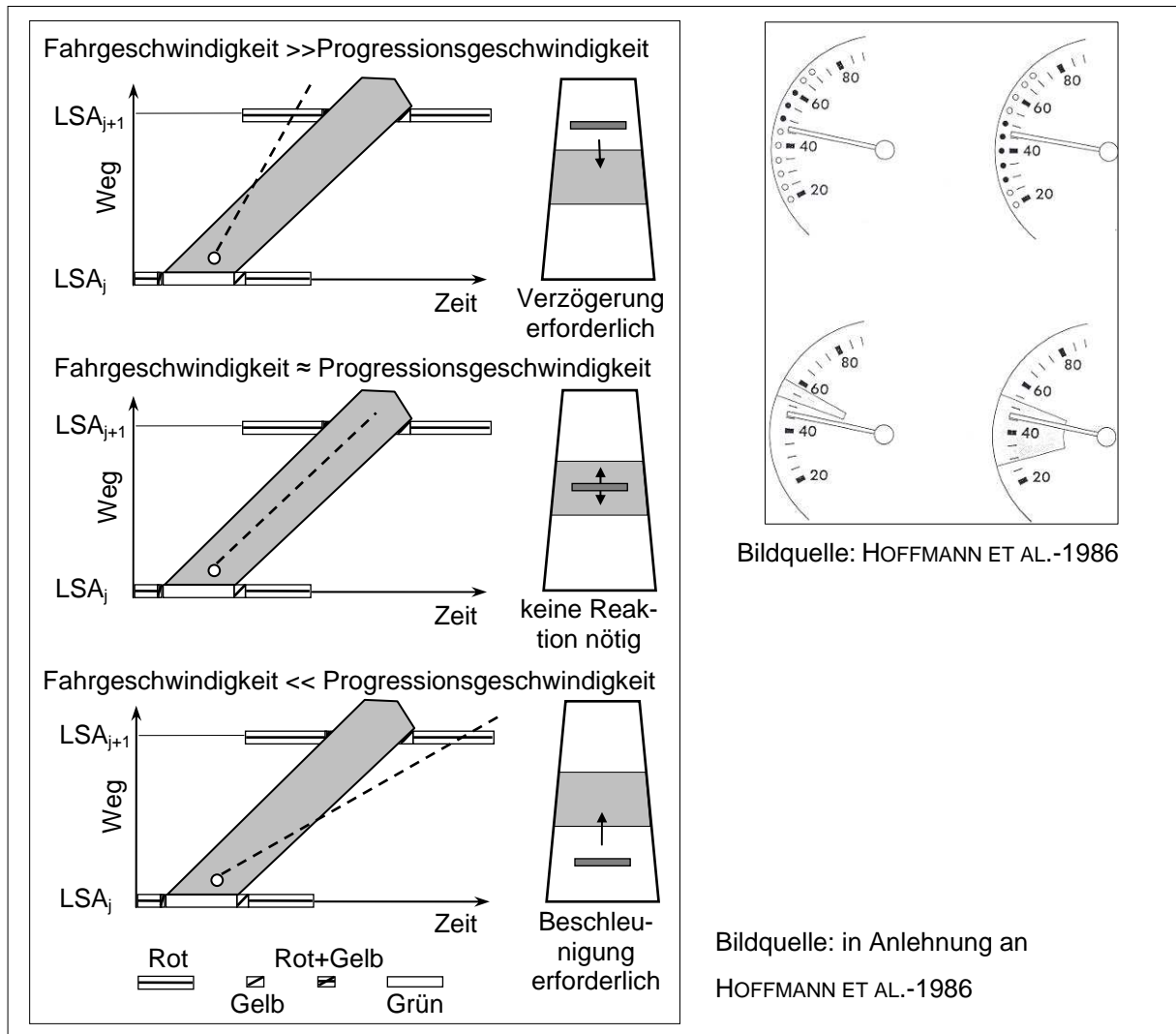


Abbildung 2-9: Mobile dynamische Grüne Welle Anzeige – Anzeigemodi

Die Auswertung bezog sich 1985 auf über 560 Fahrten. Davon wurden 297 Messungen als Referenzmessung ohne System und 263 Fahrten mit der Funktion der Fahrerbeeinflussung durchgeführt. Es wurden sowohl ortskundige als auch ortsunkundige Fahrer ausgewählt, wobei sich schnell herausstellte, dass nach nur wenigen Fahrten alle Fahrer als ortskundig in Bezug auf die Teststrecke galten. Die protokollierten Kenngrößen waren Reisezeit, Reisegeschwindigkeit, Streckengeschwindigkeit, Anzahl der Halte, Haltezeit, mittlere Beschleunigung sowie Kraftstoffverbrauch. Die wesentlichen Ergebnisse sind im Folgenden kurz dargestellt:

- Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Strecke lag bei 50 bzw. 60 km/h. Während Spitzenverkehrsbelastungen war der Verkehrsdruck zur Einhaltung der Geschwindigkeitsempfehlung durch andere Fahrzeugfahrer groß. Geschwindigkeitsempfehlungen unter 35 bis 40 km/h wurden nicht mehr akzeptiert.
- Stark überhöhte Geschwindigkeiten zum Erreichen des stromabwärtigen Pulks und der entsprechenden Grünzeit konnten nicht festgestellt werden.
- Die Reisezeiten blieben nahezu konstant. Teils war ein leichter Anstieg mit höheren Ausstattungsraten zu erkennen, was jedoch auf den höheren Befolgungsgrad der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zurückzuführen war.



- Es kam zu einer Reduzierung der Anzahl der Halte um 10 bis 30 %, der Haltezeit um 20 bis 25 % und des Kraftstoffverbrauchs um 0 bis 5 % infolge Beeinflussung des Fahrverhaltens zum Ohne-Fall.

Zudem wurde festgestellt, dass bei hohen Verkehrsbelastungen der Rückstau vor den LSA zu Behinderungen führte, welche die Funktion damals nicht berücksichtigen konnte. Auch eine verkehrsabhängig signalisierte Fußgängerfurt führte zur Anzeige von falschen Informationen, da die Daten nur sehr lokal begrenzt übermittelt werden konnten. Knotenabstände von weniger als 250 m erforderten teilweise sehr schnelle Reaktionen vom Fahrer. Größere negative Auswirkungen auf das Verhalten nicht informierter Fahrer ließen sich nicht erkennen.

Neben den Testfahrten wurden Simulationsuntersuchungen vorgenommen. Um das reale Fahrverhalten abzubilden, betrug die eingestellte Fahrgeschwindigkeit 115 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Die minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung der Fahrer wurde auf 35 km/h festgelegt. Die größten Potenziale der Grünen Welle Informationen konnten auf der nicht koordinierten Strecke festgestellt werden. Die Verkehrsqualität auf der koordinierten Strecke ist bereits im Status quo entsprechend gut. Auch in der Simulation konnte nachgewiesen werden, dass das Fahrerinformationssystem bei hohen Verkehrsbelastungen wenig wirksam ist. Nicht alle in der Simulation ermittelten Potenziale konnten durch die realen Messfahrten bestätigt werden.

Die wesentlichen Einflussgrößen, welche das verkehrliche Potenzial der mobilen Grünen Welle Information bestimmten, waren die Abstände der Knotenpunkte, die Umlaufzeit, die Freigabezeit, der Freigabezeitversatz, die minimal akzeptierte Geschwindigkeit sowie die maximal nutzbare Geschwindigkeit (zulässige Höchstgeschwindigkeit) der Fahrzeuge. Je höher die zulässige Höchstgeschwindigkeit war, desto wirksamer konnte die Funktion der Verkehrsbeeinflussung sein, da ein Eingriff über größere Geschwindigkeitsbereiche möglich war.

### **Simulationsuntersuchung von RICHTER**

Die Untersuchungen zur Thematik Verkehrsbeeinflussung von RICHTER-2005 basierte auf Simulationsergebnissen eines kalibrierten und validierten Simulationsmodells eines Hamburger Streckenzugs. Grund waren die hohen entstehenden Kosten von Feldtests. Als Qualitätskriterium für die Berechnung des volkswirtschaftlichen Nutzens und für die Ermittlung der Verkehrsqualität diente allein der Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge im Untersuchungsnetz. Die Einsparung an Kraftstoff resultierte aus der Reduktion von Beschleunigungen, die durch einen Halt notwendig sind.

RICHTER charakterisierte vier verschiedene Fahrprofile im Zufluss einer Lichtsignalanlage. Diese können Abbildung 2-10 entnommen werden. Profil ① repräsentiert die Ankunft eines Fahrzeugs während der Grünzeit. Das Fahrzeug kann ohne Halt passieren. Der Fahrtverlauf von Profil ② charakterisiert ein Fahrzeug, welches die LSA während der Sperrzeit erreicht. Das Fahrzeug muss die Geschwindigkeit reduzieren und kommt vor der LSA zum Halten. Profil ③ zeigt ein Fahrzeug, welches auf einen sich abbauenden Rückstau auffährt, kurz abbremsen muss, den Knotenpunkt aber ohne Halt passieren kann. Den Fahrtverlauf eines

durch die Grüne Welle Information beeinflussten Fahrers verdeutlicht Profil ④. Das Fahrzeug bekommt im Zulauf der LSA eine Geschwindigkeitsempfehlung übermittelt, verzögert die Geschwindigkeit und fährt identisch der Geschwindigkeitsempfehlung. Die LSA kann ohne Halt passiert werden.

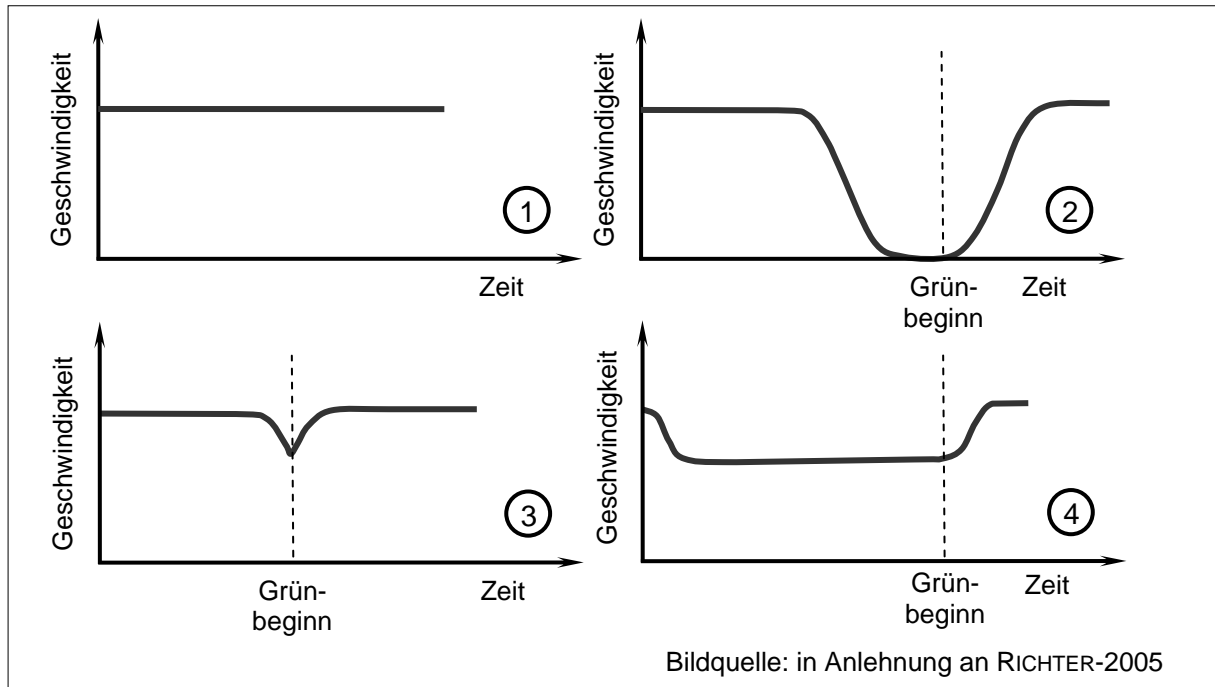


Abbildung 2-10: Fahrprofile im Zufluss einer kooperativen LSA – Bsp. 1

Eine Gegenüberstellung von Profil ② und Profil ④ zeigt Abbildung 2-11. Maßgebend für einen zu erzielenden Weg- bzw. Reisezeitgewinn ist die in der Differenzbetrachtung dargestellte Fläche ⑦. Infolge des eingesparten Beschleunigungsvorgangs erreicht das ausgestattete Fahrzeug die zulässige Höchstgeschwindigkeit etwas früher. Der theoretisch festgestellte Reisezeitgewinn ist jedoch relativ gering. Bei der Betrachtung des Fahrtverlaufs über mehrere Knotenpunkte im realen Verkehrsablauf macht sich der Reisezeitgewinn nicht bemerkbar.

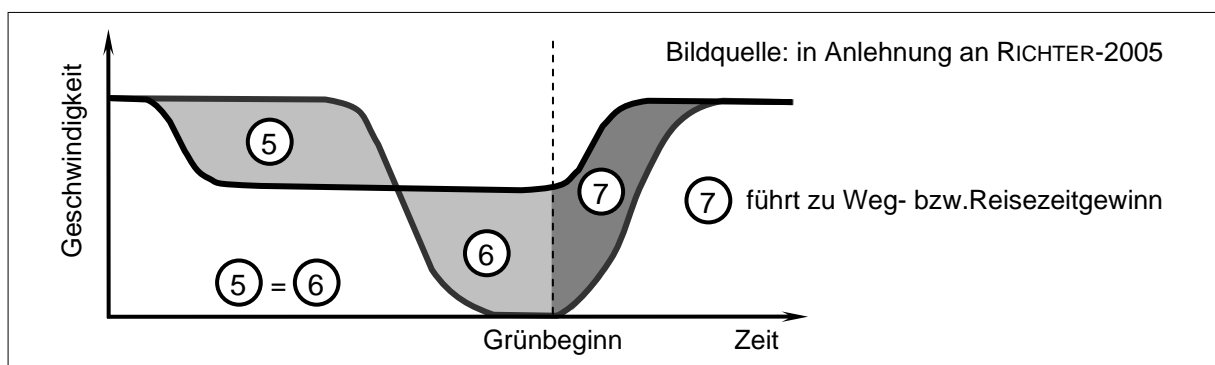


Abbildung 2-11: Fahrprofile im Zufluss einer kooperativen LSA – Bsp. 2

Der Kraftstoffverbrauch wurde mit einem in AIMSUN integrierten Verfahren berechnet. Die minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung wurde im Simulationsmodell mit 25 km/h definiert. Alle Zufahrten wiesen eine Mindestlänge von 300 m auf. Bei einer Zufahrtslänge von unter 120 m war laut RICHTER-2005 kein Einsparpotenzial mehr gegeben. Das Potenzial

der Funktion der Fahrerbeeinflussung über mobile Grüne Welle Informationen war von mehreren Faktoren wie z. B. der Länge der Zufahrten, der Verkehrsstärke, der bestehenden Koordinierung oder der Ausstattungsrate abhängig. So wirkten sich lange Zufahrten, schlechte Koordinierungen und große Ausstattungsraten positiv auf die Potenziale der Funktion aus. Selbstorganisationseffekte von Berufskraftfahrern bei Festzeitsteuerungen sollten beim Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem realen Verkehrsablauf nicht vernachlässigt werden. Viele Berufspendler kennen die Steuerungen im Straßenzug und passen so ihre Fahrgeschwindigkeiten auch ohne Grüne Welle Informationen an. Um ein größeres zur Verfügung stehendes Geschwindigkeitsintervall und damit eine Erhöhung der Potenziale der Geschwindigkeitsempfehlung zu erreichen, empfiehlt RICHTER eine Erhöhung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf 60 km/h.

Die Beeinflussung des Fahrverhaltens über Geschwindigkeitsempfehlungen führte bis zu 20 % höheren Sättigungsverkehrsstärken bei kurzen Grünzeiten und bis zu 8 % höheren Sättigungsverkehrsstärken bei langen Grünzeiten. Es konnte eine Kraftstoffersparnis von im Mittel 15 % und maximal 35 % nachgewiesen werden. Die errechneten volkswirtschaftlichen Gewinne im Hamburger Straßennetz könnten sich so teilweise auf über 25.000 € pro Jahr und Zufahrt einer LSA belaufen. Ab einer Zufahrtslänge von unter 460 m nahm das Einsparpotenzial ab.

Zusammenfassend wird ein weiterer Forschungsbedarf zur mobilen Geschwindigkeitsempfehlung festgestellt. Die Integration der Information in das Fahrzeug muss weiterführend untersucht werden, da sie nicht vorgenommen wurde. Künftig sollte mit der weiteren Verbreitung verkehrsabhängiger modellbasierter und regelbasierter Steuerungsverfahren von Lichtsignalanlagen auch dieser Aspekt näher betrachtet werden. Die Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung fand in dieser von RICHTER-2005 vorgestellten Untersuchung infrastrukturseitig statt. Eine sinnvollere Lösung wird jedoch in der fahrzeugseitigen Berechnung gesehen. Dieser Vorschlag wird in der hier vorliegenden Arbeit aufgegriffen und, wie in Kapitel 3 vorgestellt, konsequent umgesetzt. Die Verteilung der Rechenleistung auf die einzelnen mobilen Endgeräte führt auch bei hohen Verkehrsstärken verbunden mit großen Ausstattungsraten zu einer technischen Realisierbarkeit aller Funktionalitäten des telematischen Gesamtsystems.

### **Projekt TRAVOLUTION**

Im Rahmen des Projekts TRAVOLUTION wurde ferner die mobile Grüne Welle Information untersucht und einige Erkenntnisse in BRAUN ET AL.-2009 veröffentlicht. Mit dem Fokus auf die Beeinflussung des Fahrverhaltens mittels Geschwindigkeitsinformationen wurden im Testfeld Untersuchungsfahrten durchgeführt. Die ausgerüsteten Fahrzeuge tauschten über WLAN Informationen mit den Lichtsignalanlagen aus. Um sicherzustellen, dass nicht ausgerüstete Fahrzeuge nicht über die Maßen behindert werden, wurden den Testfahrzeugen lediglich Geschwindigkeitsempfehlungen zwischen 30 und 50 km/h übermittelt. Die verkehrliche Wirkung der Übertragung der optimalen Fahrgeschwindigkeit wurde so jedoch a priori reduziert. RICHTER-2005 und HOFFMANN ET AL.-1986 stellten bereits fest, dass die größten verkehrlichen Wirkungen bei großen nutzbaren Geschwindigkeitsbereichen zu erwarten sind. Die Akzeptanzschwelle der Fahrer bezüglich

der Geschwindigkeitsempfehlung scheint so einen großen Einfluss auf die Wirksamkeit der Verkehrsbeeinflussung zu haben. Sie soll daher als Einflussgröße neben der Ausstattungsrate ein Hauptaugenmerk der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit werden.

Die im Fahrzeug integrierte Restzeitanzeige ist in Abbildung 2-12 (linkes Bild) gezeigt. Ein Beispiel der Anzeige der mobilen Grüne Welle Information kann Abbildung 2-12 (rechts Bild) entnommen werden. Ähnlich dem Grünteppich, welcher beim bereits vorgestellten Projekt „Wolfsburger Welle“ zum Einsatz kam, wird die aktuelle Position des Fahrzeugs im Grünband angezeigt und zusätzlich eine Geschwindigkeitsinformation zum Erreichen der stromabwärtigen LSA bei Grün gegeben.



Abbildung 2-12: Mobile dynamische Grüne Welle Anzeige – TRAVOLUTION

Eine der größten Schwierigkeiten der Berechnung der mobilen dynamischen Geschwindigkeitsempfehlung ist das Abschätzen des Rückstaus der stromabwärtigen LSA. Im Projekt „Wolfsburger Welle“ konnte diese Prognose nicht realisiert werden. Somit kam es trotz Einhaltung der empfohlenen Geschwindigkeit zu Haltevorgängen, da sich Rückstau bei Ankunft der Fahrzeuge noch nicht vollständig aufgelöst hatten. In TRAVOLUTION kann der Rückstau mit Hilfe stationärer Detektoren geschätzt werden. Mit diesem von MÜCK-2002 entwickelten Schätzverfahren ließen sich Rückstaulängen detektieren, die eine fünf- bis zehnfache Ausdehnung des Detektorabstands zur Haltlinie haben. Über einen Zeithorizont von 10 bis 30 s wurden Signalzustände prognostiziert und den ausgestatteten Fahrzeugen übermittelt. Die Sicherheit der Prognose hing direkt mit der Art der Steuerung zusammen. Eine exakte Vorhersage ist lediglich bei einer Festzeitsteuerung möglich. Bei verkehrsabhängigen LSA-Steuerungsverfahren wurde mit Grünzeitwahrscheinlichkeiten gearbeitet.

Aussagen zu verkehrlichen Wirkungen hinsichtlich der mobilen Grüne Welle Information wurden in BRAUN ET AL.-2009 nicht veröffentlicht. Aufbauend auf die Problematik der Integration des Rückstaus in die Ermittlung der Geschwindigkeitsempfehlung werden im Kapitel 4 zwei Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Geschwindigkeitsempfehlung einander gegenübergestellt. Eine Zusammenfassung der schon genannten unterschiedlichen Steuerungsverfahren wird im nächsten Unterkapitel erstellt.

## 2.3 Verkehrssteuerung über Lichtsignalanlagen

### 2.3.1 Klassifizierung nach Steuerungsebenen

Das innerstädtische Straßennetz ist durch eine Vielzahl von Lichtsignalanlagen geprägt. Sie erhöhen die Leistungsfähigkeit und die Verkehrssicherheit an hoch belasteten Knotenpunkten, an denen die herkömmliche Verkehrsregelung mittels Vorfahrtsstraßen nicht mehr sinnvoll oder zu unsicher ist. Es erfolgt eine zeitliche Trennung der Konfliktströme. Schwerpunkt aus verkehrlicher Sicht ist eine effektive Steuerung von LSA mit dem Ziel der Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs.

Um die zusätzlichen Nutzen der Verkehrssteuerung mittels mobil erfasster Verkehrskenngrößen beschreiben zu können, werden zunächst die Steuerungsverfahren klassifiziert. Dies erlaubt einen generellen Einblick in die Möglichkeiten, die aus der Steuerung mit Hilfe kooperativ gewonnener mobiler Daten erwachsen. Die Steuerungsverfahren können in verschiedene Steuerungsebenen unterteilt werden.

Eine mögliche Einteilung der Verfahren in Steuerungsebenen ist die von FRIEDRICH-1999 vorgenommene Unterteilung in *strategische*, *taktische* und *operationale Ebene*. Innerhalb der strategischen Ebene werden übergeordnete Ziele von Stadt und Umland festgelegt und umgesetzt. Die taktische Ebene soll das aktuelle Verkehrsgeschehen optimal steuern. Die operationale Ebene bildet die niedrigste Stufe und reagiert auf die stochastischen Schwankungen im Verkehrsablauf oder auch auf eventuelle Anforderungen des öffentlichen Verkehrs.

Neben der genannten Einteilung, können die *makroskopische* und die *mikroskopische Steuerungsebene* unterschieden werden. Die Verfahren der makroskopischen Ebene sind auf eine generelle Netzbetrachtung ausgerichtet. Sie steuern die Signalprogrammauswahl oder reagieren auf verschiedene Belastungszustände infolge von Schwankungen über längere Zeitintervalle im innerstädtischen Straßennetz. Der Prognosehorizont beträgt 5 bis 15 Minuten. Randbedingungen wie verkehrspolitische Ziele oder die Koordinierung von Verkehrsströmen werden in dieser Ebene realisiert. Die mikroskopische Ebene reagiert auf stochastische Schwankungen am Einzelknotenpunkt. Der Zeithorizont liegt im Sekundenbereich und ermöglicht die Verarbeitung von Fußgängeranforderungen, Priorisierung des öffentlichen Verkehrs sowie die Beschleunigung von Einsatzfahrzeugen.

### 2.3.2 Klassifizierung nach Steuerungsarten

Aus der Sicht der Steuerungsarten lassen sich die Festzeitsteuerung, die regelbasierte und die modellbasierte verkehrsabhängige Steuerung unterscheiden. Die Unterschiede betreffen vorwiegend den Umfang der Datenerfassung, die Flexibilität der Anpassung der Signalisierung und die verschiedenen Steuerungs- und Optimierungsziele.

#### **Festzeitsteuerung**

Die einfachste Steuerungsart ist die Festzeitsteuerung. Das Signalprogramm wiederholt sich zyklisch in jedem Umlauf. Die Umlaufzeit und die Freigabezeiten bleiben konstant. Heute

dienen diese Programme oft als Ausgangspunkt für verkehrsabhängige Steuerungen und sind in der Linien- und Netzkoordinierung von Lichtsignalanlagen nach wie vor im Einsatz.

### Verkehrsabhängige Steuerungen

Neben festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen sind verkehrsabhängige Steuerungen die zeitgemäße Form der Steuerung einer Lichtsignalanlage. Hinsichtlich des Aspekts der Entscheidungsfindung lassen sich regelbasierte verkehrsabhängige Steuerungen und modellbasierte verkehrsabhängige Steuerungen unterscheiden. Eine Gegenüberstellung beider Entscheidungsarten zeigt Abbildung 2-13.

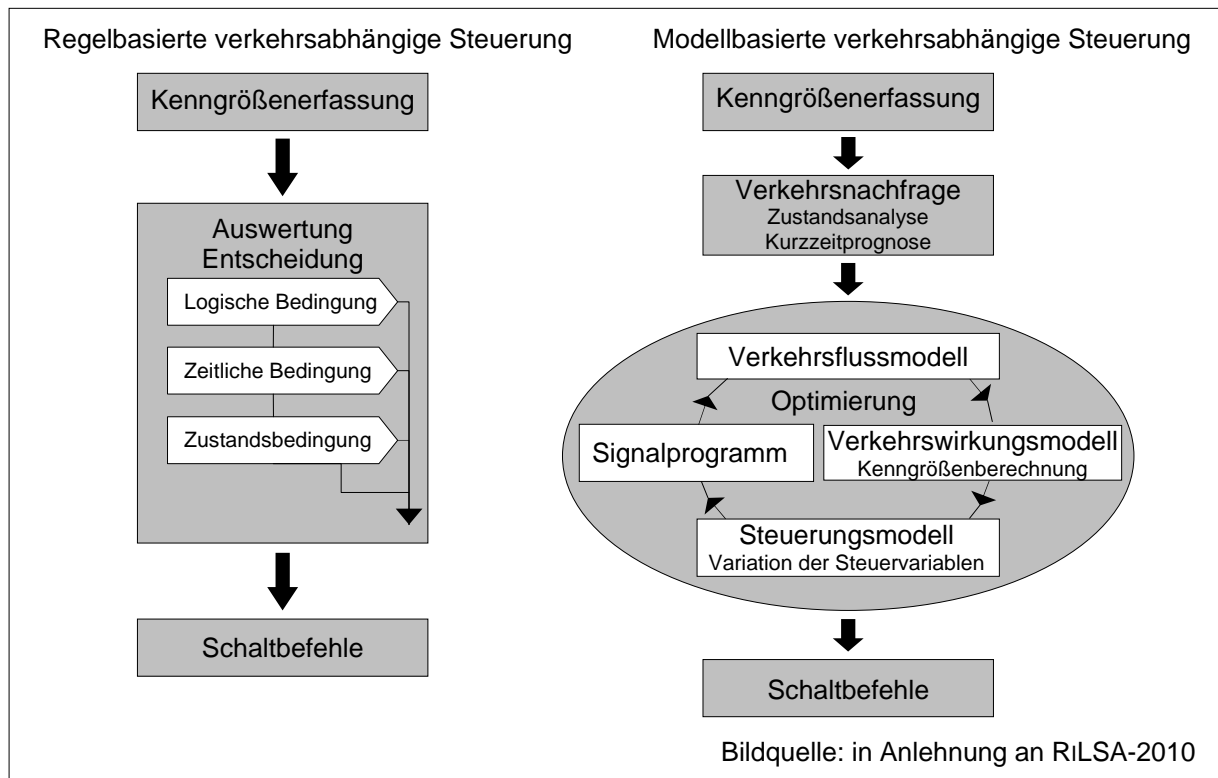


Abbildung 2-13: Regelbasierte und modellbasierte Verfahren – Sequenzdiagramm

### Regelbasierte verkehrsabhängige Steuerung

Regelbasierte verkehrsabhängige Steuerungen können auf kurzzeitige stochastische Schwankungen reagieren. Möglichkeiten bieten sich über Freigabezeitanpassung, Phasentausch, Bedarfsanpassung und Signalprogrammbildung. Basis ist eine einfache Ablauflogik, welche die Detektordaten in Steuerungsbefehle umwandelt. Im Gegensatz zur Festzeitsteuerung wird die Verkehrssituation online über Erfassungseinrichtungen ermittelt (HBS-2001). Gerade durch die Priorisierung des öffentlichen Verkehrs kommt es oft zu sehr harten Eingriffen (MERTZ & WEICHENMEIER-2002). Insbesondere bei hohen Auslastungsgraden stoßen diese Verfahren an ihre Grenzen und die Signalisierung nähert sich immer mehr einer Festzeitsteuerung an. Auch MÜCK-2002 stellt fest, dass regelbasierte verkehrsabhängige Steuerungen auf Basis der Kenngrößen Belegung und Zeitlücke schon bei geringen Auslastungsgraden ähnlich den zugrundeliegenden Festzeitsteuerungen arbeiten.

## Modellbasierte verkehrsabhängige Steuerungen

Modellbasierte Steuerungen können ihre Steuerungsentscheidungen direkt auf Grundlage der Qualitätskriterien des Verkehrsablaufs anpassen. Aus technischen Gründen sind die Kriterien nicht direkt erfassbar, sie lassen sich jedoch mit Hilfe der verwendeten Verkehrsmodelle berechnen. MERTZ & WEICHENMEIER-2002 bzw. MERTZ-2001 tragen drei wesentliche Komponenten zusammen, die eine modellbasierte verkehrsabhängige von einer regelbasierten verkehrsabhängigen LSA-Steuerung unterscheiden. Der grundlegende Baustein modellbasierter Verfahren ist das Verkehrsmodell zur räumlichen und zeitlichen Zuordnung der eingehenden Anforderungen bzw. Detektorsignale. Ein zweiter Baustein ist das Steuerungsmodell, welches zur Erzeugung und Optimierung gültiger Steuerungsalternativen dient. Der dritte Baustein ist das Wirkungsmodell, welches die Auswirkungen der unterschiedlichen Steuerungsvarianten auf den Verkehrsablauf und auf die relevanten Verkehrskenngrößen bestimmt. Die Komponenten sind im rechten Teil der Abbildung 2-13 dargestellt. Eine technische Umsetzung von verkehrspolitischen Zielen ist durch Gewichtungen und Widerstände in der Zielfunktion relativ problemlos möglich (KELLER ET AL.-2002). Nach ALMASRI-2006 und FRIEDRICH-1999 lassen sich modellbasierte Steuerungsverfahren, wie in Tabelle 2-2 aufgezeigt, in vier Generationen einteilen. Einige Verfahren sollen nachfolgend kurz beschrieben werden.

Tabelle 2-2: Modellbasierte Steuerungsverfahren (ALMASRI-2006 bzw. FRIEDRICH-1999)

Generation	Verfahren	Charakterisierung
(1)	TRANSYT	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Offline-Optimierung</li> <li>– Verwendung und Auswahl von offline hinterlegten Signalprogrammen</li> <li>– Verkehrsvorhersage nicht möglich</li> <li>– Dauer des Zeitintervalls der Optimierung ca. 15 Minuten</li> </ul>
(2)	SCOOT SCATS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Online-Optimierung</li> <li>– Verkehrsvorhersage basierend auf historischen Daten</li> <li>– Dauer des Zeitintervalls der Optimierung ca. 5 bis 10 Minuten</li> </ul>
(3)	OPAC PRODYN	<ul style="list-style-type: none"> <li>– verkehrsabhängige Online-Optimierung</li> <li>– Verkehrsvorhersage basierend auf geglätteten Werten</li> <li>– Dauer des Zeitintervalls der Optimierung ca. 3 bis 5 Minuten</li> </ul>
(4)	SPOT/UTOPIA MOTION BALANCE	<ul style="list-style-type: none"> <li>– verkehrsabhängige Online-Optimierung im Echtzeitbetrieb</li> <li>– Verkehrsvorhersage über Verkehrsmodell</li> <li>– Integrative Berücksichtigung aller Verkehrsteilnehmer in der Optimierung</li> </ul>

Das Verfahren *TRANSYT* (Traffic Network Study Tool) (ROBERTSON-1997 & BOHLINGER-2006) wurde in den 1960er Jahren zur Vorhersage des Stauverhaltens entwickelt. Grundlage ist ein makroskopisches, deterministisches Verkehrsmodell, welches im Offline-Betrieb arbeitet. Die Optimierung erfolgt mit einem Hill-Climbing-Algorithmus. Den Kern dieses heuristischen Modells bildet das Pulkauflösungsmodell von ROBERTSON.

*SCOOT* (Split, Cycle and Offset Optimisation Technique) (HUNT ET AL.-1981 & BOHLINGER-2006) wird über haltlinienferne Detektoren online optimiert. Dieses Verfahren kommt vorwiegend in Großbritannien zum Einsatz. Die Optimierungskriterien sind Umlaufzeit, Freigabezeitanteil und Versatzzeit. Minimiert werden dabei Verlustzeiten, Anzahl der Halte und Staulängen. Die Freigabezeitanpassung hat den Zweck der Minimierung des größten

Auslastungsgrades an einem Knotenpunkt. Das Verfahren wird vor allem in der Streckenkoordinierung eingesetzt.

*OPAC* (Optimization Policies for Adaptive Control) (GARTNER-1990 bzw. FRIEDRICH-1999) wird seit 1982 in den USA angewendet. Basis dieses Verfahrens ist die Suche nach einer optimalen Schaltfolge über einen gleitenden Zeithorizont mit Hilfe der dynamischen Programmierung. Über die Prognose der Fahrzeugankünfte wird eine optimale Schaltfolge ermittelt. Diese Optimierung wird zyklisch fortgesetzt. Als nachteilig erweist sich, dass sich durch den Ansatz der dynamischen Programmierung nur schwer Nebenbedingungen wie die Umsetzung verkehrspolitischer Ziele definieren lassen.

*SCATS* (Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic) (LOWRIE-1982 & BOHLINGER-2006) ist ein in Australien entwickeltes Verfahren. Als Optimierungsgrößen dienen die Auslastungsgrade. Optimiert werden die Verlustzeit und die Anzahl der Halte. Dabei wird aus Gründen der Rechenzeit kein globales Optimum gesucht sondern durch probierende Änderungen der Steuerungsparameter der Lösungsraum durchsucht.

*SPOT/UTOPIA* (MAURO & DITARANO-1990 & FRIEDRICH-1999): Während *UTOPIA* für die makroskopische Steuerung und damit für die Umsetzung der Netzstrategien sowie die Vernetzung der Anlagen zuständig ist, bewerkstelligt *SPOT* die mikroskopische Anpassung der Steuerungen an den einzelnen Knotenpunkten. Als Zielfunktion wird die Minimierung der Gesamtreisezeit des öffentlichen Verkehrs bzw. Individualverkehrs im Netz genutzt. Der erste Einsatz und die Entwicklung dieses Verfahrens erfolgten in Italien.

*PRODYN* (HENRY & FARGES-1989 bzw. BOILLOT & VINANTI-2004) dient der Echtzeitoptimierung von Verkehrsnetzen. Dieses Verfahren wurde in Frankreich entwickelt und eingesetzt. Es beruht auf der Optimierung der Warteschlangen. Mittels der dynamischen Programmierung über einen fortlaufenden Zeithorizont werden die Signalprogramme jedes Knotenpunkts berechnet. Die Koordinierung der Streckenzüge erfolgt durch die Weitergabe der Warteschlangen im Netz.

*BALANCE* (FRIEDRICH-2000 bzw. KELLER ET AL.-2002) orientierte sich bei der Entwicklung in den 1990er Jahren vor allem an einer robusten Modellierung des Verkehrsablaufs zur systematischen Ausräumung von Instabilitäten im Verfahren. Identisch wie in herkömmlichen Verfahren sollen verkehrspolitische Ziele wie die Bevorrechtigung des öffentlichen Verkehrs Berücksichtigung finden. Dabei soll das Verfahren nicht als Black Box arbeiten. In die Optimierung fließen die Wartezeiten, die Staulängen, die Anzahl der Halte, der Kraftstoffverbrauch und die Abgas- und Geräuschemissionen ein. Der derzeit genutzte und verbesserte genetische Algorithmus zur Optimierung der Zielgrößen des Verkehrsablaufs wird von BRAUN ET AL.-2009 beschrieben. Er reduziert die Rechenzeit und findet das Optimum eher als der zuvor genutzte Hill-Climbing-Algorithmus.

*MOTION* (BUSCH & KRUSE-1993) (Methode zur Optimierung der Lichtsignalsteuerung in online gesteuerten Netzen) schätzt den aktuellen und zukünftigen Verkehrszustand anhand von stationär erfassten Messdaten ab, optimiert die Steuerungsparameter und berechnet über den hinterlegten Algorithmus das optimale Signalprogramm. Der öffentliche Verkehr wird unter der Maßgabe der geringsten negativen Auswirkungen auf den Individualverkehr



priorisiert. In Intervallen von 5 bis 15 Minuten ermittelt die Netzsteuerung aktualisierte Rahmensignalpläne bezüglich Umlaufzeit, Phasenfolge, Grünzeit-Verteilung und Wellenlage. Das Steuergerät kann am Einzelknotenpunkt dennoch flexibel auf Anforderungen des öffentlichen Verkehrs oder des Individualverkehrs reagieren. Erste wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse zur Steuerungsqualität können dem von BRILON ET AL.-2009 veröffentlichten Beitrag für eine Koordinierung eines Straßenzugs in Münster entnommen werden. Nach Einführung von MOTION kam es zu deutlichen Einsparungen in den Reisezeiten.

Laut DÜRR-2002 weisen die derzeit angewandten modellbasierten verkehrsabhängigen Verfahren, welche Verlustzeiten erfassen, zwei Einschränkungen auf. Die volle Wirkung erzielen sie nur, wenn alle Verkehrsmittel auf gesonderten Fahrstreifen geführt werden und sie berücksichtigen nur direkte Wirkungen am Knotenpunkt. Diese Anmerkungen sind jedoch kritisch zu hinterfragen und im Zuge der rasanten Weiterentwicklung dieser Verfahren vermutlich nicht mehr aktuell.

### **Weitere Steuerungsverfahren**

*INES+* zieht aus dem Auslastungsgrad und der Freigabezeitverteilung Rückschlüsse auf Staulängen. Bei identischer Bewertung mehrerer Alternativen werden auch die mit Hilfe des Verkehrsmodells berechneten Verlustzeiten mit einbezogen. Die Versatzzeitenoptimierung erfolgt über einen Hill-Climbing-Algorithmus. Als Erfassungsdaten dienen die Verkehrsstärke, Belegungszeit, Geschwindigkeit, Freigabezeit und das aktuelle Signalprogramm (SCHLOT-HAUER & WAUER-2009).

WU-1999 stellt für die Optimierung eines Straßennetzes einen völlig neuen Ansatz vor, der an die Berechnung des Kräftegleichgewichts bei finiten Elementen in der Mechanik angelehnt wurde. Wesentliche Ziele sind die Maximierung der Leistungsfähigkeit, die Harmonisierung der mittleren Wartezeiten über alle Signalgruppen und die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs. Das Verfahren wurde mittels Simulation getestet und es konnten Verbesserungen der Verkehrsbedingungen nachgewiesen werden. Im realen Umfeld wurde dieses Verfahren nicht eingesetzt.

LI & MATHIAS-2008 stellen ein System der Netzsteuerung von LSA vor, welches als Optimierungsmethode rekurrente neuronale Netze nutzt. Die Länge der Warteschlange wird aus der Verkehrsstärke, Dauer des Umlaufs und Grünzeitverteilung ermittelt. Optimiert werden die Grünzeit, Umlaufzeit und Versatzzeit. Ergänzend gibt es drei Netzwerke, welche die Fehlerfortpflanzung betrachten.

LÄMMER-2007 stellt ein dezentrales Netzsteuerungsverfahren vor, welches mit Erfassungseinrichtungen in den Ausfahrarmen eines Knotenpunkts die Verkehrslage am stromabwärtigen Knotenpunkt abschätzt und regelt. Der verwendete Ansatz stammt aus der Regelungstechnik. Über ein Prognose-, Optimierungs- und Stabilisierungsverfahren wird die Wartezeit an den Knotenpunkten minimiert. Über eine simulative Studie von LÄMMER ET AL.-2009 konnte nachgewiesen werden, dass das vorgestellte Verfahren auch den Bedingungen eines realen Straßennetzes mit sehr verschiedenen Knotenpunktabständen genügt.

### 2.3.3 Steuerungsqualität

Alle zuvor beschriebenen und klassifizierten Steuerungsverfahren sind für die Gewährleistung einer angemessenen Steuerungsqualität auf Verkehrskenngrößen angewiesen. Im einfachsten Fall wird so z. B. eine Festzeitsteuerung offline erstellt und die LSA damit versorgt. Verkehrsabhängige Verfahren realisieren die Anpassung der Signalisierung an die aktuelle bzw. gar prognostizierte Verkehrssituation online. Die Realisierung dieser Anpassung erfolgt im überwiegenden Teil über die Daten stationärer Erfassungseinrichtungen.

#### **Kenngrößen**

Aufgrund der Bedeutung stationärer Erfassungsdaten sollen die wesentlichen Kenngrößen zur Abbildung des Verkehrszustandes genannt werden. Alle Definitionen verkehrlicher Kenngrößen werden RiLSA-2010, FGSV-2000 und HBS-2001 entnommen und konform verwendet. Weiterhin sollen die mobil erfassbaren Kenngrößen direkt berücksichtigt werden, da sie für die Abbildung der Verkehrssituation in kooperativen Systemen große Bedeutung haben. Aus diesem Grund wird ein Hauptteil dieser Arbeit sein, die funktionalen Zusammenhänge zwischen den mobil erfassten Kenngrößen zu ermitteln.

Die direkt stationär gemessenen Kenngrößen wie Zeitdauer seit der Anforderung, Zeitlücke und Belegungsgrad werden in den Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA-2010) als Kenngrößen der LSA-Steuerung genannt. Damit können die Anzahl der Halte, Wartezeit, Reisezeit, Staulänge und Fahrgeschwindigkeit nur über ein Verkehrsmodell geschätzt werden. KEPING-1997 unterstreicht die Bedeutung der Wartezeit, Reisezeit, maximale und mittlere Staulänge sowie Verkehrsstärke als Qualitätskenngrößen signalisierter Knotenpunkte. BERNHARD & GRAHL-2008, sowie BOSSERHOFF-2006 ergänzen die Qualitätsmerkmale Anzahl der Halte und den Koordinierungsgrad.

Die mobilen Endgeräte in ausgestatteten Fahrzeugen sind in der Lage, diese Kenngrößen direkt mobil zu erfassen und als individuelle Kenngrößen der entsprechend ausgerüsteten LSA zu kommunizieren. Das kooperative Gesamtsystem ermöglicht so die direkte Erfassung von Qualitätskenngrößen des Verkehrsablaufs.

#### **Verkehrsqualität signalisierter Knotenpunkte**

Die Ermittlung der Qualität des Verkehrsablaufs an signalisierten Knotenpunkten ist ein wichtiger Bestandteil für eine bedarfsgerechte Signalisierung. Die Umlaufzeit wird oft durch die Bedeutung des Knotenpunkts im Netz, die anzutreffenden Verkehrsstärken und die Belange der motorisierten, nicht motorisierten und öffentlichen Verkehrsteilnehmer bestimmt. Die Bemessung des Stauraums und der Freigabezeit erfolgt über die maßgebenden Verkehrsstärken der Fahrrelationen sowie deren Auslastungsgraden. Um die Leistungsfähigkeit des Knotenpunktes optimal ausnutzen, sollte eine Einheit von Bau und Betrieb gewährleistet werden (HERKT-1994).

Aus heutiger Sicht ist die Überprüfung der Qualität des Verkehrsablaufs in nicht koordinierten Zufahrten zur LSA oft sehr aufwändig. Als Qualitätskriterium dient die Wartezeit. Diese kann aus Daten stationärer Erfassungseinrichtungen nicht vollständig bzw. nicht genau abgeleitet werden. Mobile individuell erfasste Wartezeiten entsprechend ausgestatteter Fahrzeuge

geben Aufschluss über die Qualität der aktuellen Steuerungsentscheidungen. Die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) werden in A bis F eingeteilt, wobei A der besten und F der schlechtesten Qualität entspricht. Tabelle 2-3 zeigt die Grenzwerte verschiedener Verkehrsarten der nicht koordinierten Knotenpunktzufahrt. Die verbalen Definitionen der Qualitätsstufen sind dem „Anhang A: Grundlagen der Lichtsignalsteuerung“ unter der Rubrik „Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs an Lichtsignalanlagen“ zu entnehmen.

Tabelle 2-3: Qualitätsstufenkonzept für Lichtsignalanlagen (HBS-2001)

QSV	zulässige mittlere Wartezeit $t_{\text{WARTE}}$ [s]			
	straßengebundener ÖPNV	Fahrradverkehr	Fußgänger-verkehr*	Kraftfahrzeug-verkehr
<b>A</b>	$\leq 5$	$\leq 15$	$\leq 15$	$\leq 20$
<b>B</b>	$\leq 15$	$\leq 25$	$\leq 20$	$\leq 35$
<b>C</b>	$\leq 25$	$\leq 35$	$\leq 25$	$\leq 50$
<b>D</b>	$\leq 40$	$\leq 45$	$\leq 30$	$\leq 70$
<b>E</b>	$\leq 60$	$\leq 60$	$\leq 35$	$\leq 100$
<b>F</b>	$> 60$	$> 60$	$> 35$	$> 100$

\* Zuschlag von 5 s bei Querung mehrerer Furten

### Verkehrsqualität im Streckenabschnitt

Mit Blick auf das kooperative System zur Verkehrssteuerung ergeben sich aus unterschiedlichen Verkehrssituationen im Straßenzug verschiedene Durchfahrzeiten. Somit ist sowohl die Qualität des Verkehrsablaufs im direkten Umfeld des Knotenpunkts als auch die Verkehrsqualität im Streckenabschnitt zwischen den Knotenpunkten von Interesse. Um am signalisierten Knotenpunkt keine Kapazitätsreserven einzubüßen, sollte die Verkehrssteuerung ihre Signalisierung auf die sich ändernden Ankunftszeitpunkte infolge des Verkehrsablaufs im Streckenabschnitt abstimmen können. Zur Bestimmung der Verkehrsqualität im Streckenabschnitt stellt das HBS-2001 zwei mögliche Ansätze vor. Dies sind erstens das Kriterium der Reisezeit bzw. Reisegeschwindigkeit und zweitens das Kriterium der Verkehrsdichte inklusive der Einflüsse aus der Überlagerung von Erschließungs- und Verbindungsfunktion.

Entscheidenden Einfluss auf die Reisezeit haben nach SCHNABEL ET AL.-1998 die Anzahl der Halte an den Knotenpunkten sowie die entstandenen Verlustzeiten im Streckenabschnitt. Für die Bewertung der Verkehrsqualität sind Reisegeschwindigkeiten als Grenzwerte definiert, welche im Jahr 2003 von BRILON & SCHNABEL-2003 unter Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit überarbeitet wurden. Tabelle 2-4 zeigt das überarbeitete Qualitätsstufenkonzept.

Tabelle 2-4: Qualitätsstufenkonzept für das Straßennetz (BRILON & SCHNABEL-2003)

QSV	Mittlere Reisegeschwindigkeit der Fz [km/h] bei $v_{\text{zul}}$		
	50 km/h	60 km/h	70 km/h
<b>A</b>	$\geq 40$	$\geq 50$	$\geq 60$
<b>B</b>	$\geq 30$	$\geq 35$	$\geq 40$
<b>C</b>	$\geq 25$	$\geq 25$	$\geq 25$
<b>D</b>	$\geq 20$	$\geq 20$	$\geq 30$
<b>E</b>	$\geq 15$	$\geq 15$	$\geq 15$
<b>F</b>	$< 15$	$< 15$	$< 15$

In KNOTE ET AL.-1999 wird exemplarisch die Entwicklung der Qualität des Dresdner Straßennetzes mit Hilfe der Reisezeitmessung über etliche Jahre aufgezeigt. Der Aufwand dieser Qualitätsermittlung ist hoch, da hierfür extra Mess- und Erhebungsfahrten durchgeführt werden müssen. Eine Erfassung der Reisezeit bzw. -geschwindigkeit ist über herkömmliche Erfassungseinrichtungen nicht möglich. Bei kooperativ ausgerüsteten Fahrzeugen kann aus den gewonnenen Daten des individuellen Fahrtverlaufs die Reisezeit und -geschwindigkeit relativ einfach extrahiert werden. Reaktionen auf sich ändernde Verkehrszustände können ohne größere Zeitverluste erfolgen.

Ein weiteres Kriterium für die Bewertung innerstädtischer Straßenzüge ist die Überlagerung von Erschließungs- und Verbindungsfunktion. Im von BAIER-2003 vorgestellten Verfahren bilden die Zusammenhänge zwischen der Verkehrsbelastung, den Störeinflüssen aus der Erschließungsfunktion und der mittleren Kraftfahrzeugdichte die Grundlage dieses Qualitätsstufenkonzepts. Da sich diese Einflussfaktoren und Kenngrößen sowohl mobil als auch stationär schwer oder nur mit großem Aufwand erfassen lassen, soll dieser Ansatz in der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt werden.

### **Strecken- und Netzkoordinierung**

Liegen in einem Straßenzug mehrere signalisierte Knotenpunkte hintereinander, so ist die verkehrstechnisch wirksamste Maßnahme, die Freigabezeiten der Knotenpunkte aufeinander abzustimmen. Hierfür ist die korrekte Festlegung der Versatzzeiten notwendig. Die Progressionsgeschwindigkeit sollte zwischen 85 % und 100 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegen. Geringere Geschwindigkeiten werden von den Kraftfahrzeugführern ohne weitere Informationen nicht akzeptiert. Sinnvoll ist dies bei allen signalisierten Knotenpunkten, deren Abstand kleiner als 1.000 m ist (WIEDEMANN-1968). Funktionierende Linienkoordinierungen sind bis zu einem Auslastungsgrad  $\alpha \leq 0,85$  möglich. Eine Tabelle weiterer Einsatzkriterien Grüner Wellen ist dem „Anhang A: Grundlagen der Lichtsignalsteuerung“ unter der Rubrik „Randbedingungen der Linienkoordinierung von Lichtsignalanlagen“ zu entnehmen. Als Qualitätskriterium für koordinierte Zufahrten von LSA dient der Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt, welcher auch durch SCHNABEL-2006 als zweckmäßig belegt wurde. Dieser Prozentsatz kann mit Hilfe von Messfahrten ermittelt werden.

Kooperationsfähige Fahrzeuge sind auch hier in der Lage, den Prozentsatz der Durchfahrten als Qualitätskenngröße aus dem individuellen Fahrtverlauf direkt zu extrahieren und zur kooperativen LSA zu übertragen. Durch den erweiterten Erfassungshorizont des telematischen Systems gegenüber herkömmlichen Steuerungen, die auf der Grundlage stationärer Erfassungsdaten arbeiten, können die LSA zur netzweiten Steuerung, bspw. mittels Regulierung der Zu- und Abflüsse, eingesetzt werden. Neben der reinen Signalisierung können Wechselverkehrszeichen oder andere telematische Lösungen die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer beeinflussen (MAIER ET AL.-2008).

Bei der Koordinierung von Netzen werden offene und geschlossene Systeme unterschieden. Offene Systeme bilden keinen geschlossenen Linienzug und lassen sich daher einfach aus mehreren Linienkoordinierungen zusammensetzen. Geschlossene Systeme hingegen bilden Netzmaschen. Vor allem die Maschenknoten sind dabei kritisch. Aufgrund der teilweise

ungünstigen Teilpunktlagen ist es in einem geschlossenen System nicht immer möglich beide Richtungen durchgehend zu koordinieren (SCHNABEL & LOHSE-1997A).

In der Planungspraxis werden manuelle Entwurfsverfahren für die Koordinierung von Festzeitsignalprogrammen mehr und mehr durch rechnergestützte Programme ergänzt. Zu nennen sind hier bspw. TRANSYT, AMPEL-K, MAXBAND und SOAP. Diese Programme nutzen historische Verkehrsdaten zur Berechnung der Weg-Zeit-Diagramme (BRILON & WIETHOLD-2008). Ein weiteres Verfahren unter Verwendung genetischer Algorithmen wird von BRAUN & WEICHENMEIER-2005 vorgestellt. Es wurde im Rahmen des Projekts RATISBONA-opt entwickelt.

### **Qualitätssicherung an Lichtsignalanlagen**

Die Qualitätssicherung und Prüfung bestehender Signalsteuerungen ist Voraussetzung für die Realisierung einer angemessenen Qualität des Verkehrsablaufs. So hat bspw. die Prüfung der Aktualität von einmal implementierten Steuerungsprogrammen einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Steuerungen und sollte regelmäßig durchgeführt werden. Mit Fokus auf die Sicherung der Qualität der Steuerung während des Betriebes befragte KÜLZER-1997 68 Städte zu den Prüfungszyklen von einmal realisierten Festzeitprogrammen bezüglich sich ändernder Verkehrssituationen. Von den Städten prüften 80 % einmal berechnete Programme nicht mehr, lediglich 20 % der Städte prüften anlass- bzw. zeitabhängig. Grund dieser Vorgehensweise ist vor allem der hohe personelle und zeitliche Aufwand, der für die Durchführung der Qualitätsprüfung und -sicherung notwendig ist. Es handelt sich dabei um eine sehr komplexe Aufgabenstellung. FRIEDRICH ET AL.-2009 stellen ein Verfahren vor, mit dem die Qualität von Lichtsignalsteuerungen bestimmt werden kann. Auch BERNHARD & GRAHL-2009 präsentieren einen Leitfaden und Checklisten für die Qualitätssicherung von Lichtsignalanlagen. Beide Beiträge geben einen guten Eindruck vom Arbeitsumfang, der für eine Qualitätssicherung notwendig ist.

Der technische Fortschritt und weitere Bemühungen der letzten Jahre zielen vorwiegend auf zentralenseitige und teils automatisierte Online-Qualitätsprüfungen beim Betrieb von Lichtsignalanlagen. Infolge der teils sehr alten technischen Infrastruktur der LSA ist dies jedoch heute im Echtzeitbetrieb in nahezu keiner Stadt flächendeckend möglich. REUßWIG-2005 führte eine Untersuchung zum Durchschnittsalter der Anlagen in Stuttgart und Darmstadt durch. In Darmstadt sind mehr als 60 % und in Stuttgart mehr als 80 % der Anlagen älter als zehn Jahre. Eine zentralenseitige Anbindung dieser alten Steuergeräte ist oft nicht ohne Weiteres möglich. Perspektivisch bietet hier die seit 1999 entwickelte sogenannte OCIT-Schnittstelle (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems) Chancen (FGSV-2008). Primär wird hier zwar das Ziel der Interoperabilität von Systemen verschiedener Hersteller verfolgt, ein wesentlicher Vorteil für die Qualitätssicherung ergibt sich jedoch in der Vernetzung der Signalanlagen über diese Schnittstellen.

Auch kooperative Systeme zur Verkehrssteuerung und Verkehrsbeeinflussung können diese standardisierten Schnittstellen nutzen. Die Qualitätssicherung kann so größtenteils automatisiert werden. Der Aufwand kann sich gegenüber heutigen manuellen Verfahren erheblich reduzieren.

## 2.4 Fazit

Aus der Summe der vorliegenden Erfahrungen der Praxis und einiger Forschungsansätze zur Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung an LSA-Knotenpunkten im Straßennetz lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die Steuerung von LSA hat für sich betrachtet eine hohe Qualität erreicht. Neben der netzweiten Optimierung der Qualität des Verkehrsablaufs können die Steuerungen der Einzelknoten flexibel auf stochastische Schwankungen im Verkehrsablauf reagieren.
- Anhand der vielen neueren Forschungsansätze lässt sich jedoch ableiten, dass die Verkehrssteuerung über LSA immer noch ungenutzte Potenziale bietet. Die Ausschöpfung dieser Potenziale verspricht eine weitere Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs.
- Die Möglichkeit der Verkehrsbeeinflussung über die Übermittlung von Geschwindigkeits-hinweisen in Bereichen, in denen die Steuerung nicht mehr adäquat reagieren kann, wird heute nur selten oder gar nicht genutzt.
- Die Kooperation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur ermöglicht mittels Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation die Erschließung ungenutzter Potenziale.

### Erwartungen an die Verkehrssteuerung

Die Integration kooperativ gewonnener Kenngrößen in die Steuerung von Lichtsignalanlagen verspricht aufgrund des räumlich erweiterten Erfassungshorizontes und des zeitlich größeren Reaktionshorizonts Vorteile gegenüber herkömmlichen Steuerungen, welche die Verkehrssituation über die Daten der stationäre Erfassungseinrichtungen abbilden. Sowohl die Stationarität des Verkehrsflusses über die Zeit als auch dessen Homogenität über den Weg sind im innerörtlichen Bereichen zumeist nicht gegeben. Gerade im Vorfeld einer LSA würde daher eigentlich eine Vielzahl stationärer Detektoren notwendig sein, um ein räumlich-zeitlich genaues Abbild der Verkehrssituation zu erstellen und um die Signalisierung optimal auf die vorherrschenden Verkehrsverhältnisse anpassen zu können. Aus wirtschaftlichen Gründen sind vorwiegend haltliniennahe Detektoren installiert. Vereinzelt werden weitere Erfassungseinrichtungen etwa 30 bis 50 m vor der Haltlinie vorgesehen. Der Betrachtungshorizont ist somit punktuell und in der räumlichen Ausbreitung stark begrenzt. Große Potenziale für die Erfassung der Kenngrößen Wartezeit, Rückstaulänge und Anzahl der Halte sind in den mobil erfassten Daten zu sehen. Eine linienhafte Erfassung ist mittels ausgerüsteter Fahrzeuge möglich. Des Weiteren können aus dem Fahrtverlauf der Fahrzeuge räumlich-zeitliche Betrachtungen abgeleitet werden, welche Aufschluss über die räumliche Homogenität und die zeitliche Stationarität des Verkehrsflusses als Maß von Sicherheit und Fahrkomfort geben. Die Einbindung kooperativ gewonnener Daten in die Steuerungsentscheidungen von LSA erscheint für eine flexible Anpassung der LSA-Steuerung an das aktuelle Verkehrsgeschehen erfolgversprechend zu sein. Ein Hauptnutzen wird dabei in der direkten Erfassung der Qualitätskenngrößen mittels mobil erfasster individueller Daten gesehen. Über die Erfassung von Qualitätsdefiziten an Knotenpunkten, in Streckenabschnitten oder im Netz kann mittels der kooperativen Verkehrssteuerung sofort auf sich ändernde Verkehrssituationen reagiert werden.

Gewinne lassen sich laut WAGNER ET AL.-2009 erwarten, wenn die Verteilung der Haupt- und Nebenrichtung wegen sich ändernder Verkehrsstärken oft wechselt. Gegenüber der optimierten Festzeitsteuerung kann es ab einer Ausstattungsrate von mehr als 50 % zu Verbesserungen der Qualität des Verkehrsablaufs kommen. Innovative Steuerungen könnten dies sogar schon bei geringen Ausstattungsraten bewerkstelligen. Bei isolierten Knotenpunkten kann ein schneller Wechsel der Umlaufzeit zur besseren Anpassung der Steuerung an die aktuelle Verkehrssituation führen.

### **Erwartungen an die Verkehrsbeeinflussung**

Die Verkehrsbeeinflussung über Hinweise zur Anpassung der Fahrweise hat neben der Verkehrssteuerung einen großen Einfluss auf die Qualität, Homogenität und Sicherheit des Verkehrsablaufs. Die vorgestellten Veröffentlichungen HOFFMANN ET AL.-1986, RICHTER-2005 und BRAUN ET AL.-2009 zeigen deutlich, dass die Beeinflussung des Fahrverhaltens positive Auswirkungen auf den Verkehrsablauf hat. In den 1980er und 90er Jahren lag das Hemmnis vor allem in der technischen Realisierung solcher Systeme. Trotz vielversprechender erster theoretischer Forschungsergebnisse war wegen der hohen infrastruktur- und fahrzeugseitigen Aufwände an eine flächendeckende Umsetzung nicht zu denken. Einige widersprüchliche Untersuchungsergebnisse der unterschiedlichen Forschungsprojekte untereinander sollen nachfolgend aufgezeigt werden und dienen als Ansatzpunkte der vorliegenden Arbeit:

- Das Fahrprofil von Fahrzeugen auf kurzen Zufahrten wird vermutlich nicht dem Profil 4 von Abbildung 2-10 entsprechen.
- Die Verkehrsstärke hat zwar einen Einfluss auf die Qualität des Verkehrsablaufs, eine Steigerung der Potenziale der Fahrerbeeinflussung mit zunehmenden Verkehrsstärken, wie sie von RICHTER-2005 gezeigt wird, sollte jedoch überprüft werden.
- Die Akzeptanzgrenze der Geschwindigkeitsempfehlung hängt vermutlich von mehreren Einflussfaktoren ab und kann wahrscheinlich auch unterhalb der durch HOFFMANN ET AL.-1986 ermittelten Geschwindigkeit von 35 bis 40 km/h liegen.
- Eine Empfehlung der Anhebung der zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 60 km/h, um die zur Verfügung stehende Geschwindigkeitsspanne zu erhöhen, wie dies RICHTER-2005 vorschlägt, sollte aus Sicht der Verkehrssicherheit kritisch hinterfragt werden.

Die weiterführende wissenschaftliche Untersuchung der genannten Aspekte und weiterer Gesichtspunkte in dieser Arbeit soll detaillierte Aussagen über die Einsatzgrenzen und Einsatzbereiche sowie den Nutzen kooperativer Systeme hinsichtlich der Beeinflussung des Fahrverhaltens über Geschwindigkeitsempfehlungen aufzeigen.

### **Erwartungen an das kooperative Gesamtsystem**

Ein kooperatives System entfaltet vermutlich seine vollen Potenziale im Zusammenspiel der Beeinflussung des Fahrverhaltens auf der einen Seite und der Optimierung von Steuerungsentscheidungen der Lichtsignalanlage auf der anderen Seite. Ziel der Arbeit ist deswegen das Abstecken der Einsatzgrenzen und -bereiche des telematischen Gesamtsystems zur Verkehrsbeeinflussungen und Verkehrssteuerung. Im Gegensatz zu autonomen Fahrerassistenzsystemen der Verkehrsbeeinflussung und herkömmlichen verkehrabhängigen Lichtsignalsteuerungen schöpfen diese Systeme den gesamten sogenannten kooperativen Horizont aus. In einem Gesamtüberblick über kooperative Verkehrssteuerung

und Verkehrsbeeinflussung geht RIEGELHUTH-2010 nicht nur auf die Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs ein, sondern er stellt auch den zusätzlichen Sicherheitsgewinn aus dem Zusammenspiel der Einzelkomponenten heraus.

Bei der integrativen Betrachtung aller Verkehrsteilnehmer gilt es besonders zu beachten, dass zwischen dem motorisierten Verkehr und dem nicht motorisierten Verkehr bezüglich der Umlaufzeit der Anlage beinahe immer Zielkonflikte auftreten. Die optimale Umlaufzeit des nicht motorisierten Verkehrs liegt meist unter der des motorisierten Verkehrs (KEPING-1997). Hier stößt die alleinige Verkehrssteuerung an ihre Grenzen und es erschließen sich die Potenziale der ergänzenden Verkehrsbeeinflussung.

Die schon seit längerem stattfindende Bevorrechtigung des öffentlichen Verkehrs und die Priorisierung von Einsatzfahrzeugen kann nur über die Verkehrssteuerung realisiert werden. Die Verkehrsbeeinflussung über angepasste Fahrgeschwindigkeiten ist hier nicht sinnvoll. Die Funktionsweise der Einsatzwagenpriorisierung und deren verkehrlichen und sicherheitstechnischen Wirkungen können der Veröffentlichung KLEIN ET AL.-2008 am Beispiel von Ingolstadt entnommen werden. Systeme zur kooperativen Verkehrssteuerungen können hier die Störeinflüsse bezüglich anderer Verkehrsteilnehmergruppen minimieren. Die Akzeptanz der Bevorrechtigung einzelner Nutzergruppen kann mittels der Übermittlung der Gründe für diese Eingriffe erhöht werden.

Mit der Akzeptanz des telematischen Gesamtsystems steht und fällt die Ausschöpfung der verkehrlichen Potenziale des Systems. Gerade der Zielkonflikt zwischen einer sicheren Vorhersage von Steuerungsentscheidungen der LSA gegenüber einer flexiblen Anpassung der Signalisierung an die momentane und erwartete Verkehrssituation wird daher Fokus der Arbeit im Kapitel 6 sein. Je flexibler eine Lichtsignalanlage auf die aktuellen und prognostizierten Verkehrszustände reagieren kann, desto schwieriger wird es, die Eintreffwahrscheinlichkeit von Restzeiten oder Steuerungsentscheidungen zu prognostizieren. Eine lokale verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerung steht somit einer konsistenten, langfristigen und sicheren Prognose der Steuerungszustände entgegen.

Ziel der Kooperation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur ist es, die Einsatzgrenzen der Einzelfunktionalitäten Verkehrssteuerung und Verkehrsbeeinflussung mit den Einsatzbereichen des jeweilig anderen Systems zu kompensieren. Verstärkende Effekte, welche beim Zusammenspiel in einer positiven verkehrlichen Wirksamkeit resultieren, sollen in dieser Arbeit erörtert und gefördert werden. Sich schwächende oder auslöschende Effekte und daraus resultierende negative Wirkungen sind unterdessen zwingend zu vermeiden. Neben dem technischen Aufbau des telematischen Gesamtsystems werden die nächsten Kapitel die verkehrliche Wirksamkeit der Einzelfunktionen sowie deren Kooperation beleuchten.



## **3 Entwicklung und Umsetzung der kooperativen Lichtsignalanlage**

### **3.1 Problemstellung**

Der wechselseitige Austausch, die Verarbeitung und die Auswertung von Informationen zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage mittels einer drahtlosen Kommunikation sind maßgebender Bestandteil des in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Gesamtsystems zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung. Die Funktionalitäten des Systems basieren auf Verfahren der Fahrzeugortung, Georeferenzierung und Kommunikation.

Vom derzeitigen Standpunkt aus betrachtet sind weder die drahtlosen Kommunikationseinrichtungen im Fahrzeug und an Infrastruktureinrichtungen vorgesehen, noch sind die wenigsten Fahrzeuge in der Lage, eine Fahrzeugortung und Georeferenzierung in Bezug auf die vorgestellte telematische Anwendung an Lichtsignalanlagen vorzunehmen. Aus diesem Grund beschreibt Kapitel 3 den im Rahmen des Forschungsprojekts AKTIV-VM (AKTIV-2011) entwickelten und der vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden Systemaufbau der kooperativen telematischen Lösung zwischen Lichtsignalanlage und ausgestattetem Fahrzeug. In Teilen wurde der ursprüngliche Aufbau etwas modifiziert. Neben Chancen und Grenzen bezüglich der Fahrzeugortung und der Kommunikation wird auf die Problematik der Hard- und Softwareentwicklung eingegangen.

Aus den zuvor ermittelten Grundlagen ergaben sich offene Fragen zur technischen Entwicklung und Umsetzung der kooperativen Lichtsignalanlage. Diese sollen während der Bearbeitung dieses Kapitels thematisiert und beantwortet werden. So ist fraglich, ob die Genauigkeit der Ortung gegeben ist, um Fahrzeuge georeferenzieren zu können. Genügen bspw. die Reichweiten des herkömmlichen WLAN-Standards für die Umsetzung verkehrlicher Anwendungen? Oder inwieweit und in welcher Art ist eine Verteilung der Rechenleistung zwischen dem Endgerät im Fahrzeug und den infrastrukturseitigen Einrichtungen sinnvoll? Wie kann die Hard- und Softwareentwicklung möglichst einfach realisiert und getestet werden, und welche Instrumentarien stehen zu diesem Zweck zur Verfügung?

Alle aufgeworfenen Fragestellungen werden als Forschungshypothesen formuliert und dem jeweiligen Hauptkapitel dieser Arbeit vorangestellt. Sie werden im Kapitel als Untersuchungsschwerpunkt aufgegriffen, belegt oder widerlegt.

#### **Forschungshypothesen:**

H 3-1 Die Fehler der satellitengestützten Ortung der Fahrzeuge sind infolge von Georeferenzierungsverfahren tolerier- und korrigierbar.

H 3-2 Die Kommunikationsreichweiten zwischen mobilen Endgeräten und infrastrukturseitigen Einrichtungen sind für die kooperative Verkehrsbeeinflussung und -steuerung ausreichend.

- H 3-3 Auf Grund der verfügbaren Rechenleistung ist eine Verteilung der Aufgaben des kooperativen Systems auf die Endgeräte sinnvoll.
- H 3-4 Eine virtuelle Testumgebung der Komponenten ermöglicht eine schnelle und effiziente Entwicklung der telematischen Anwendungen und bietet die Möglichkeit der einfachen Reproduzierbarkeit von Fehlerbildern.
- H 3-5 Auf reale empirische Tests der kooperativen Anwendung kann trotz Nutzung einer virtuellen Testumgebung nicht gänzlich verzichtet werden.

### 3.2 Systemanforderungen und Systemaufbau

Das System zur Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung an signalisierten Knotenpunkten besteht aus zwei Komponenten: das im Fahrzeug befindliche kooperative Endgerät und die kooperative Lichtsignalanlage. Sie sind in Abbildung 3-1 dargestellt und werden im Folgenden anhand ihrer Aufgaben bei der Datengenerierung, der Datenverarbeitung und dem Datenaustausch erläutert.

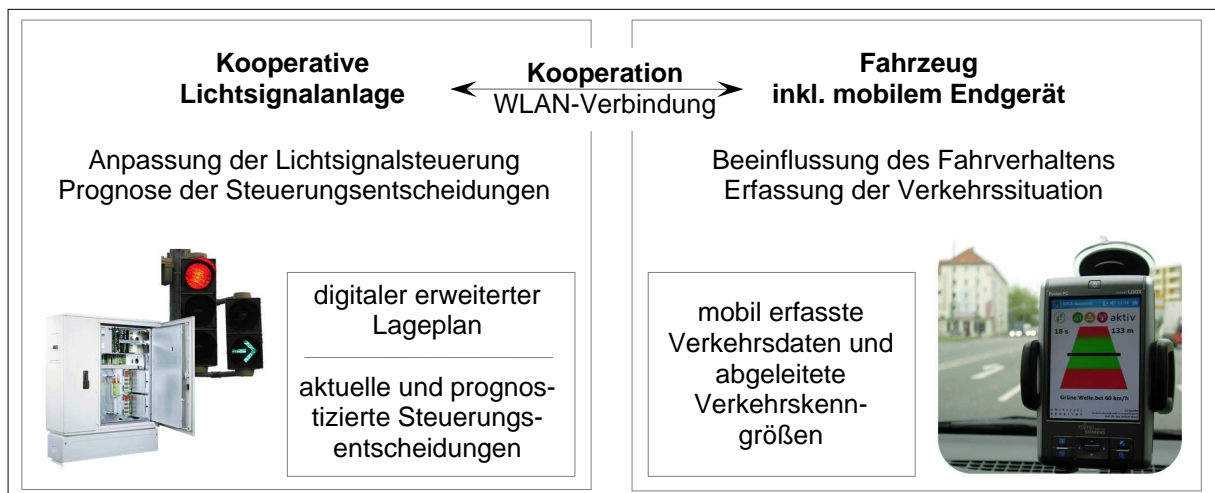


Abbildung 3-1: Kooperative Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung

Im Fahrzeug befindet sich das *kooperative Endgerät* inklusive der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle, in der Literatur oft als Human Machine Interface (HMI) bezeichnet, welches in seiner Ausführung sehr unterschiedlich sein kann. Neben bordintegrierten Systemen können auch mobile Systeme wie Mobiltelefone oder Personal Digital Assistant (PDA) Verwendung finden. Sie müssen über eine Ortungskomponente verfügen und eine Luftschnittstelle via WLAN anbieten. In Fahrzeugen befindliche Endgeräte sammeln die mobil erfassten Daten und filtern bzw. generieren die für die Anwendung relevanten Kenngrößen wie Wartezeit, Rückstaulänge, Anzahl der Halte oder Reisegeschwindigkeit, um sie als mobil erfasste Daten an die kooperative Lichtsignalanlage zu senden.

Des Weiteren dienen die Endgeräte der Visualisierung der verbleibenden Grün- und Rotzeiten, der Anzeige der Grüne Welle Information und ggf. der Weitergabe relevanter Verkehrsinformationen an die Fahrzeuglenker. Das HMI ist für die Nutzerakzeptanz des Gesamtsystems von großer Bedeutung. Eine schnelle Begreifbarkeit, eine übersichtliche Bedienführung und eine einfache Implementierbarkeit sind nur einige Kriterien, die diese

Schnittstelle erfüllen sollte. Eine zur Visualisierung zusätzlich stattfindende Audioausgabe soll die Ablenkung durch die Assistenzfunktion minimieren.

Die *kooperative Lichtsignalanlage* stellt dem ausgestatteten Fahrzeug alle wichtigen Verkehrs- und Steuerungsinformationen sowie den erweiterten digitalen Lageplan zur Verfügung. Zu den infrastrukturseitigen Einrichtungen gehört primär die Lichtsignalanlage inklusive des Steuerschranks. Diese Grundausstattung wird durch einen Access Point und eine Recheneinheit als Kommunikationsschnittstelle für die drahtlose Kommunikation zwischen Infrastruktur und Fahrzeug ergänzt. Hierfür wurde der WLAN-Standard IEEE 802.11b/g mit einer Datenübertragungsrate von bis zu 54 MBits/s genutzt. Der Aspekt der Wirtschaftlichkeit und das Ziel einer schnellen Marktdurchdringung gaben den Ausschlag zur Entscheidung für diesen Standard. Es existieren ein kostenfreier Zugang, eine vergleichsweise gute Kenntnis der Leistungsfähigkeit dieser Technologie sowie eine aktuell hohe Marktdurchdringung derartiger Geräte. Als Schwachstelle ist die Leistungsminderung infolge einer Vielzahl anderer im Umfeld der LSA befindlicher Funknetze zu nennen. Die kooperative Lichtsignalanlage verarbeitet zudem die über die mobil erfassten Daten generierten Anforderungen im Signalprogramm und nimmt Anpassungen an das aktuelle Verkehrsgeschehen vor.

Die vorgestellte Lösung ist hinsichtlich der Informationsübertragung ein dezentraler Ansatz, bei dem alle Lichtsignalanlagen mit dem entsprechenden Kommunikationsmodul ausgestattet werden. Dem steht ein zentraler basierter Ansatz mit einem Verkehrsrechner und einer Mobilfunkverbindung zum Fahrzeug gegenüber. Mit Hilfe des dezentralen Ansatzes kann sichergestellt werden, dass die direkt und lokal im Steuergerät stattfindenden vergleichsweise „harten“ Eingriffe der Priorisierung von Einsatzfahrzeugen oder des öffentlichen Verkehrs dem Fahrzeugfahrer sofort übermittelt werden können. Durch eine infrastrukturseitige Vernetzung der Kommunikationsmodule können Informationen zwischen den kooperativen LSA ausgetauscht werden. Die Weitergabe von Gefahrenwarnungen oder auch die Übermittlung des Grünbandbereiches für die Anzeige der Geschwindigkeitsempfehlung der Grünen Welle Information werden über diesen I2I-Kommunikationsweg realisiert.

Aus den verschiedenen Anwendungen und Zielen, die einem kooperativen Gesamtsystem zu Grunde liegen bzw. die Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit und den Betrieb solcher Systeme sind, ergeben sich für den Einsatz bestimmte Systemanforderungen. Diese sollen definiert werden und später für den Nachweis der technischen Machbarkeit herangezogen werden. Die unterschiedlichen Anwendungsfälle können detailliert in OTTO & HOYER-2010A nachvollzogen werden.

Hinsichtlich der Fahrzeugortung wird als Mindestanforderung verlangt, dass mit Hilfe eines Georeferenzierungsverfahrens ein Fahrzeug in einer Zufahrt lokalisiert werden kann. Im dichten innerstädtischen Straßennetz müssen sowohl die GPS-Ortung als auch alle weiteren logischen Verfahren der Georeferenzierung eine entsprechende Genauigkeit aufweisen. Auch muss der Georeferenzierungsalgorithmus hinsichtlich seiner Rechenzeit auf einem handelsüblichen mobilen Endgerät schnell genug arbeiten, um eine mindestens sekundliche Positionsbestimmung und Georeferenzierung zu ermöglichen. Weiterhin sollten genügend große Kommunikationsreichweiten verfügbar sein, um den Datenaustausch zwischen LSA

und fahrzeugseitigen Endgerät zu realisieren. Als Mindestanforderung sollen hier 50 m bis 100 m vorausgesetzt werden.

Im Weiteren werden zunächst die Einzelkomponenten Ortung, Georeferenzierung und Kommunikation genauer untersucht. So soll belegt werden, dass die Grundelemente des telematischen Systems technisch realisiert werden können.

### 3.3 Ortung und Georeferenzierung

#### 3.3.1 Ortung

Basis der vorgestellten kooperativen Anwendung im Verkehr sind neben dem Datenaustausch die genaue Erfassung der Fahrzeugposition sowie daraus abgeleitete Verkehrskenngrößen und Verkehrszustände. Das der Arbeit zugrunde liegende System wurde verhältnismäßig kostengünstig mit handelsüblichen GPS- und WLAN-Empfängern umgesetzt. Für eine präzise Bestimmung des GPS-Fehlers und bestimmter Umfeldbedingungen, die das GPS-Ortungsverhalten beeinflussen, ist es notwendig, systematische Fehler weitgehend quantifizieren und ausgleichen zu können. Es findet keine Koppelnavigation statt. Das heißt, GPS-Fehler können nicht über fahrzeuginterne Daten korrigiert werden. Auf X-FCD kann ebenfalls nicht zurück gegriffen werden.

Da keine Erkennung der Fehler möglich ist, sollte eine Untersuchung zur Genauigkeit der Fahrzeugortung und des GPS-Fehlerverhaltens eines mobilen Endgeräts vom Typ „Fujitsu Siemens Pocket Loox“ durchgeführt werden. Als GPS-Fehlerverhalten wird der Verlauf der Polygonlinie, d. h. der Kette von einzelnen aufgenommenen GPS-Punkten inklusive typischer Abweichungen und Sprünge, verstanden. Die Größe des Fehlers, dessen Verteilung und weitere Einflussfaktoren auf die Fehleranfälligkeit sind zu eruieren, um sie im Zuge der Georeferenzierung korrigieren zu können.

Für die Untersuchung der geschilderten Problematik wurden Aufnahmen von GPS-Polygonlinien mit Hilfe eines spurgeführten Fahrzeugs auf einem Teilstück einer Straßenbahntrasse im innerstädtischen bebauten Gebiet der Stadt Kassel vorgenommen. So kann sichergestellt werden, dass sich der GPS-Empfänger im Zuge mehrerer Durchfahrten bei jeder Messreihe an der identischen Position relativ zur Achse der Tramtrasse befindet. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

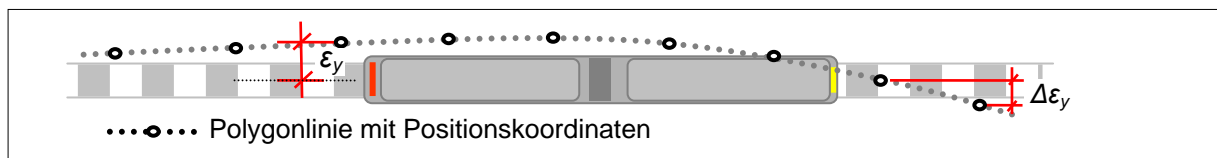


Abbildung 3-2: Versuchsanordnung zur Ermittlung des GPS-Fehlers

Pro Fahrtrichtung wurden fünf Messreihen aufgenommen. Für die Bestimmung des absoluten Fehlers quer zur Fahrtrichtung  $\epsilon_y$  wurde der senkrechte Abstand zur Referenzlinie, welche die Achse der Straßenbahntrasse ist, von 3.741 aufgenommenen Positionskoordinaten ermittelt. Die GPS-Referenzwerte der Schienentrasse wurden über Google™ Earth ausgelesen. Weiterhin wurde die Fehlerdifferenz  $\Delta\epsilon_y$  ermittelt, welche die betragsmäßige Änderung

des absoluten Fehlers von der vorherigen Positionskoordinate  $\varepsilon_{y,i-1}$  zur aktuellen Positionskoordinate  $\varepsilon_{y,i}$  angibt. Sie wird über (3-1) berechnet:

$$\Delta\varepsilon_y = |\varepsilon_{y,i-1} - \varepsilon_{y,i}| \quad (3-1)$$

$\Delta\varepsilon_y$  Fehlerdifferenz zwischen aktuellem Absolutfehler  $\varepsilon_{y,i}$  und vorherigem Absolutfehler  $\varepsilon_{y,i-1}$

Eine geringe Abweichung dieser Koordinaten zu den real erfassten Daten ist nicht auszuschließen. Mittels der gemessenen GPS-Polygonlinien des Feldversuchs konnte aber festgestellt werden, dass dieser Fehler, der in die Messung als systematischer Fehler eingeht, im Vergleich zum systembedingten zufälligen GPS-Fehler vernachlässigbar klein ist. Abbildung 3-3 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung.

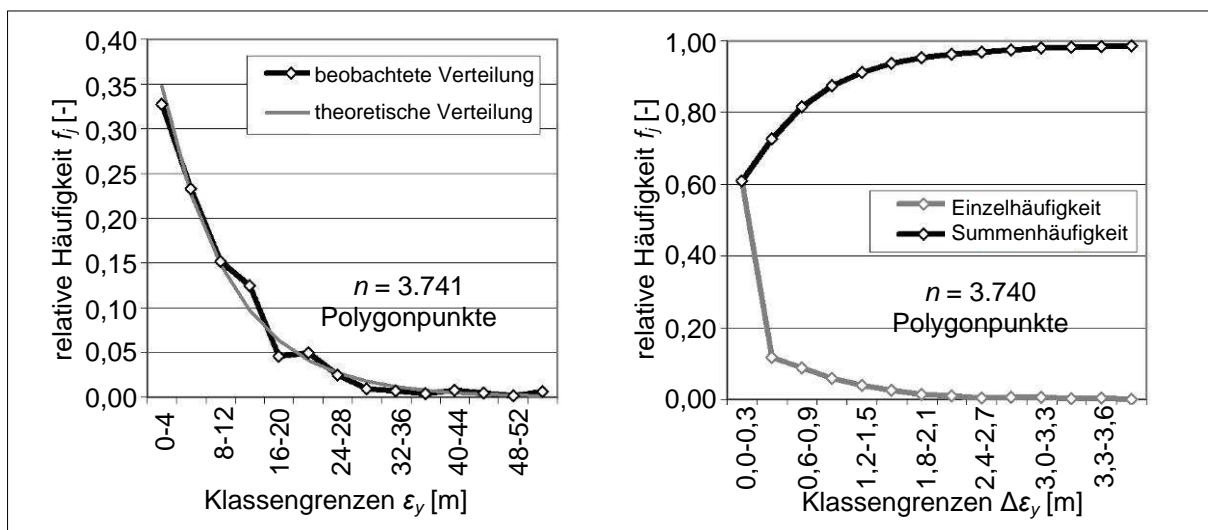


Abbildung 3-3: Darstellung des GPS-Fehler – Häufigkeitsdiagramme

Das links dargestellte Diagramm zeigt die Dichtefunktion der relativen Häufigkeit  $f_j$  abgetragen über die klassierten absoluten Fehler  $\varepsilon_y$ . Die gezeigte Verteilung entspricht einer Exponentialfunktion der in Gleichung (3-2) aufgezeigten allgemeinen Form. Der Nachweis wird im „Anhang C: Ortung und Kommunikation“ im Unterpunkt „Nachweis des absoluten GPS-Fehlers“ geführt.

$$f_j(\varepsilon_y) = 1 - e^{-a \cdot \varepsilon_y} \quad (a = \text{konst.}) \quad (3-2)$$

Der Mittelwert des absoluten Fehlers beträgt 9,40 m mit einer Streuung von 9,13 m. Lediglich 5 % der ermittelten absoluten GPS-Fehler sind größer als 30 m und etwa zwei Drittel der Fehler kleiner als 10 m.

Abbildung 3-4 soll die vorgestellten Ergebnisse etwas verdeutlichen. Beispielhaft ist eine Polygonlinie rot hervorgehoben. Diese weist einen sehr großen Fehler von  $\varepsilon_y \approx 45$  m auf. Der „Sprung“ entsteht in diesem Fall vermutlich durch die Reflexion der Satellitensignale bei Einfahrt der Tram von einer Freifläche in einen dicht bebauten Straßenzug. Im Ergebnis der Untersuchung des absoluten Fehlers kann ein Fahrzeug aufgrund der nachgewiesenen Häufigkeitsverteilung nicht exakt auf einen Fahrstreifen georeferenziert werden. Es kann weiterführend ebenfalls nicht ermittelt werden, ob sich das Fahrzeug in einer Zufahrt der

Lichtsignalanlage befindet oder auf einer parallel verlaufenden Straße. Aufgrund der hohen Dichte des innerstädtischen Straßennetzes kann dies nicht ausgeschlossen werden. Somit musste weiterhin untersucht werden, ob der Verlauf der Polygonlinie stetig ist und so über mehrere Punkte nachvollziehbar bleibt, oder ob größere Sprünge, wie sie in Abbildung 3-4 hervorgehoben sind, gehäuft auftreten.

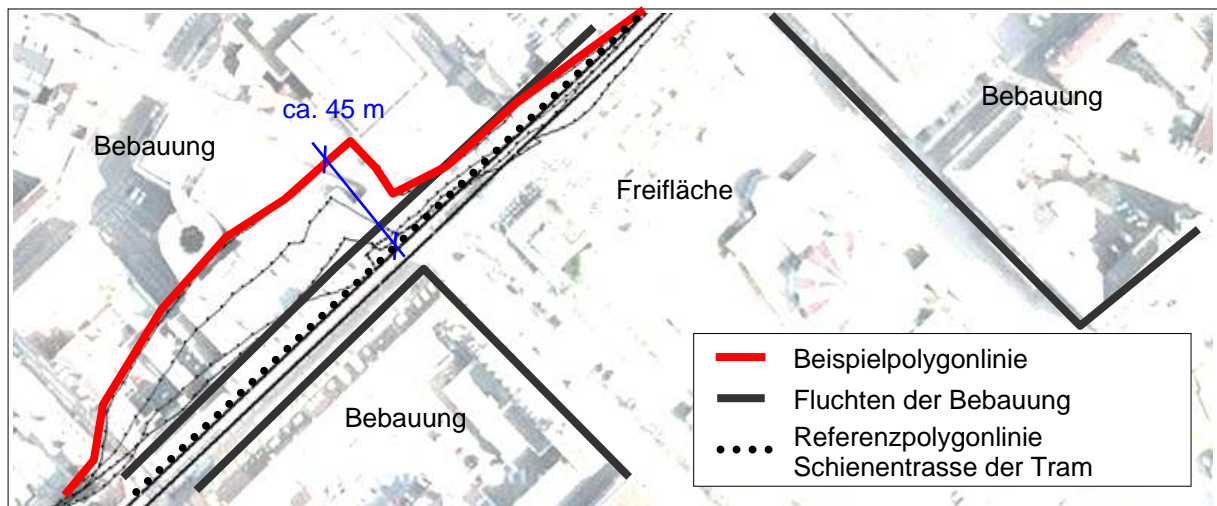


Abbildung 3-4: Darstellung des GPS-Fehler – Beispielbetrachtung

Zum Nachweis des Grades der Stetigkeit der Polygonlinie wird die Fehlerdifferenz genutzt. Sie gibt die Änderung des absoluten Fehlers von einer Positionsordinate zur nächsten an. Die über Gleichung (3-1) ermittelte Verteilung der Fehlerdifferenz ist im rechten Diagramm der Abbildung 3-3 als relative Häufigkeit über Fehlerklassen abgetragen. Bei 1.725 Koordinaten ist die Fehlerdifferenz gleich 0 m. Im Ergebnis sind über 90 % der Sprünge kleiner als 1,5 m und lediglich 5 % größer als 2,0 m. Die Dichtefunktion ist nach folgender Funktionsgleichung Weibull verteilt:

$$f_j(\Delta\epsilon_y) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta\epsilon_y}{a}\right)^b} \quad (a, b = \text{konst.}) \quad (3-3)$$

Der Nachweis wird im „Anhang C: Ortung und Kommunikation“ im Unterpunkt „Nachweis des absoluten GPS-Fehlers“ geführt. Aufgrund der oft kleinen Sprünge zwischen den Fehlern der GPS-Koordinaten stellt sich der Verlauf der Polygonlinie als stetig ohne große Unregelmäßigkeiten dar. Extreme Sprünge sind daher die Ausnahme. Die Georeferenzierung der Fahrzeugposition in die Zufahrt eines signalisierten Knotenpunkts ist somit über die Betrachtung mehrerer Positionskoordinaten möglich, jedoch bleibt die Zuordnung des Fahrstreifens ausgeschlossen. Weitere Ergebnisse, die aus der Untersuchung abgeleitet werden können, sollen im Folgenden kurz zusammengefasst werden:

- Die über den Doppler-Effekt der GPS-Signale ermittelten Geschwindigkeiten sind auch bei großen Fehlern innerhalb der Positionsbestimmung sehr genau.
- Bei Fahrzeugen mit Fahrgeschwindigkeiten unter 5 km/h bietet die Richtungsangabe des GPS-Empfängers keine verlässlichen Informationen mehr.



- Moderne GPS-Empfänger extrapolieren die Position auch bei schlechtem Empfang der Satellitensignale.
- Im linken Diagramm der Abbildung 3-5 ist beispielhaft eine GPS-Polygonlinie dargestellt. Mit Hilfe wechselnder Grautöne (schwarz/grau) wird die Änderung der Satellitenauswahl der satellitengestützten Ortung gekennzeichnet. Deutlich ist zu erkennen, dass hier nicht die geänderte Satellitenauswahl die Sprünge in der GPS-Polygonlinie erzeugt. Diese würden zu Unstetigkeiten genau beim Wechsel vom schwarzen auf den grauen Graph führen.

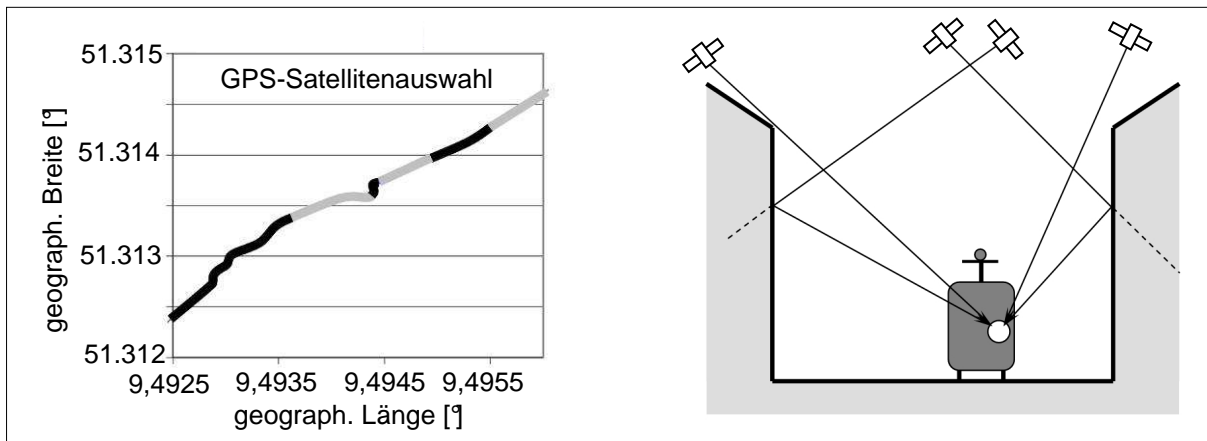


Abbildung 3-5: Darstellung des GPS-Fehler – Satellitenwahl

- Die absoluten Fehler innerhalb von Bereichen mit identischer Satellitenauswahl lassen sich auch nicht mittels der vom GPS-Empfänger gelieferten HDOP, VDOP oder PDOP-Werte begründen, die als Maß der geometrischen Gesamtfehler gelten.
- Die Verfälschung des GPS-Signals innerhalb bebauter Gebiete ist größer als bei unbebauten weitläufigen Flächen. Es konnten innerhalb bebauter Flächen maximale Abweichungen bis zu 45 m (siehe Abbildung 3-4) festgestellt werden. Grund sind Laufzeitverlängerungen durch Reflexion der Signale an Häuserfronten, die zu einer Verschiebung der vom GPS berechneten Position führen. Eine Prinzipskizze zeigt das rechte Bild der Abbildung 3-5.

Heutige GPS-Empfänger, die hauptsächlich für Navigationszwecke konzipiert wurden, sind so ausgelegt, dass sie relativ schnell zu einer Bestimmung der Position kommen. Sie nehmen dabei zu Beginn der Ortung auch größere absolute Fehler in Kauf. Im Zuge der Untersuchung konnten lediglich Fehler quer zur Fahrtrichtung ermittelt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Fehler längs zur Fahrtrichtung betragsmäßig identisch sind. Dies wurde jedoch nicht weiter untersucht, da die notwendige Untersuchungsmethodik entsprechend komplexer wäre. Bei der Anzeige der Geschwindigkeitsempfehlungen in nicht gesättigten Zufahrten und bei Auslastungen der Freigabezeiten unter 85% führen Fehler in Längsrichtung zu einer zu frühen oder zu späten Ankunft am Knotenpunkt. Der Fehler kann durch bestimmte logische Bedingungen im Zusammenspiel zwischen der Georeferenzierung und der auf dem Endgerät ausgeführten Applikation nahezu kompensiert werden. Der GPS-Fehler in Längsrichtung spielt nur bei der Erfassung der Rückstaulänge eine Rolle. Auf die ermittelte Wartezeit, Reisegeschwindigkeit bzw. die Anzahl der Halte hat er keinen oder nur geringen fehlerhaften Einfluss. Da für die Abbildung der Verkehrssituationen von

übersättigten Zufahrten, in denen die Freigabezeit komplett ausgelastet ist, allein die Wartezeit genügt (siehe Kapitel 5), und dies die im innerstädtischen Bereich kritischen Verkehrssituationen sind, wird der GPS-Fehler in Längsrichtung im Zuge dieser Arbeit nicht detaillierter untersucht.

#### **3.3.2 Georeferenzierung**

Verfahren für die Georeferenzierung von Positionsdaten, im angelsächsischen Sprachraum auch als Map-Matching bezeichnet, dienen dem Ausgleich des Fehlers der Ortungssysteme. Sie bilden die Basis der kooperativen Funktionalitäten und Anwendungen im mobilen Endgerät. Alle bei der Fahrzeugortung quer zur Fahrtrichtung entstehenden Fehler, welche im Algorithmus festgelegte Fehlertoleranzgrenze nicht überschreiten, können so korrigiert werden.

Generell bestehen zwei Möglichkeiten, einen erweiterten digitalen Lageplan, welcher alle benötigten Informationen der kooperativen Anwendung enthält, im System abzulegen. Die Ablage kann infrastrukturseitig oder fahrzeugseitig erfolgen. Im Abwägungsprozess steht die unkomplizierte Möglichkeit der Aktualisierung bei der infrastrukturseitigen Ablage dem zusätzlichen Datenversand dieser Informationen zum Endgerät gegenüber. Da die zu transportierende Datenmenge der Geoinformationen verhältnismäßig klein und der gesamte Vorgang der Georeferenzierung nicht zeitkritisch ist, wurde eine infrastrukturseitige Ablage dieser Informationen vorgesehen. Vorteil dieser Variante ist die Tatsache, dass eine bauliche oder betriebliche Änderung des Knotenpunkts in der digitalen Karte sofort aktualisiert werden kann. Eine z. B. falsche Zuordnung der Signalgruppen zu den Zufahrten infolge veralteter Kartengrundlagen könnte zu Irritationen beim Fahrzeugführer und erheblichen Gefahrensituationen führen. Die für die Kooperation zwischen mobilem Endgerät und Lichtsignalanlage benötigte digitale Karte unterscheidet sich deutlich von herkömmlichen Karten, welche rein für Navigationszwecke konzipiert sind. Neben den als Kanten hinterlegten Straßen und spezifischen Eigenschaften werden diverse Signalisierungsinformationen übermittelt. Hierzu gehören z. B. die Zuordnung der Signalgruppen zu den Kanten, statisch vorgesehene Progressionsgeschwindigkeiten, Restzeiten der Signalgeber, Verkehrsregelungen im Knotenpunkt oder auch Informationen zu Unfallschwerpunkten oder aktuellen Verkehrshinweisen.

Ziel der Entwicklung des Map-Matching-Algorithmus ist es, ein auf die Bedürfnisse einer kooperativen Anwendung zugeschnittenes Verfahren bereit zu stellen. Die Georeferenzierung erfolgt fahrzeugseitig. Dabei soll die Rechenleistung aufgrund des handelsüblichen Endgerätes, das nicht primär für diese Anwendung konzipiert ist, minimiert werden. Der eigens für das mobile Endgerät entwickelte Map-Matching-Algorithmus arbeitet auf der Basis folgender erfasster oder übermittelter Daten:

- geographische Länge und Breite der Fahrzeugposition,
- Fahrtrichtung des Fahrzeugs,
- Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs und
- Polygonpunkte der digitalen Karte.



Im innerstädtischen Straßennetz weisen signalisierte Knotenpunkte nur selten planfreie Führungen der Verkehrsströme auf bzw. brauchen diese bei der Georeferenzierung nicht berücksichtigt werden. Daher ist eine Georeferenzierung des Fahrzeugs in z-Richtung, d. h. die Verarbeitung von Höheninformationen, nicht vorgesehen. Folgende vier Prozesse werden im Zuge des Georeferenzierungsverfahrens stufenweise ausgeführt:

1. Abfrage aller Polygonpunkte der unterschiedlichen Signalgruppennzufahrten aus der digitalen Karte,
2. Berechnung des orthogonalen Abstands des Fahrzeugs zur nächstgelegenen Streckenkante inklusive Fehlertoleranz,
3. Prüfung der Übereinstimmung von Fahrzeugrichtung und Richtung der Streckenkante im Bereich des tolerierten Fehlers und
4. lotrechte Georeferenzierung der ermittelten Fahrzeugposition auf die Kante.

Eine detaillierte Beschreibung des Georeferenzierungsverfahrens kann OTTO & HOYER-2009B entnommen werden. Als Rückgabewert werden die geographische Einordnung des Fahrzeugs in die Zufahrt sowie der Abstand des Fahrzeugs zur Haltlinie geliefert. Da der Richtungswinkel bei Fahrgeschwindigkeiten des Fahrzeugs von unter 5 km/h große Ungenauigkeiten aufweist, bleibt dieser unverändert, sobald diese Geschwindigkeit unterschritten wird. Abbildung 3-6 zeigt das Ergebnis des Map-Matching-Algorithmus in einer schematischen Darstellung.

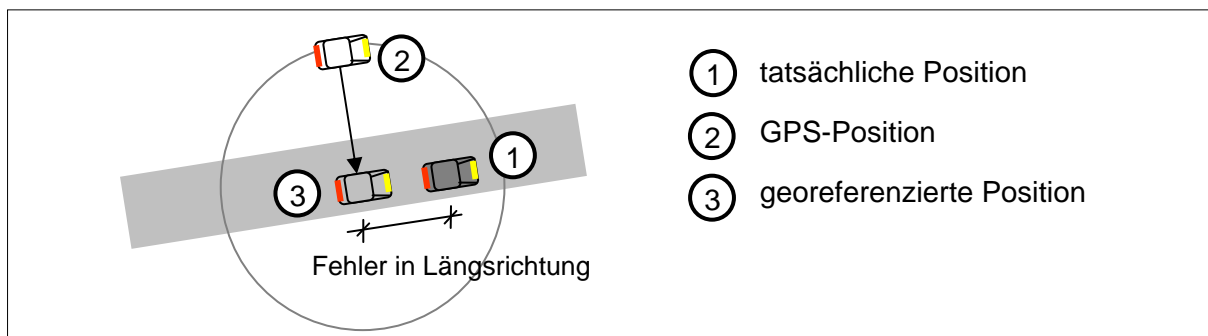


Abbildung 3-6: Ergebnis der Georeferenzierung

Das weiße Fahrzeug ② repräsentiert die ermittelte GPS-Position im Koordinatensystem. Diese kann sich im grau dargestellten Kreis befinden, der die vordefinierte Fehlertoleranz aufzeigt. Die tatsächliche Position ① des Fahrzeugs ist als dunkelgrau hinterlegtes Fahrzeug darstellt. Die Abweichung zwischen dem realen Fahrzeugstandort und dem georeferenzierten Standort ③ ist im Bild als Fehler in Längsrichtung verdeutlicht und kann nicht korrigiert werden. Das vorgestellte Georeferenzierungsverfahren genügt den Ansprüchen des zuvor beschriebenen kooperativen Systems unter Berücksichtigung einer verhältnismäßig geringen zur Verfügung stehenden Rechenleistung des mobilen Endgeräts.

## 3.4 Kommunikation

### Kommunikationspfade

Neben der Fahrzeugortung und -georeferenzierung ist die Kommunikation der wesentliche Bestandteil eines kooperativen Systems. Sowohl die Kommunikationsprozesse und -wege

zwischen den Kommunikationspartnern Lichtsignalanlage und Fahrzeug als auch die internen Prozesse sind sehr vielschichtig und komplex. Abbildung 3-7 zeigt ein Sequenzdiagramm, mit dessen Hilfe die wichtigsten Prozesse erläutert werden sollen.

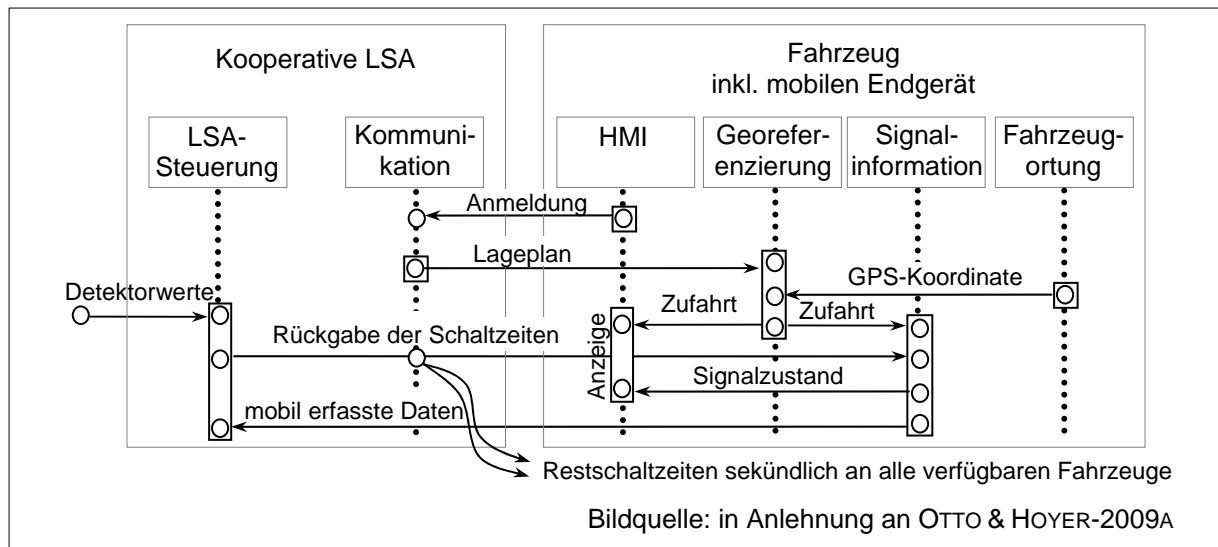


Abbildung 3-7: Kooperation zwischen LSA und Fahrzeug – Sequenzdiagramm

Das mobile Endgerät des ausgestatteten Fahrzeugs scannt zunächst alle in Reichweite befindlichen Funknetze. Falls mehrere kooperative Lichtsignalanlagen in Funkreichweite sind, wird eine Verbindung zum LSA-WLAN mit der zunächst größten Signalstärke aufgebaut. Das Fahrzeug erhält von der LSA den erweiterten digitalen Lageplan. Darüber hinaus wird kein gesondertes Kartenmaterial benötigt. Zusätzlich zur Knotenpunktgeometrie werden die Restzeiten aller Signalgeber der Kreuzung an das kooperationsfähige Fahrzeug übertragen. Mit Hilfe der digitalen Karte, der aktuellen Fahrzeugposition aus der Fahrzeugortung und dem Georeferenzierungsalgorithmus lokalisiert sich das Fahrzeug in einem der Knotenarme. Über die Kenntnis der Zufahrt kann das fahrzeugseitige Endgerät die zutreffenden Signalgruppen extrahieren, welche für eine Anzeige der Restzeiten auf dem HMI bzw. für eine Berechnung der Grüne Welle Informationen benötigt werden. Das ausgestattete Fahrzeug sammelt während der Durchfahrt der Zufahrt Informationen zum Fahrtverlauf und wertet die wichtigsten Kenngrößen wie Wartezeit, Anzahl der Halte, Rückstaulänge oder Reisezeit aus. Anschließend werden diese mobil erfassten Kenngrößen an die LSA gesendet. Die kooperative LSA kann über die mobil erfassten Daten und evtl. zusätzliche Informationen aus stationären Detektoren die Signalisierung an die aktuelle Verkehrssituation anpassen. Die angepassten aktuellen Steuerungsinformationen werden sekundlich an alle im Kommunikationsbereich befindlichen Fahrzeuge gesendet. Aus Sicht der Rechenleistung ist das Gesamtsystem der kooperativen Anwendung so konzipiert, dass die „Intelligenz“ und damit die Hauptrechenleistung beim Endgerät des ausgestatteten Fahrzeugs liegt. Auch bei großen Verkehrsstärken und hohen Ausstattungsraten bleibt das Gesamtsystem leistungsfähig und die infrastrukturseitige Zunahme des Rechenaufwands wird dank der Verteilung der Rechenleistung minimiert.

#### **Kommunikationsprotokolle**

Für die Luftschnittstelle zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage kommen aus Sicht der Datenübertragungstechnik innerhalb der Transportschicht die zwei sehr häufig angewendeten Datenprotokolle Transmission Control Protocol (TCP) und User Datagram Protocol (UDP) in Betracht. Das TCP gehört zur Gruppe der TCP/IP (IP-Internetprotokoll). TCP Verbindungen arbeiten ohne Datenverlust und stellen sicher, dass die Daten immer in der richtigen Reihenfolge ankommen. Jedes Datenpaket muss dabei bestätigt werden, ehe ein weiteres Paket empfangen werden kann. Das Quittieren und ggf. erneute Anfragen der Datenpakete erfordert Zeit. Die Funkverbindung ist dadurch zusätzlich belastet. Der große Vorteil ist der fehlerfreie Empfang der Datenpakete. Befinden sich zu viele Daten im Datenpuffer, d. h. zu wenige Datenpakete wurden gegenseitig bestätigt, führt dies automatisch zu einer Verlangsamung. Auch das UDP gehört zu Gruppe der TCP/IP, ist aber im Unterschied zu TCP nicht für Zuverlässigkeit sondern für Geschwindigkeit konzipiert. Ein Verbindungsaufbau mit dem Kommunikationspartner ist hierbei nicht notwendig, sondern die Daten können sofort versendet werden. Da keine Quittierung der Datenpakete vorgesehen ist, kann es zu einer Änderung der Reihenfolge der Datenpakete kommen oder es können sogar komplette Datenpakete verloren gehen (POSCHMANN ET AL.-2007).

Im hier vorgestellten System zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung an signalisierten Knotenpunkten werden sowohl die Geoinformationen des Knotenpunktes als auch die Basisinformationen der LSA wie Schaltzeiten und Verkehrsinformationen sekundlich per Broadcast, d. h. an alle im Empfangsbereich des WLAN-Access-Points befindlichen mobilen Endgeräte, gesendet. Als Übertragungsprotokoll wird UDP verwendet. Da das benutzte UDP verlustbehaftet sein kann, werden mit Hilfe von Prüfsummen, welche der übermittelten Zeichenkette angefügt werden, fehlerhafte Datenpakete erkannt und eliminiert. Wenn das Fahrzeug sich in einer der Zufahrten der Lichtsignalanlage referenziert hat, baut es über das TCP-Übertragungsprotokoll eine Verbindung mit dem Access-Point auf und überträgt die mobil erfassten Daten und abgeleiteten Kenngrößen wie Fahrzeugstandort, Anzahl der Halte, Rückstaulänge, Wartezeit und Reisezeit an die Lichtsignalsteuerung. Diese nutzt die Daten zur Anpassung der Steuerungsprozesse an die aktuelle Verkehrssituation. So gehen keine Informationen verloren oder werden verfälscht.

#### **Kommunikationsreichweiten**

Um die technische Machbarkeit und die Brauchbarkeit des WLAN-Standards IEEE 802.11b/g für verkehrliche Anwendungen nachzuweisen, wurden auf einer Teststrecke in Hattersheim Untersuchungen zu den Kommunikationsreichweiten durchgeführt. Für die Auswertung der Entfernungen und der notwendigen Zeiten des Verbindungsaufbaus konnten über alle Knotenpunkte und Zufahrten der Teststrecke in Summe 106 Messfahrten ausgewertet werden. Abbildung 3-8 zeigt die Teststrecke mit den kooperativen LSA sowie die zufahrtsweise gemittelten Kommunikationsreichweiten aller Durchfahrten. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit liegt bei 50 km/h.

Für die Darstellung des Kommunikationsaufbaus werden die in der Arbeit verwendeten Begriffe erster Kontakt, Handshake und Bestätigung der Anmeldung definiert. Beim ersten

Kontakt kann der Access Point das mobile Endgerät im Fahrzeug funktechnisch erfassen. Beim Zustandekommen einer Verbindung zwischen kooperationsfähigen Fahrzeug und Lichtsignalanlage wird vom Handshake gesprochen. Dies ist der erstmögliche Zeitpunkt eines wechselseitigen Informationsaustauschs. Direkt im Anschluss an den Handshake ist das im Fahrzeug befindliche Endgerät in der Lage, sich mit Hilfe der digitalen Karte zu georeferenzieren und bspw. eine Anmeldung an die kooperative LSA zu senden. Die Anmeldung des Fahrzeugs wird von der Lichtsignalanlage quittiert. Dies wird als Bestätigung der Anmeldung bezeichnet.

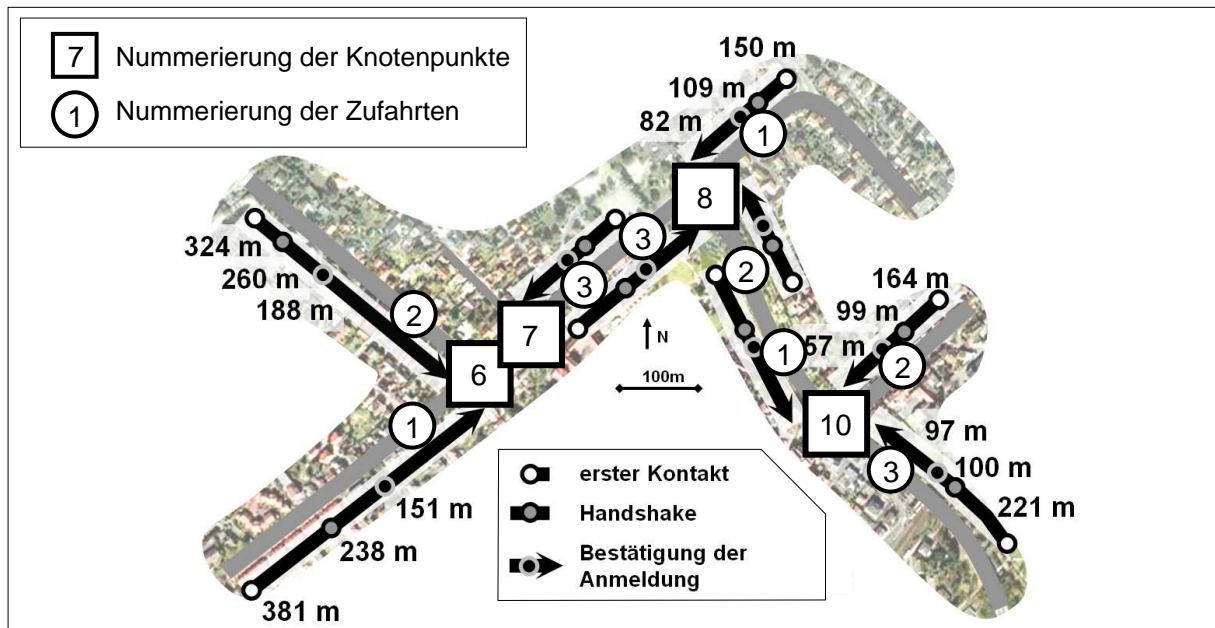


Abbildung 3-8: Darstellung der mittleren Kommunikationsreichweiten WLAN 802.11b/g

Tabelle 3-1 zeigt die Auflistung der Entfernungen zwischen der Haltlinie und dem Fahrzeug, welche zum Zeitpunkt des ersten Kontakts, des Handshakes bzw. der Bestätigung der Anmeldung bestehen, sortiert nach LSA und Zufahrt. Neben dem Mittelwert der einzelnen Zufahrten ist die Streuung der Werte angegeben. Eine graphische Darstellung der mittleren Kommunikationsreichweiten kann der Abbildung 3-8 entnommen werden.

Tabelle 3-1: Kommunikationsverhalten – räumliche Abstände

LSA	Zufahrt	erster Kontakt	Handshake		Bestätigung der Anmeldung	
		Mittelwert [m]	Mittelwert [m]	Streuung [m]	Mittelwert [m]	Streuung [m]
6/7	1	381	238	79	151	80
6/7	2	324	260	56	188	54
8	1	150	109	37	82	25
10	2	164	99	35	57	32
10	3	221	100	44	97	25

Neben der Entfernung der Fahrzeuge zum Knotenpunkt sind die durchschnittlichen Zeiten zwischen erstem Kontakt und Handshake sowie Handshake und Bestätigung der Anmeldung von Interesse. Diese sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Kommunikationsverhalten – zeitliche Dauer

LSA	Zufahrt	Zeit zwischen ersten Kontakt und Handshake		Zeit zwischen Handshake und Bestätigung der Anmeldung	
		Mittelwert [s]	Streuung [s]	Mittelwert [s]	Streuung [s]
6/7	1	5,9	2,8	5,0	2,9
6/7	2	4,7	1,9	3,8	3,4
8	1	4,4	1,6	3,1	1,9
10	2	3,6	1,9	3,7	1,0
10	3	3,4	1,8	2,1	0,7

Die Mittelwerte setzen sich aus mindestens 22 Durchfahrten je Zufahrt zusammen. Die Bestimmung der Zeiten für die Bestätigung der Anmeldung erfolgt aus mindestens 16 Fahrten mit Anmeldung. Es lässt sich feststellen, dass die mittlere Zeit zwischen dem ersten Kontakt und dem Handshake je nach Zufahrt zwischen 3 s im Minimum und 6 s im Maximum schwankt. Mit größeren Abständen zum Knotenpunkt nimmt auch die Zeit für den Verbindungsaufbau zu. Grund hierfür ist die teils instabile Verbindung infolge der größeren Entfernungen. Etwas geringer ist im Mittel die Zeit zwischen Handshake und Bestätigung der Meldung. Diese beträgt minimal 2 s und maximal 5 s. Der größer werdende Abstand zum Knotenpunkt verhält sich hier proportional zur Zeit des Verbindungsaufbaus. Identisch stellt sich dies bei der Streuung der Einzelwerte dar. Die Tabelle und Abbildung des Kommunikationsverhaltens mit den räumlichen Abständen und Zeitintervallen aller Zufahrten sowie die Darstellung der Streuungen können dem „Anhang C: Ortung und Kommunikation“ im Unterpunkt „Darstellung der Kommunikationsreichweiten“ entnommen werden.

Auffällig sind die in den verschiedenen Zufahrten unterschiedlichen Mittelwerte und Streuungen der Kommunikationsreichweiten und -zeiten. Die Ursache des ungleichmäßigen Verhaltens kann auf verschiedene Randbedingungen zurückgeführt werden. Als wesentliche Randbedingungen werden identifiziert:

- Eine Bepflanzung im Straßenraum führt zu Absorption der WLAN-Funkwellen und damit zu einer Minderung der Kommunikationsreichweite.
- Häuserfronten führen zu einer Reflexion bzw. Abschattung der Funkwellen und können zu einer Erhöhung oder Reduktion der Kommunikationsreichweite führen.
- Eine gerade Linienführung und damit Sichtkontakt zwischen Access Point und mobilen Endgerät erhöhen die Reichweite und Stabilität der Verbindung.
- Ein hoher Schwerverkehrsanteil bewirkt Verdeckungen zwischen mobilem Endgerät und Access Point und kann zu einer Verringerung der Kommunikationsreichweite führen.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Einflüsse auf das Kommunikationsverhalten sind zwar eindeutig belegbar, sie können jedoch aufgrund der Vielschichtigkeit der Einflussfaktoren und Wirkungen nicht quantifiziert und generalisiert werden. Daher sind Entscheidungen hinsichtlich der Funkausleuchtung immer vor Ort zu treffen. Beim Vergleich der Ergebnisse des Verbindungsaufbaus hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Betrachtung lässt sich zusammenfassend feststellen, dass das ausgestattete Fahrzeug in einem ausreichenden Abstand eine Verbindung mit der kooperativen LSA aufbauen kann. Auch eine Anmeldung ist durch ein genügend zeitiges Absetzen möglich. Weiterhin kann die Verkehrssituation in

der Zufahrt erfasst und an andere Fahrzeuge übermittelt werden. Die technische Machbarkeit des kooperativen Systems zur Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung mit dem WLAN-Standard IEEE 802.11b/g konnte infolgedessen nachgewiesen werden.

## **3.5 Testumgebung für die Hardware- und Softwareentwicklung**

### **3.5.1 Devices-in-the-Loop-Ansatz**

Die Entwicklung mobiler Endgeräte für telematische Systeme im Verkehr stellt eine besondere Herausforderung dar. Reale Feldtests aller Komponenten sind meist sehr zeitaufwendig und daher kostenintensiv. Eine Vielzahl von systemimmanenten Fehlern können jedoch bereits im Vorfeld eruiert und behoben werden. Neben den herkömmlichen Feldversuchen mit Testfahrten haben sich in den letzten Jahren automatisierte Hardware-in-the-Loop-Testsysteme (HiL) bewährt. Für eine große Anzahl an Tests gibt es wenig vergleichbare Alternativen zu HiL-Testsystemen, da die Durchführung im realen Testfeld mit großen Gefährdungen verbunden sein kann (MEYER-2008).

Aus der Inspiration der HiL-Testsysteme wurde für die Entwicklung und Erprobung der Softwarekomponenten und letztlich des gesamten in dieser Arbeit beschriebenen telematischen Systems ein für verkehrliche Anwendungen völlig neuartiger Ansatz entwickelt und verfolgt. Hierfür hat sich der Begriff Devices-in-the-Loop-Ansatz (DiL) etabliert. Alle infrastruktur- und fahrzeugseitig benötigten Geräte (engl.: Devices) werden, identisch dem späteren realen Aufbau, in einer Testumgebung verknüpft. Alle Anwendungen und alle Funktionalitäten der Geräte und der Kommunikationspfade zwischen den Geräten entsprechen exakt dem späteren realen Systemaufbau. Allein der Verkehrsablauf wird mit Hilfe einer mikroskopischen Verkehrssimulation nachgebildet und in diesen Kreislauf (engl.: Loop) eingespeist. Das Zusammenspiel aller Komponenten unter Berücksichtigung der überaus vielschichtigen Abhängigkeiten zwischen Verkehrsablauf, stationärer Erfassungseinrichtung und mobilem Endgerät kann durch eine umfassende Test- und Entwicklungsumgebung dargestellt werden. Dies ermöglicht authentische Tests der Applikationen. Durch die Trennung aller Funktionalitäten und durch die Verteilung der Anwendungen auf die tatsächlichen Geräte können die Prozesse auch rechentechnisch getrennt werden. Nach BÖKE ET AL.-2008 ist für eine schnelle und sichere Arbeit bei HiL-Anwendungen eine hardwaretechnische Trennung der Rechenleistung unbedingt notwendig. Dies wurde auch für die vorgestellte DiL-Testumgebung realisiert.

Um alle Kommunikationsprozesse zwischen dem Simulationsrechner und dem mobilen Endgerät detailliert nachvollziehen zu können, wird in Abbildung 3-9 ein Sequenzdiagramm mit den wesentlichen Pfaden der Datenübertragung dargestellt.

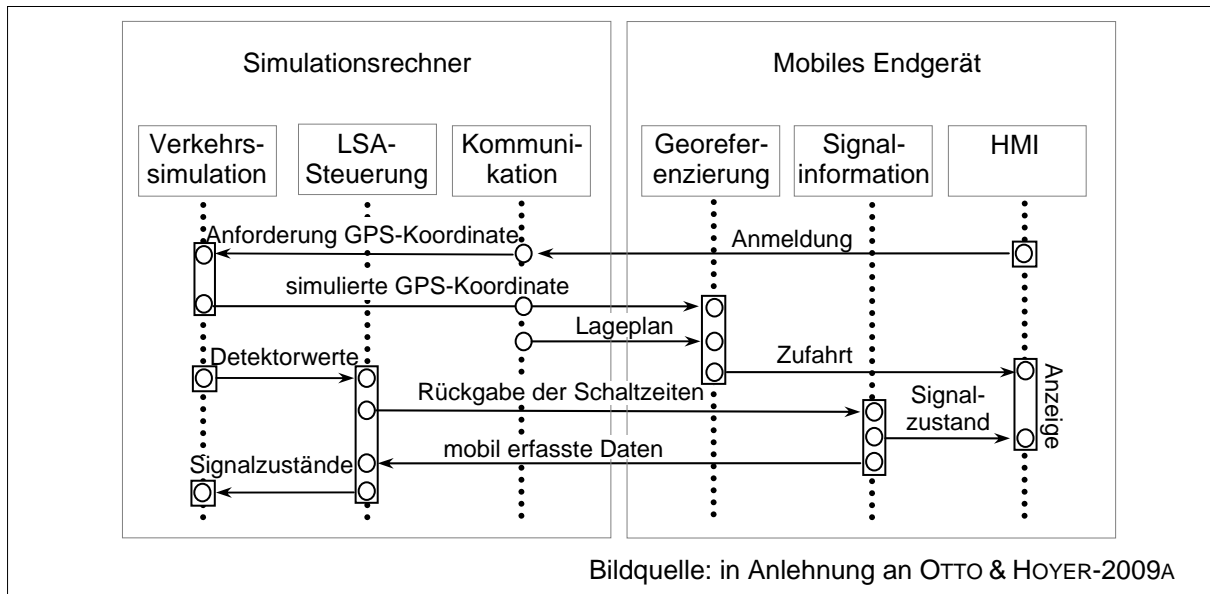


Abbildung 3-9: DiL-Testsystem – Sequenzdiagramm

Eine Erklärung der wesentlichen Kommunikationsprozesse soll mit Hilfe der schematischen Darstellung des Aufbaus der DiL-Testumgebung in Abbildung 3-10 erfolgen. Die diversen Kommunikationswege sind mit den Ziffern ① bis ⑦ gekennzeichnet. Im System werden die Verbindungen ① über Bluetooth, ② sowie ⑦ über WLAN und ③ bzw. ⑥ über LAN realisiert. ④ und ⑤ sind Kommunikationspfade innerhalb des Simulationsrechners.

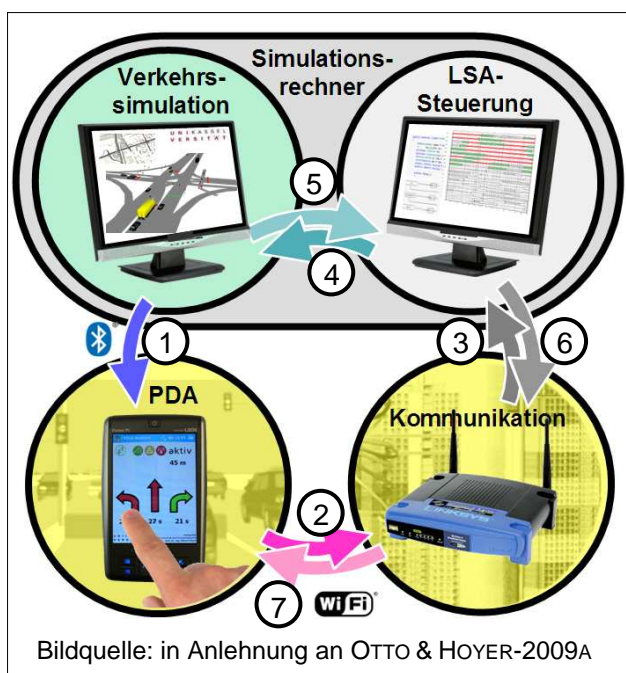


Abbildung 3-10: DiL-Testsystem – Aufbau

Im ersten Schritt meldet sich das mobile Endgerät an der Kommunikationseinheit des Simulationsrechners an ②. Über die Kommunikationseinheit wird die GPS-Koordinate eines simulierten Fahrzeugs angefordert ③. Der Simulationsrechner sendet über eine Bluetooth-Verbindung die Koordinate an das GPS-Modul des mobilen Endgeräts ① im NMEA-Standardformat. Das mobile Endgerät kann damit insbesondere wegen des mit dem Testfeld identischen Simulationsmodells nicht unterscheiden, ob es sich um eine reale oder simulierte Koordinate handelt. Des Weiteren sendet der Simulationsrechner den digitalen Lageplan und die Schaltzeiten des gesamten Knotenpunkts über ⑥ zum Kommunikationsmodul und weiter über ⑦ an das Fahrzeug. Über die simulierte Koordinate und den digitalen Lageplan georeferenziert sich das mobile Endgerät. Das HMI visualisiert die Restzeiten der entsprechenden Zufahrt bzw. die Informationen der aktuellen Lage des simulierten Fahrzeugs in der Grünen Welle. Mittels einer Kommunikationsschnittstelle zur mikroskopischen

modul und weiter über ⑦ an das Fahrzeug. Über die simulierte Koordinate und den digitalen Lageplan georeferenziert sich das mobile Endgerät. Das HMI visualisiert die Restzeiten der entsprechenden Zufahrt bzw. die Informationen der aktuellen Lage des simulierten Fahrzeugs in der Grünen Welle. Mittels einer Kommunikationsschnittstelle zur mikroskopischen

Verkehrssimulation werden zwischen der Verkehrssimulation und der eigens dafür programmierten Nachbildung der Verkehrssteuerung die Detektorwerte und Schaltzustände der LSA wechselseitig ausgetauscht. Die an die aktuelle Verkehrssituation angepasste Signalisierung wird in die Simulation eingespeist (④ und ⑤). Weiterhin findet eine Anpassung der Signalisierung über die im Endgerät mobil erfassten Verkehrskenngrößen und deren Übermittlung über ② und ③ an den Simulationsrechner statt. Damit ist der Kreislauf geschlossen und alle Anwendungen und Kommunikationswege können getestet werden.

Devices-in-the-Loop-Testsysteme ermöglichen:

- die Geräteentwicklung und den Gerätetest in einer authentischen Entwicklungsumgebung,
- die systematische Fehlersuche von logisch-funktionalen Fehlern durch reproduzierbare Simulationsszenarien,
- die Verhaltensanalyse über die gesamte Gerätekette einschließlich HMI und Fahrzeugführer,
- die Untersuchung des Realverhaltens unter Last bei mehreren konkurrierenden Geräten,
- die Analyse der Rückkopplung kooperativer Systeme auf das Verkehrsgeschehen,
- die Erprobung des Bedienkomforts und der Anwenderfreundlichkeit,
- den Tests aller Funktionalitäten und Applikationen und
- die Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit einmal aufgebauter Systeme.

Weitere Details zum DiL-Ansatz und DiL-Testsystem können HOYER ET AL.-2010 und OTTO & HOYER-2009A entnommen werden.

#### **3.5.2 Feldversuche**

Neben den vorangestellten Labortests müssen jeder Entwicklung von Soft- und Hardwarekomponenten mit Hilfe des DiL-Ansatzes auch reale Versuchsfahrten folgen. Der DiL-Testaufbau ermöglicht zwar eine Entwicklung und einen Test aller Anwendungen, Kommunikationswege, Komponenten sowie teilweise auch eine Nachbildung des realen Fehlerverhaltens, jedoch ist es nicht möglich, alle externen Fehlerquellen und möglichen Unwägbarkeiten der Realität in die Simulation zu integrieren. Bei der Entwicklung der Anwendung der Grüne Welle Information, der Restzeitanzeige und der Visualisierung anderer Verkehrsinformationen wurden nach den Versuchen in der virtuellen Testumgebung weitere Fehlerquellen bei den Feldtests aufgedeckt. Die folgenden Fehler konnten durch die Simulation nicht nachgebildet werden.

- Das GPS-Fehlerverhalten der realen Ortungskomponente im mobilen Endgerät des Fahrzeugs wurde nicht nachgeahmt. Die Fehlertoleranzen des Georeferenzierungsalgorithmus konnten erst im realen System kalibriert werden.
- An- und Abmeldevorgänge zwischen Fahrzeug und LSA wurden labortechnisch nicht untersucht. Weiterhin konnten die WLAN-Reichweiten erst bei den Feldversuchen berücksichtigt werden.
- Der Algorithmus für die Auswahl der jeweils relevanten LSA konnte erst im Testfeld geprüft werden.



Aus den genannten Arbeitsschritten ist klar ersichtlich, dass neben den DiL-Tests weitere reale Feldtests unabdingbar sind. Zwar führt der Aufbau einer virtuellen Testumgebung anfangs zu etwas mehr Aufwand, dennoch kompensiert sich dies letztlich durch die reduzierten Aufwände der realen Feldtests.

## 3.6 Zusammenfassung

Dieses Kapitel befasste sich mit den Anforderungen, dem Aufbau, den Bestandteilen Ortung und Kommunikation sowie dem Test des kooperativen Systems zur Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung.

Zunächst wurde die technische Machbarkeit einer verhältnismäßig kostengünstigen Umsetzung der telematischen Lösung nachgewiesen. Handelsübliche Endgeräte wie Mobiltelefone oder PDA sind aus technischer Sicht bezüglich der satellitengestützten Ortung, der Georeferenzierung und der Kommunikation über WLAN imstande, im kooperativen System eingesetzt zu werden. Im innerstädtischen Bereich auftretende GPS-Fehler quer zur Fahrtrichtung können über Georeferenzierungsalgorithmen ausgeglichen werden. Send- und Empfangsreichweiten genügen den für die Funktionalitäten der Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung definierten Anforderungen. Alle notwendigen informationstechnischen Rechenschritte können infolge der Verteilung der „Intelligenz“ und damit der Aufsplittung der Rechenleistungen in Echtzeit abgearbeitet werden. Somit konnten die dem Kapitel auf Seite 32 vorangestellten Hypothesen H 3-1 bis H 3-3 bestätigt werden.

Es wurde ein Einblick in die Entwicklung des Systems bis hin zur Inbetriebnahme gegeben. Hierfür ist der Devices-in-the-Loop-Ansatz, eine neuartige Methode zum Aufbau und Test von verteilten mobilen Systemen, vorgestellt worden. Die Vorteile eines mikroskopisch simulierten Verkehrsflusses werden mit der Entwicklung und dem Test der realen Kommunikationspfade zwischen den Geräten des kooperativen Systems zusammengeführt. Die Reproduzierbarkeit von Fehlerbildern in der virtuellen Testumgebung ermöglicht eine schnelle Fehlerbehebung und eine Steigerung der Effizienz im Zuge der darauf aufbauenden Feldtests. Dies wurde als Forschungshypothese H 3-4 der Untersuchung vorangestellt und konnte nachgewiesen werden. Es konnte weiter belegt werden, dass auf Versuche im realen Verkehrsumfeld nicht gänzlich verzichtet werden kann. So konnte Hypothese H 3-5 belegt werden.

Nach der Beschreibung des Systems zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung aus rein technischer Sicht sollen in den nächsten beiden Kapiteln die verkehrlichen Aspekte dieser telematischen Gesamtlösung beleuchtet und quantifiziert werden.

## 4 Kooperative Verkehrsbeeinflussung

### 4.1 Problemstellung

Grundlage einer kooperativen verkehrlichen Anwendung ist der wechselseitige Informationsaustausch zwischen den infrastrukturseitigen Einrichtungen und dem Fahrzeug. Neben der Anpassung der kooperativen Lichtsignalsteuerung an die aktuelle Verkehrsanlage über die mobil erfassten Daten kann das Fahrverhalten informierter Fahrzeugführer beeinflusst werden. So können dem Fahrer Informationen über aktuelle und prognostizierte Steuerungsentscheidungen der Lichtsignalanlage und daraus abgeleitete Restrot- bzw. Restgrünzeiten sowie variable Geschwindigkeitsempfehlungen für den voraus liegenden Streckenabschnitt bis zur stromabwärtigen LSA übermittelt werden. Die Bereitstellung all dieser Informationen als Fahrerassistenzfunktion wird in dieser Arbeit als Verkehrsbeeinflussung definiert. Die Adaption der Fahrgeschwindigkeit kann zu einer Minderung von Halten und Wartezeiten sowie zu einer Reduktion der Rückstaulänge im Straßenzug führen. Die Befolgung der Hinweise ist fakultativ. In Netzbereichen, in denen Grüne Wellen aus geometrisch-zeitlichen Randbedingungen schwierig zu konstruieren sind, können mit Hilfe dynamischer Informationen geeignete Alternativen geschaffen werden. Weiterhin sind Anwendungen wie die Übermittlung von Unfallschwerpunkten oder die Anzeige von zulässigen Höchstgeschwindigkeiten denkbar.

Ziel ist es, mit Hilfe dieser Informationen die Qualität des Verkehrsablaufs zu verbessern und infolge einer Harmonisierung des Verkehrsflusses die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Im Gegensatz zur passiven Sicherheit, die für eine Minderung der Unfallfolgen steht, kann es bei telematischen Einrichtungen zur Erhöhung der aktiven Sicherheit infolge der Vermeidung des Unfalls dank der Entschärfung eines eventuellen Konflikts kommen. Volkswirtschaftlich gesehen sind damit Maßnahmen der aktiven Sicherheit wesentlich sinnvoller als Maßnahmen der passiven Sicherheit.

#### **Forschungshypothesen:**

- |       |  |
|-------|--|
| H 4-1 | Neben der Verbesserung der Signalsteuerung mit mobil erfassten Kenngrößen ist die Beeinflussung des Fahrverhaltens eines der wirksamsten Instrumente zur Verbesserung der Qualität des innerstädtischen Verkehrsablaufs. |
| H 4-2 | Die Einsatzbereiche der Verkehrsbeeinflussung werden durch eine Vielzahl externer Faktoren bestimmt.   |
| H 4-3 | Abgesehen von der Ausstattungsrate sind die Fahrrelationen und die vom Fahrer minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlungen entscheidende Einflussfaktoren.  |
| H 4-4 | Das kooperative System entfaltet die volle Wirkung erst im Zusammenspiel zwischen der Beeinflussung des Verhaltens des Fahrers auf der einen Seite und der Anpassung der Lichtsignalsteuerung auf der anderen Seite.     |

### 4.2 Anzeige von Restzeitinformationen

Die Anzeige von Restzeitinformationen umfasst die Weitergabe der prognostizierten Restrot- bzw. Restgrünzeiten. Zusätzlich zu den genannten Sicherheitsaspekten, die umfassend in Abschnitt 2.2.1 beschrieben sind, haben Restzeitinformationen Einfluss auf die Umweltverträglichkeit des Verkehrs (CELIKCAN ET AL.-2008 bzw. CELIKCAN ET AL.-2009). Die Anzeige der Restrotzeiten gibt dem motorisierten Verkehr die Möglichkeit einer manuellen oder automatischen Motorabschaltung bzw. einer angepassten Motorregelung. Die Start-Stopp-Automatik moderner Fahrzeuge kann mit dieser Information entscheiden, ob eine Motorabschaltung zum momentanen Zeitpunkt sinnvoll ist. Dies führt zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und zur Minderung von Lärm- und Schadstoffemissionen. Für die drei relevanten Fahrtrichtungen einer Zufahrt werden die aktuellen Signalzustände und die Restzeiten übertragen. Weiterhin erfolgt eine Anzeige des Abstands zum Knotenpunkt oder auch von Sicherheitshinweisen bzw. verkehrsrechtlichen Informationen im Fahrzeug. Einen Eindruck über die Anzeige der Restzeitinformation gibt Abbildung 4-1.



Abbildung 4-1: Restzeitinformation auf mobilem Endgerät

### 4.3 Anzeige von Geschwindigkeitsinformationen

#### 4.3.1 Intention

Durch unterschiedliche Knotenpunktabstände in historisch gewachsenen Städten, wie sie in Europa großteils vorzufinden sind, stößt die alleinige Verbesserung des Verkehrsablaufs über die Anpassung der Signalsteuerung mit Hilfe statischer Grüner Wellen mit konstanter Progressionsgeschwindigkeit an ihre physikalischen Grenzen. Wegen teilweise großer Exzentrizitäten der Knotenpunkte zu den Teilpunkten ist es sowohl theoretisch als auch praktisch nicht möglich, alle Fahrtrichtungen in eine Koordinierung mit konstanter Progressionsgeschwindigkeit einzubeziehen. Einen Ausweg bietet hier die variable Anpassung der Geschwindigkeiten einzelner Fahrzeuge bzw. eines Fahrzeugpulks mittels der kooperativen Verkehrsbeeinflussung an signalisierten Knotenpunkten. Sollte die Steuerung der Lichtsignalanlage nicht mehr in der Lage sein, auf einen ankommenden Pulk frühzeitig zu reagieren, da andere Fahrzeugpuls oder der öffentliche Verkehr gerade abgefertigt werden, kann eine Information über eine zu reduzierende Fahrgeschwindigkeit zu einer späteren

Ankunft der Pulks am Knotenpunkt führen. So besteht dann für beide Konfliktströme die Möglichkeit einer sofortigen Freigabe zum Passieren des Knotenpunkts ohne Halt. Einen Eindruck über die Anzeige der Geschwindigkeitsinformation in kooperativ ausgerüsteten Streckenabschnitten soll Abbildung 4-2 geben.



Abbildung 4-2: Geschwindigkeitsinformation auf mobilem Endgerät

Über das HMI des mobilen Endgeräts werden die momentanen Restrotzeiten bzw. Restgrünzeiten des stromabwärtigen Knotenpunktes, die planerisch hinterlegte Progressionsgeschwindigkeit der Grünen Welle, die aktuell berechnete Geschwindigkeitsempfehlung sowie der Abstand zur Lichtsignalanlage visualisiert. Die wichtigste Information, nämlich die aktuelle Lage des Fahrzeugs in der Grünen Welle, bietet der dargestellte Grünbandteppich. Über ihn wird indirekt die berechnete Geschwindigkeitsempfehlung angezeigt. Die Berechnung der Position erfolgt über den momentanen Abstand zum Knotenpunkt, die momentan gefahrene Geschwindigkeit sowie über den Grünzeitbeginn und das Grünzeitende des stromabwärtigen Knotenpunkts. Befindet sich der Positionsbalken der Anzeige im grünen Bereich, erreicht das Fahrzeug die LSA bei Grün. Befindet er sich hingegen im roten Bereich, muss der Kraftfahrzeugführer seine Geschwindigkeit entsprechend anpassen. Die Art der Visualisierung wurde in Anlehnung an das Projekt „Wolfsburger Welle“ entwickelt, welches in Abschnitt 2.2.3 vorgestellt wurde. Der einzige Unterschied der hier verwendeten Anzeige besteht darin, dass der Grünteppich als Bildhintergrund das bewegte Element ist. Der Balken verbleibt in der Mitte der Anzeige.

### 4.3.2 Untersuchungsmethodik und Simulationswerkzeug

Ziel der simulativen und der empirischen Untersuchungen ist das Eruiere der unterschiedlichen externen Faktoren, welche einen Einfluss auf die Wirkung der Verkehrsbeeinflussung hinsichtlich der Qualität des Verkehrsablaufs haben. Aussagen zu benötigten Ausstattungsdaten an kooperationsfähigen Fahrzeugen und zur Qualität des Verkehrsablaufs können so getroffen sowie Einsatzgebiete und Einsatzgrenzen abgesteckt werden.

#### Simulationswerkzeug

Als Werkzeug für die simulativen Untersuchungen wird die mikroskopische Simulationsumgebung VISSIM 5.10 genutzt. Die Realisierung der kooperativen Anwendungen erfolgt über die VISSIM-COM-Schnittstelle. Die Berechnung der optimalen Fahrgeschwindigkeit

zum Erreichen der stromabwärtigen Lichtsignalanlage bei Grün wird mittels eines eigens hierfür entwickelten Softwaremoduls realisiert. Sie wird in die mikroskopische Simulation als Wunschgeschwindigkeit eingespeist. Mit den im Simulationsmodell gegebenen Beschleunigungsgrenzwerten kann so ein realitätsnahes Fahrverhalten abgebildet werden. In Abbildung 4-3 werden die wesentlichen Schritte zur Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung als Sequenzdiagramm aufgezeigt.

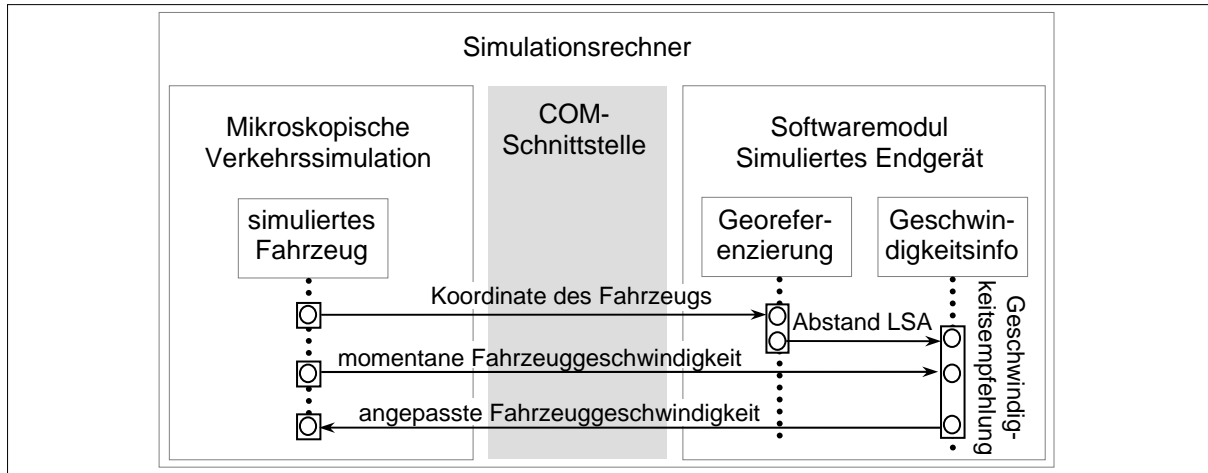


Abbildung 4-3: Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung – Sequenzdiagramm

Voraussetzung der Geschwindigkeitsinformation ist die Berechnung der individuellen Geschwindigkeitsempfehlungen. Es lassen sich zwei verschiedene Methoden unterscheiden. Diese variieren vor allem in der Komplexität der Berechnung. Sie gelten beide für Zufahrten, in denen der Auslastungsgrad der Freigabezeit kleiner als 85 % ist und demzufolge die Einsatzbedingungen der Grünen Welle erfüllt sind.

### Berechnungsmethode 1 der Geschwindigkeitsempfehlung

Die einzelnen Berechnungsschritte zur Ermittlung der Geschwindigkeitsempfehlung nach Methode 1 sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Schritt 1: In diesem Schritt erfolgt die Berechnung des räumlichen Abstandes des Fahrzeugs zur Position der stromabwärtigen Haltlinie  $x_{HI}^*$  über die fahrzeugseitig ermittelte Position  $x_{Fz}^*$ . Zur Berücksichtigung des mobil erfassten Rückstaus  $x_{FCD,STAU}$  in der Zufahrt wird die aktuelle Rückstaulänge, d. h. die Position an der letztmalig ein ausgestattetes Fahrzeug stoppte, von der ermittelten Entfernung abgezogen. Der Rückstau wird unter Beachtung bestimmter Parameter statisch in der Simulation berücksichtigt. Die Parameter werden später erläutert und in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Die Positionen im Streckenabschnitt beziehen sich auf die Datenbasis der digitalen Karte und werden im Normalfall ab der Position der Haltlinie berechnet.

$$x_{LSA} = x_{Fz}^* - x_{HI}^* - x_{FCD,STAU} \quad (4-1)$$

$x_{FCD,STAU}$	mobil ermittelte Rückstaulänge des aktuell letzten gestauten Fahrzeugs
$x_{LSA}$	Fahrstrecke des Fahrzeugs bis Haltlinie oder Rückstau
$x_{Fz}^*$	Position des Fahrzeugs
$x_{HI}^*$	Position der Haltlinie

Der Berechnungswegpunkt der Geschwindigkeitsempfehlung ist so immer die Fahrzeugposition hinter dem letzten aktuell gestauten Fahrzeug. Auf diesen Punkt wird die verbleibende Entfernung  $x_{LSA}$  aus Sicht der aktuellen Fahrzeugposition berechnet.

Schritt 2: Es erfolgt die Berechnung der Fahrzeit bis zur Haltlinie bzw. bis zum Rückstau mit der momentan gefahrenen Geschwindigkeit  $v_{Fz}$ . Die Berücksichtigung des Rückstaus erfolgt über die benötigte Zeit für den Abfluss der im Staubereich befindlichen Fahrzeuge  $t_{ab,STAU}$  addiert mit der zeitlichen Dauer zum Auffahren des Fahrzeugs auf den Rückstau. Dies ergibt die durch Geschwindigkeitsreduktion auszugleichende Zeitdauer bis zum Erreichen der LSA bzw. des Rückstaus  $t_{LSA}$ .

$$t_{LSA} = \frac{x_{LSA}}{v_{Fz}} + t_{ab,STAU} \quad (4-2)$$

$$\text{mit } t_{ab,STAU} = \frac{x_{FCD,STAU}}{\Delta x_{Fz}} \cdot \tau_B \quad (4-3)$$

$t_{ab,STAU}$	Zeitbedarf zum Abbau der gestauten Fahrzeuge
$t_{LSA}$	Auszugleichende Zeitdauer bis zum Erreichen der LSA bzw. des Rückstaus
$v_{Fz}$	Geschwindigkeit des Fahrzeugs
$\tau_B$	Zeitbedarfswert
$\Delta x_{Fz}$	Bruttoweglücke zwischen den Fahrzeugen

Die benötigte Zeit zur Auflösung des Rückstaus  $t_{ab,STAU}$  setzt sich aus der Anzahl der gestauten Fahrzeuge multipliziert mit dem Zeitbedarfswert  $\tau_B$  zusammen. Die Anzahl der gestauten Fahrzeuge wird aus der Staulänge  $x_{FCD,STAU}$  dividiert durch die Bruttoweglücke  $\Delta x_{Fz}$  zwischen den Fahrzeugen ermittelt.

Schritt 3: In diesem Schritt wird die Umlaufsekunde  $t_{U,an}^*$  zu der das Fahrzeug mit momentan gefahrener Geschwindigkeit  $v_{Fz}$  an der Lichtsignalanlage eintrifft, ausgehend von der aktuellen Umlaufsekunde  $t_{U,akt}^*$  bezogen auf die Umlaufzeit  $t_U$  ermittelt.

$$t_{U,an}^* = (t_{U,akt}^* + t_{LSA}) \bmod t_U \quad (4-4)$$

$t_U$	LSA: Umlaufzeit
$t_{U,akt}^*$	LSA: aktuelle Umlaufsekunde der LSA
$t_{U,an}^*$	LSA: Umlaufsekunde der LSA bei Ankunft des Fahrzeugs

Schritt 4: Die für den Zeitpunkt der errechneten Fahrzeugankunft geltende Restrotzeit  $t_{ROT}$  bzw. Restgrünzeit  $t_{GRÜN}$  wird mit Hilfe der Umlaufsekunde der LSA bei Ankunft des Fahrzeugs  $t_{U,an}^*$ , des Freigabezeitbeginns  $t_{F,beg}^*$  und des Freigabezeitendes  $t_{F,ende}^*$  bestimmt.

– Fall 1: Anlage ist zur Ankunft des Fahrzeugs Rot → Ermittlung Restrotzeit

$$t_{U,an}^* \notin [t_{F,beg}^*; t_{F,ende}^*] \bmod t_U \rightarrow t_{ROT} = (t_{F,beg}^* - t_{U,an}^*) \bmod t_U \quad (4-5)$$

$t_{ROT}$	LSA: Restrotzeit bei Ankunft des Fahrzeugs
$t_{F,beg}^*$	LSA: Freigabezeitbeginn
$t_{F,ende}^*$	LSA: Freigabezeitende

- Fall 2: Anlage ist zur Ankunft des Fahrzeugs Grün → Ermittlung Restgrünzeit

$$t_{U,an}^* \in [t_{F,beg}^*; t_{F,ende}^*] \bmod t_U \rightarrow t_{GRÜN} = (t_{F,ende}^* - t_{U,an}^*) \bmod t_U \quad (4-6)$$

$t_{GRÜN}$  LSA: Restgrünzeit bei Ankunft des Fahrzeugs

Sowohl in der Restrotzeit als auch in der Restgrünzeit ist der Zeitbedarf zum Abbau des Rückstaus in der Zufahrt berücksichtigt. Im Fall, dass zusätzliche Grünzeiten vor Ankunft der Fahrzeuge realisiert werden sollen, damit diese nicht auf einen Rot zeigenden Signalgeber zufahren und dieser erst bei Ankunft des Fahrzeugs auf Grün wechselt, müssen diese in Gleichung (4-5) individuell definiert und berücksichtigt werden. Ebenfalls ist eine Berücksichtigung dieser Werte als räumlicher Abstand mittels Gleichung (4-1) möglich. In der vorliegenden Simulationsuntersuchung erfolgt dies über eine Reduzierung der Fahrstrecke um 5 m. Die Einzelwerte sind in Tabelle 4-1 ersichtlich.

Schritt 4: Zur Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung über Methode 1 werden zwei Fälle unterschieden:

- Fall 1: Zur Ankunft des Fahrzeugs mit der momentan gefahrenen Geschwindigkeit zeigt die Lichtsignalanlage Grün und der Rückstau vor dem Signalgeber ist komplett abgebaut. In diesem Fall entspricht die Geschwindigkeitsempfehlung  $v_{Empf}$  der aktuellen Fahrzeugschwindigkeit  $v_{Fz}$ .

$$v_{Empf} = v_{Fz} \quad (4-7)$$

$v_{Empf}$  ermittelte Geschwindigkeitsempfehlung

- Fall 2: Zur Ankunft des Fahrzeugs an der LSA mit momentaner Fahrgeschwindigkeit zeigt diese Rot bzw. der Rückstau vor dem Signalgeber ist nicht komplett abgebaut. In diesem Fall wird die Geschwindigkeitsempfehlung über die ermittelte Wegstrecke  $x_{LSA}$  aus Schritt 1 durch die verbleibende Rotzeit  $t_{ROT}$  abzüglich der auszugleichenden Zeitdauer bis zum Erreichen der LSA bzw. des Rückstaus  $t_{LSA}$  aus Schritt 2 dividiert.

$$v_{Empf} = \frac{x_{LSA}}{t_{ROT} - t_{LSA}} \quad (4-8)$$

In beiden genannten Fällen ist die berechnete Geschwindigkeitsempfehlung kleiner als die zulässige Höchstgeschwindigkeit.

Die Auswirkungen der Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung über Methode 1 auf den Verkehrsablauf soll mit Hilfe einer schematische Darstellung von vereinfachten Fahrlinien der Fahrzeuge im Weg-Zeit-Diagramm in Abbildung 4-4 aufgezeigt werden. Alle schwarz und durchgehend dargestellten Trajektorien kennzeichnen die unbeeinflusste Fahrt mit freier Geschwindigkeit. In diesem speziellen Fall entspricht die Neigung der Fahrlinie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Alle Fahrzeuge dieses Beispiels sind kooperationsfähig ausgestattet. Einzig Fahrzeug ② wird über eine Geschwindigkeitsempfehlung beeinflusst, da für die Berechnung der Fahrzeugankünfte über Methode 1 nur der momentane Rückstau in der Berechnung berücksichtigt ist. Es werden keine Prognosen weiterer Fahrzeugankünfte vorgenommen. Die Fahrzeuge ③ bis ⑤ können mit der momentanen Geschwindigkeit den Knotenpunkt theoretisch ohne Halt passieren. Fahrzeug ③ wird jedoch praktisch auf das

langsamere beeinflusste Fahrzeug ② auffahren und die aktuelle Fahrgeschwindigkeit an dessen Geschwindigkeit anpassen. Selbige Interaktion findet in der Praxis zwischen Fahrzeug ④ und ③ statt. Lediglich Fahrzeug ⑤ kann die Zufahrt des Knotenpunkts auch praktisch unbeeinflusst durchfahren.

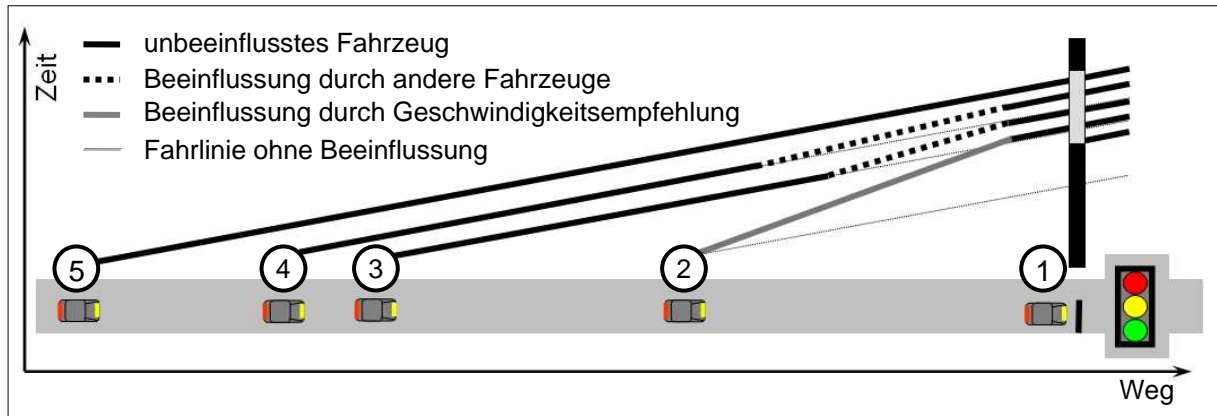


Abbildung 4-4: Fahrlinien der Berechnungsmethode 1

Heutige Verfahren und Methoden kooperativer Anwendungen bieten die Möglichkeit, einen Rückstau an der stromabwärtigen Lichtsignalanlage zu berücksichtigen. PRIEMER & FRIEDRICH-2008 stellen eine kooperative Anwendung zur Schätzung der Warteschlange im Staubereich vor. Hierfür muss pro Umlauf lediglich ein ausgestattetes Fahrzeug die Lichtsignalanlage passieren. Für dieses Verfahren werden eine möglichst genaue Ortung des Fahrzeugs und eine Kommunikationsreichweite von 200 m vorausgesetzt. Ein solches Prognoseverfahren kann die Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung weiter präzisieren. Die Berücksichtigung von z. B. Fahrzeug ① ist durch ein solches Verfahren auch ohne stationäre Erfassungseinrichtungen möglich.

### Berechnungsmethode 2 der Geschwindigkeitsempfehlung

Aus Gründen der Vollständigkeit soll eine zweite Methode zur Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung diskutiert werden. Diese ist etwas komplizierter und findet daher in dieser Arbeit keine Anwendung. Es findet eine zusätzliche Berücksichtigung aller stromabwärtigen Fahrzeuge zwischen dem momentan betrachteten ausgestatteten Fahrzeug und der Haltlinie statt. Bei der Ermittlung der Geschwindigkeitsempfehlung werden somit nicht nur gestaute Fahrzeuge, sondern auch im Streckenabschnitt fahrende Fahrzeuge berücksichtigt. Über ein Prognosemodell erfolgt die Vorhersage der Ankünfte der Fahrzeuge und somit eine spezifizierte Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung mit Hilfe der aktuellen zeitlichen Ankunft und Position des Fahrzeugs innerhalb der Freigabezeit.

Die Fahrlinien der Methode 2 werden vereinfacht in Abbildung 4-5 dargestellt. Bei der Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung mit Prognose der Fahrzeugankünfte aller Fahrzeuge fährt lediglich Fahrzeug ⑤ ohne Geschwindigkeitsbeeinflussung. Die Fahrzeuge ② bis ④ erhalten eine angepasste individuelle Geschwindigkeitsempfehlung bezogen auf ihre zeitliche Lage in der kommenden Grünzeit und ihrer räumliche Lage zwischen der aktuellen Fahrzeugposition und dem letzten tatsächlich gestauten bzw. prognostiziert gestauten Fahrzeug. Wenn alle Fahrzeuge die über diese Berechnungsmethode ermittelten



Geschwindigkeitsempfehlung befolgen, findet innerhalb des Streckenabschnittes theoretisch keine Interaktion zwischen den Fahrzeugen statt.

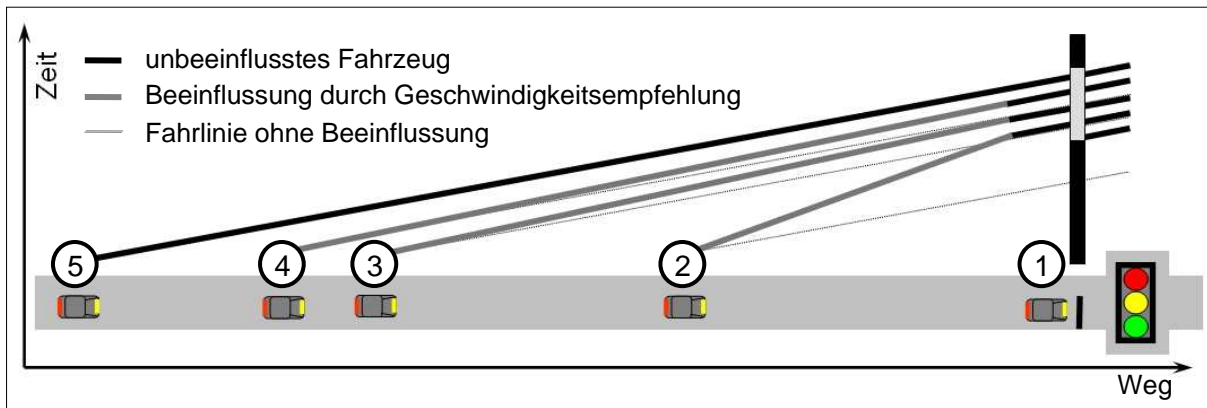


Abbildung 4-5: Fahrlinien der Berechnungsmethode 2

### Gegenüberstellung Berechnungsmethode 1 und 2

Sowohl Methode 1 als auch Methode 2 ermöglichen die sukzessive Verdichtung des Fahrzeugkollektives innerhalb des Streckenabschnitts mittels Beeinflussung des Fahrverhaltens. Ein Aufstauen der Fahrzeuge zu Pulks vor der Haltlinie mit notwendigen Halten der Fahrzeuge ist nicht erforderlich. Weiterhin kann dem allmählichen Auseinanderfallen der Fahrzeugspulks über längere Streckenabschnitte oder infolge einer Ausdünnung durch abbiegende Fahrzeuge entgegen gewirkt werden. Im realen Verkehrsumfeld ist es bei nicht vorhandener Vollausrüstung nahezu unmöglich, eine sichere Prognose der Fahrzeugpositionen im Verkehrsstrom, wie sie für Methode 2 erforderlich ist, zu erstellen. Alle weiteren Überlegungen konzentrieren sich deswegen auf Methode 1.

Der Verlauf der Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an die Geschwindigkeitsempfehlung ist ein kontinuierlicher Prozess. Dies hat Auswirkungen auf das Geschwindigkeitsprofil und die Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung. Es ergeben sich typische Muster des Verlaufs der Geschwindigkeits-Weg-Linie der berechneten Geschwindigkeitsempfehlung und der momentanen Fahrgeschwindigkeit. Abbildung 4-6 zeigt ein einfaches Beispiel.

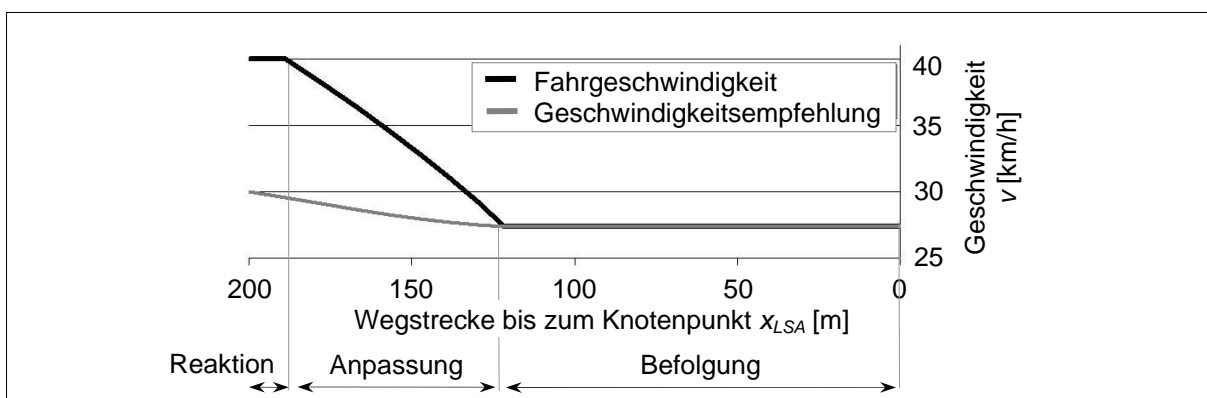


Abbildung 4-6: Anpassung Fahrgeschwindigkeit an die Geschwindigkeitsempfehlung

In diesem Beispiel wird eine Reaktionszeit von einer Sekunde unterstellt, in der sich das Fahrzeug gleichförmig mit der aktuellen Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h bewegt. Diese Geschwindigkeit entspricht in etwa der Fahrgeschwindigkeit nach Passieren eines

Knotenpunktes. Eine Geschwindigkeitsempfehlung bekommt der Fahrzeugfahrer erst nach Passieren des Knotenpunkts übermittelt. Dies vermeidet eine künstliche Erhöhung der Räumzeiten im Knotenpunkt, was einen maßgeblichen Einfluss auf die nach den RiLSA-2010 berechneten Zwischenzeiten hätte. Neben dem Kapazitätsaspekt sind hier somit auch Belange der Sicherheit zu beachten. Die Restrotzeit beim Erreichen der LSA im Beispiel beträgt 24 s. Sie kann im Diagramm nicht abgebildet werden. Es ist eine Wegstrecke von 200 m bis zur Haltlinie zu durchfahren. Die hieraus ermittelte Geschwindigkeitsempfehlung ergibt 30 km/h. Die Verzögerung des Fahrzeugs wird mit  $-0,50 \text{ m/s}^2$  angesetzt. Deutlich zu erkennen ist, dass das Fahrzeug im Beispiel ca. 75 m benötigt, um die eigene Fahrgeschwindigkeit (schwarze Linie) an die Geschwindigkeitsempfehlung (graue Linie) anzupassen. Während des gesamten Zeitintervalls vermindert sich die permanent neu berechnete Geschwindigkeitsempfehlung kontinuierlich. Nach vollständiger Anpassung betragen beide Geschwindigkeiten 27 km/h. Die Geschwindigkeitsempfehlung hat sich so im Verlauf des Abgleichs um 3 km/h reduziert.

In der Simulationsuntersuchung erfolgt die Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit unter mehreren Gesichtspunkten. Ein notwendiger Aspekt der Variation ist die Geschwindigkeitsgrenze, unter der die Geschwindigkeitsempfehlung durch den Fahrer nicht mehr akzeptiert wird. Diese Akzeptanzschwelle wird im Weiteren als minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung bezeichnet.

### **Simulationsmodell und Simulationsszenarien**

Grundlage der Simulationsuntersuchungen bilden die Netzmodelle dreier real existierender Streckenzüge. Die Untersuchungsstrecken weisen sehr verschiedene Charakteristiken auf. So kann sichergestellt werden, dass die gewonnenen Ergebnisse weitgehend repräsentativ sind und somit nicht nur für einen bestimmten Streckentyp Gültigkeit besitzen. Die Nachweise der Signifikanzen der ermittelten funktionalen Zusammenhänge werden im „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ geführt. Die Lagepläne der Untersuchungsstrecken sowie die Anzahl und die Abstände der Knotenpunkte, die Anzahl der durchgehenden Fahrstreifen je Richtung, die Umlaufzeiten und die Verkehrsbelastungen während der Simulation können ebenfalls diesem Anhang im Unterpunkt „Lagepläne der Untersuchungsstrecken“ entnommen werden. Sämtliche Verkehrsbelastungen sind so gewählt, dass eine Grüne Welle theoretisch funktioniert. Die Auslastungsgrade der Freigabezeiten liegen unter 85 %. Zur Untersuchung werden die vor Ort tatsächlich bestehenden Festzeitprogramme genutzt, welche eine vom Verkehrsingenieur geplante Koordinierung der Hauptrichtung realisieren.

Einer der größten Einflussfaktoren ist die Ausstattungsrate kooperationsfähiger Fahrzeuge. Nur über Variation der Ausstattungsrate lässt sich ein belastbares Bild bezüglich der verkehrlichen Wirksamkeit des Systems während der Einführungsphase der Technologie gewinnen. Abhängig von den Ausstattungsraten und den minimal akzeptierten Geschwindigkeiten wird in der Simulationsuntersuchung ein durch Pre-Tests ermittelter maximaler Rückstau, der sich mit 85-prozentiger Wahrscheinlichkeit vor der Lichtsignalanlage einstellt, statisch berücksichtigt. Dieser wird bei steigenden Ausstattungsraten und geringeren akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlungen kürzer, da mehr Fahrzeuge durch Interaktionen untereinander indirekt oder durch Geschwindigkeitsempfehlungen direkt

beeinflusst werden. Diese direkt oder indirekt beeinflussten Fahrzeugführer kommen schließlich nicht am Knotenpunkt zum Stehen. Die verwendeten Parametersätze sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Zusammenfassung der Simulationsparameter für die Verkehrsbeeinflussung

Ausstattungsrate [%]	Szenario 1		Szenario 2		Szenario 3	
	Minimal akzeptierte Geschwindigkeit [km/h]	max. Rückstau [m]	Minimal akzeptierte Geschwindigkeit [km/h]	max. Rückstau [m]	Minimal akzeptierte Geschwindigkeit [km/h]	max. Rückstau [m]
000	alle	30	$\geq 20$	40	$\geq 30$	45
012	alle	30	$\geq 20$	40	$\geq 30$	45
025	alle	25	$\geq 20$	35	$\geq 30$	40
037	alle	25	$\geq 20$	35	$\geq 30$	40
050	alle	20	$\geq 20$	30	$\geq 30$	35
075	alle	10	$\geq 20$	20	$\geq 30$	25
100	alle	5	$\geq 20$	15	$\geq 30$	20

Bezüglich der minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung werden drei Szenarien definiert:

Szenario 1: Fahrer beachten alle Geschwindigkeitsempfehlungen,

Szenario 2: Fahrer beachten lediglich Geschwindigkeitsempfehlungen über 20 km/h und

Szenario 3: Fahrer beachten lediglich Geschwindigkeitsempfehlungen über 30 km/h.

Die Simulationsdauer beträgt je Simulationslauf und Untersuchungsstrecke 4.000 Sekunden, wobei allein 400 Sekunden zum Befüllen der Netze genutzt werden und nicht in die Auswertung eingehen. Die drei Szenarien werden auf den drei Strecken mit zehn unterschiedlichen Startzufallszahlen geprüft. Es werden sieben Ausstattungsraten von 0 %, 12 %, 25 %, 37 %, 50 %, 75 % und 100 % unterstellt. In Summe wurden so 630 Einzelsimulationen durchgeführt. Weitere Simulationsläufe wurden zur Untersuchung spezieller Einflussfaktoren getätigt.

Die für die Erhebung relevanten Verkehrskenngrößen werden durch die in VISSIM verfügbaren Auswertefunktionalitäten ermittelt. Über Stauzähler werden die Anzahl der Halte sowie die Rückstaulänge in der Zufahrt erfasst. Ein Halt wird protokolliert, wenn ein Fahrzeug, welches sich im Staubereich befindet, tatsächlich zum Stehen kommt. Die mittlere Staulänge ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel über ein Zeitintervall von 3.600 Sekunden aller ermittelter durchschnittlicher Einzelstaulängen. Über mindestens zwei Messquerschnitte werden die Reise- und Wartezeiten im Streckenabschnitt ermittelt. Die erhobenen Einzelreisezeiten werden über das Aggregationsintervall von 3.600 Sekunden gemittelt. Die Auswertung der Wartezeit erfolgt über die bei der Verlustzeitmessung gemittelten Standzeiten der Fahrzeuge im Zeitintervall. Die erfassten verkehrlichen Kenngrößen werden den jeweiligen Ausstattungsraten der Fahrzeugflotten gegenüber gestellt.

### Untersuchung mittels Messfahrten

Als weitere Untersuchungsmethode werden neben der mikroskopischen Simulation des Verkehrsablaufs auch Test- und Erhebungsfahrten im realen Verkehrsablauf genutzt. Ziel

der Messfahrten war es, die in der Simulation ermittelten und bewerteten theoretischen Ergebnisse über Daten realer Messfahrten zu belegen. Die Untersuchungsstrecke 1 diente den simulativen Untersuchungen und auch den realen Messfahrten (siehe „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“). Für den Nachweis der untersuchten Sachverhalte wurde die Untersuchungsstrecke 1 durch ausgestattete Fahrzeuge durchfahren. Aus wirtschaftlichen Gründen war die Fahrzeugflotte auf drei ausgestattete Fahrzeuge beschränkt. Infolge der geringen Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge konnten die verkehrlichen Effekte großer Ausstattungsraten im Verkehrsstrom nicht untersucht werden. Aussagen waren so nur für einzelne im Netz befindliche Fahrzeuge möglich. Abbildung 4-7 zeigt die Untersuchungsstrecke inklusive der nummerierten signalisierten Knotenpunkte im linken Teil der Abbildung sowie die vier gefahrenen Testrouten im rechten Teil.

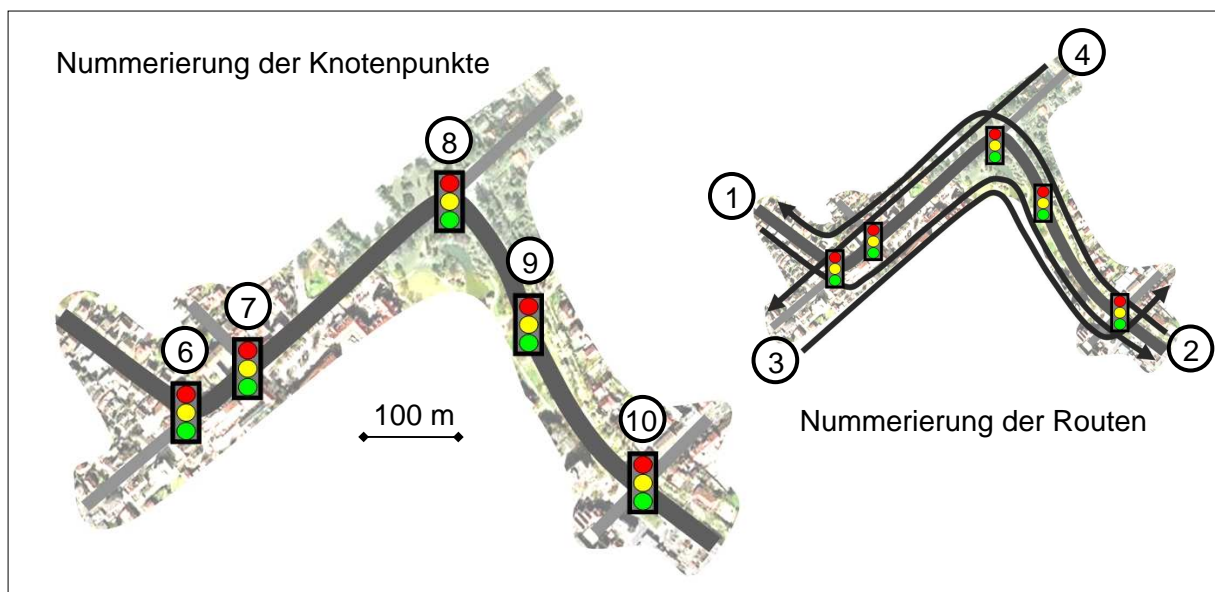


Abbildung 4-7: Testrouten der Messfahrten auf Strecke 1

Alle Fahrtverläufe wurden durchgängig sekundlich protokolliert. Zudem fanden Testfahrten mit ausgestatteten Fahrzeugen und parallele Referenzfahrten von nicht ausgestatteten Fahrzeugen statt. Dadurch konnte eine Mit/Ohne-Gegenüberstellung vorgenommen werden.

### 4.3.3 Einflussfaktoren auf die verkehrliche Wirksamkeit

Die Einflussfaktoren, welche die verkehrliche Wirksamkeit der kooperativen Verkehrsbeeinflussung maßgeblich bestimmen, werden mit Hilfe der Simulationsuntersuchung nachgewiesen. Diese Einflussfaktoren sind:

1. Ausstattungsrate,
2. Koordinierungsmaß der bestehenden Steuerung im Streckenabschnitt,
3. Anzahl der durchgehenden Richtungsfahrstreifen,
4. minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung,
5. Fahrrelation der Fahrzeuge im Streckenabschnitt,
6. Prozess der Pulkbildung und
7. Reisezeit.

### Einflussfaktor 1: Ausstattungsrate

Die Kenntnis notwendiger Mindestausstattungsrate an kooperationsfähigen Fahrzeugen und die damit erzielte verkehrliche Wirksamkeit sind maßgeblicher Gegenstand der Nutzenbewertung solcher Systeme. Abbildung 4-8 soll den Zusammenhang zwischen der Ausstattungsrate und der Wirkung der Verkehrsbeeinflussung beispielhaft verdeutlichen. Alle grau eingefärbten Fahrzeuge sind kooperationsfähig ausgestattet und nähern sich dem signalisierten Knotenpunkt mit der berechneten Geschwindigkeitsempfehlung. Alle weiß dargestellten Fahrzeuge erhalten keine Informationen.

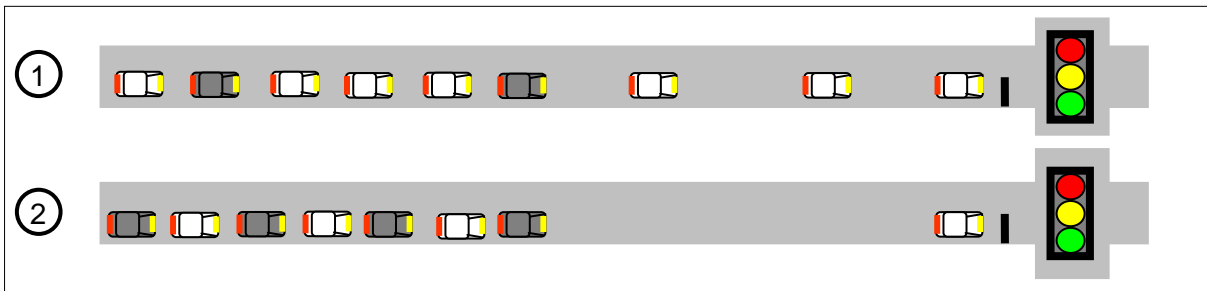


Abbildung 4-8: Verkehrsbeeinflussung unter verschiedenen Ausstattungsrate

Im Beispielfall ① der Abbildung 4-8 beträgt die Ausstattungsrate 25 %. Bei angenommener Gleichverteilung ist jedes vierte Fahrzeug ausgestattet. Klar ersichtlich ist, dass das erste ausgestattete Fahrzeug alle weiteren Fahrzeuge mit beeinflusst, da diese bei einstreifigen Richtungsfahrbahnen nicht überholen können. Beispielfall ② zeigt eine Ausstattungsrate von 50 %. Im Mittel ist jedes zweite Fahrzeug ausgestattet. In diesem Fall nähert sich ein Fahrzeug dem Knotenpunkt unbeeinflusst. Alle anderen befolgen die individuell ermittelte Geschwindigkeitsempfehlung. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass ein funktionaler Zusammenhang zwischen den verkehrlichen Kenngrößen Anzahl der Halte, Rückstaulänge bzw. Wartezeit und der Ausstattungsrate bestehen muss. Dieser Zusammenhang wird im weiteren Verlauf des Unterkapitels nachgewiesen.

### Einflussfaktor 2: Koordinierungsgrad

Der Koordinierungsgrad gibt die Güte der im Streckenabschnitt bestehenden Koordination an. Grundlagen hierfür können dem Abschnitt 2.3.3 entnommen werden. Bei einer guten oder sehr guten konventionellen Koordination der Lichtsignalanlagen zeigt eine zusätzliche Verkehrsbeeinflussung kaum Wirkung. Hier entspricht die zulässige Höchstgeschwindigkeit der Progressionsgeschwindigkeit der Grünen Welle. In diesem Fall ist die Krümmung der Funktionsgleichung des regressiven Zusammenhangs zwischen den verkehrlichen Kenngrößen und der Ausstattungsrate relativ gering. Diagramm ① in Abbildung 4-9 zeigt diesen Zusammenhang qualitativ und vereinfacht auf alle verkehrlichen Kenngrößen.

Die Verkehrsbeeinflussung entfaltet demzufolge ihre größten Potenziale in Bereichen, in denen es aus topographischer Sicht bzw. aus anderen Gründen schwierig ist, eine Grüne Welle mit konstanter Progressionsgeschwindigkeit zu konstruieren. Die Differenz zwischen der Fahrzeit und der Versatzzeit sollte dennoch gering sein, da dann die notwendige Geschwindigkeitsänderung zum Befolgen der Empfehlung entsprechend klein ist.

Abbildung 4-9 zeigt ein Beispiel mit sehr großer verkehrlicher Wirkung der Beeinflussung des Fahrverhaltens im Diagramm ②.

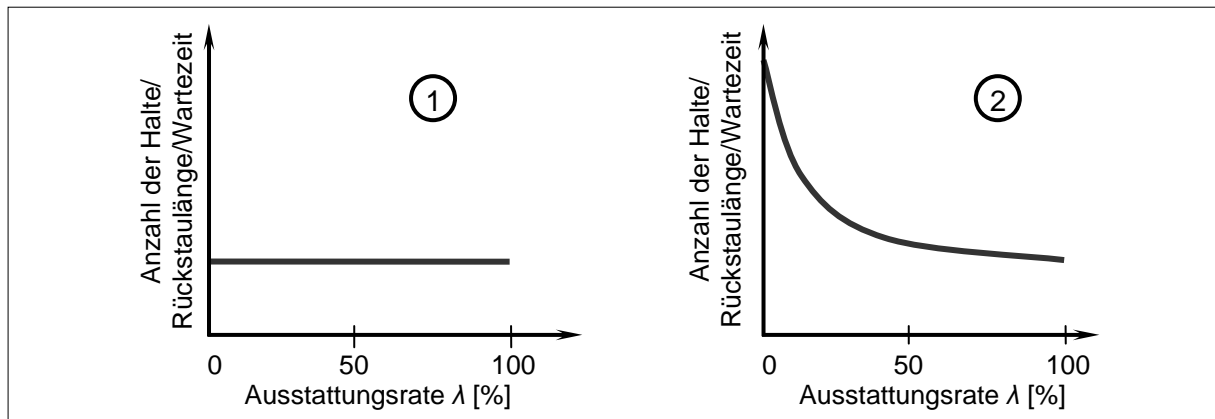


Abbildung 4-9: Einflussfaktor Koordinierungsgrad – qualitativ

Im „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ in der Rubrik „Auswertung der Simulationsstrecken“ sind alle Ergebnisse der Simulationsläufe in Diagrammform dargestellt. Deutlich zu erkennen ist dabei, dass Zufahrten der jeweils ersten Knotenpunkte der Grünen Welle Strecke, sehr steile Kurven und damit große Effekte aufweisen. Die großen Wirkungen an den ersten Knoten lassen sich durch den von VISSIM unterstellten Zufluss der Fahrzeuge gemäß einer Poisonverteilung und nahezu vollständiger Befolgung aller Geschwindigkeitsempfehlungen, wie sie im Szenario 1 beschrieben sind, begründen. Durch die zufälligen Ankünfte kommt es bei geringen Ausstattungsraten zwangsläufig zu Halten. Bei größeren Ausstattungsraten kommt es schnell zur Bildung von Fahrzeugspulks, da nicht ausgestattete Fahrzeuge auf beeinflusste Fahrzeuge auffahren. Dadurch wird eine Reduzierung der Anzahl der Halte, Wartezeiten und Rückstaulängen erzielt. Gut koordinierte Streckenabschnitte zeigen hingegen geringe bis keine Effekte hinsichtlich der verkehrlichen Wirksamkeit der Verkehrsbeeinflussung. Infolge der statischen Grünen Welle im Streckenzug kommen auch die nicht ausgestatteten Fahrzeuge kaum zum Halten.

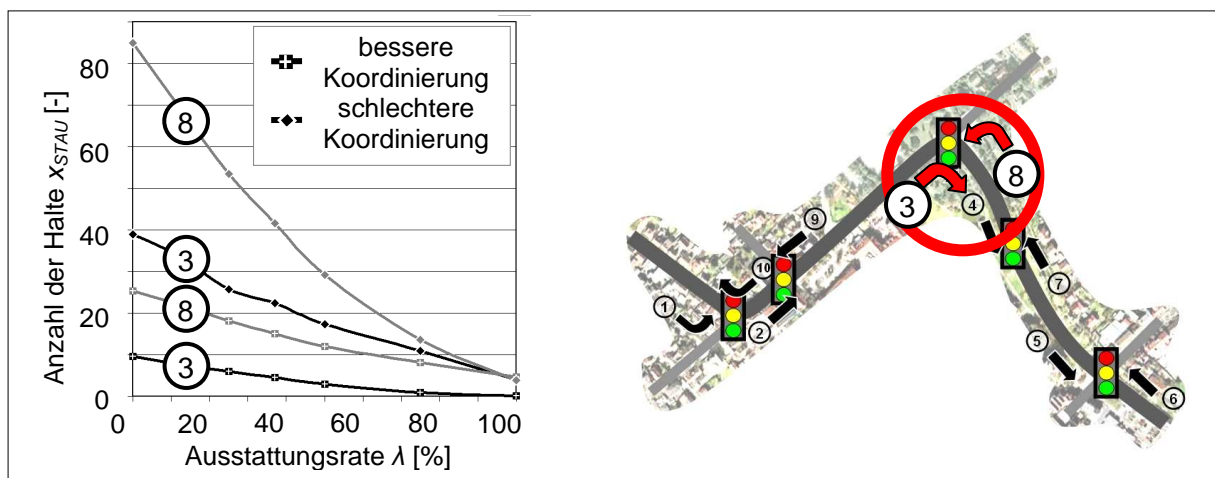


Abbildung 4-10: Einflussfaktor Koordinierungsgrad – quantitativ

Um den Einfluss der Güte der Koordination zu bestimmen, wurden zusätzlich weitere Untersuchungen an künstlich verschlechterten bzw. gebrochenen Koordinierungen durchgeführt, welche in der Praxis aus einer schlechten Planung oder aus ungünstigen

Knotenpunktabständen resultieren könnten. Im Fall der besseren Koordinierung konnte die Strecke über eine statische Grüne Welle mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h durchfahren werden, und lediglich einbiegende Fahrzeuge kamen zum Stehen. Im künstlich verschlechterten Fall wurden die Freigabezeiten des Grünbands am Knotenpunkt 8 so verändert, dass eine Teilstrecke des Straßenzugs mit 30 km/h befahren werden sollte, um den stromabwärtigen Knotenpunkt bei Grün zu erreichen. Der genannte Knotenpunkt ist in Abbildung 4-10 rot markiert. Weiterhin zeigt das in Abbildung 4-10 dargestellte Diagramm beispielhaft eine Gegenüberstellung der Kenngrößen Anzahl der Halte und Ausstattungsrate hinsichtlich der beschriebenen Thematik zwischen einer besseren und einer eher schlechten Koordinierung im Streckenabschnitt. Aus der Krümmung der Funktion ist klar ersichtlich, dass die Potenziale der Verbesserung bei einer schlecht koordinierten Strecke wesentlich höher sind. Sollte es planerisch nicht möglich sein, die Qualität des Verkehrsablaufs mit Hilfe der kooperativen *Verkehrssteuerung* zu verbessern, können die Potenziale mittels der kooperativen *Verkehrsbeeinflussung* erschlossen werden.

### Einflussfaktor 3: Anzahl der durchgehenden Richtungsfahrstreifen

Auch die Anzahl der durchgehenden Fahrstreifen beeinflusst die Neigung und Krümmung der Funktion des Zusammenhangs zwischen Ausstattungsrate und den untersuchten Verkehrskenngrößen. Eine Gegenüberstellung von einem einstreifigen Richtungsquerschnitt ① und einem zweistreifigen Richtungsquerschnitt ② wird in den Diagrammen der Abbildung 4-11 qualitativ veranschaulicht.

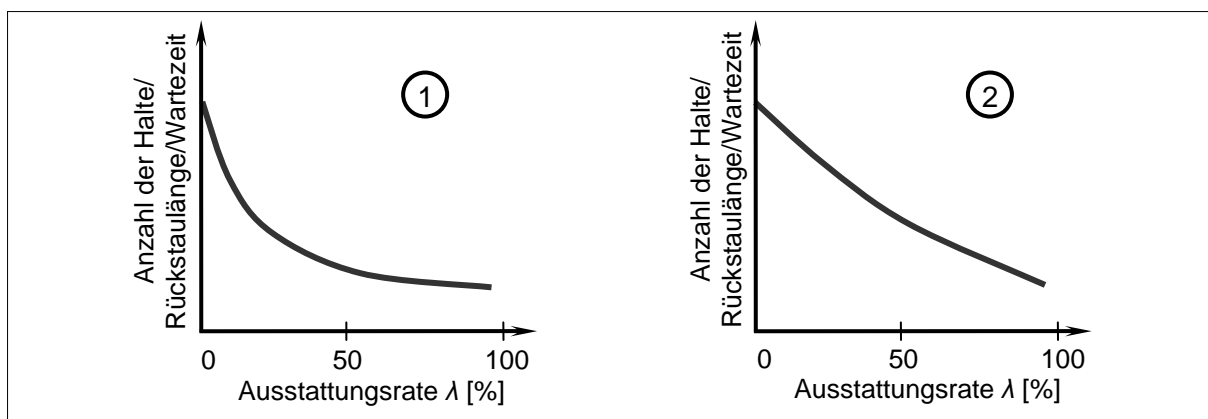


Abbildung 4-11: Einflussfaktor Anzahl der Fahrstreifen – qualitativ

Erkennbar ist, dass sich eine stark gekrümmte Funktionsgleichung immer mehr einer linearen Funktion annähert, je mehr Fahrstreifen pro Richtung zur Verfügung stehen. Eine größere Anzahl an Fahrstreifen schwächt infolge der geringeren gegenseitigen Beeinflussung der Fahrzeuge die verkehrliche Wirksamkeit ab. Für vergleichbare Resultate der Beeinflussung des gesamten Verkehrsstroms wird eine größere Ausstattungsrate benötigt.

Im „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ in der Rubrik „Auswertung der Simulationsstrecken“ sind die Zusammenhänge zwischen den verkehrlichen Kenngrößen und der Ausstattungsrate detailliert dargestellt. Beispielhaft soll der Einfluss der Fahrstreifenanzahl anhand dreier ausgewählter Zufahrten der vorgestellten Untersuchungsstrecken erörtert werden. Für eine bessere Vergleichbarkeit der ein- und zweistreifigen Querschnitte wird die absolute Anzahl der Halte der zweistreifigen Zufahrten halbiert und so die Gegenüberstellung zum



einstreifigen Richtungsquerschnitt unverfälscht gewährleistet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-12 dargestellt.

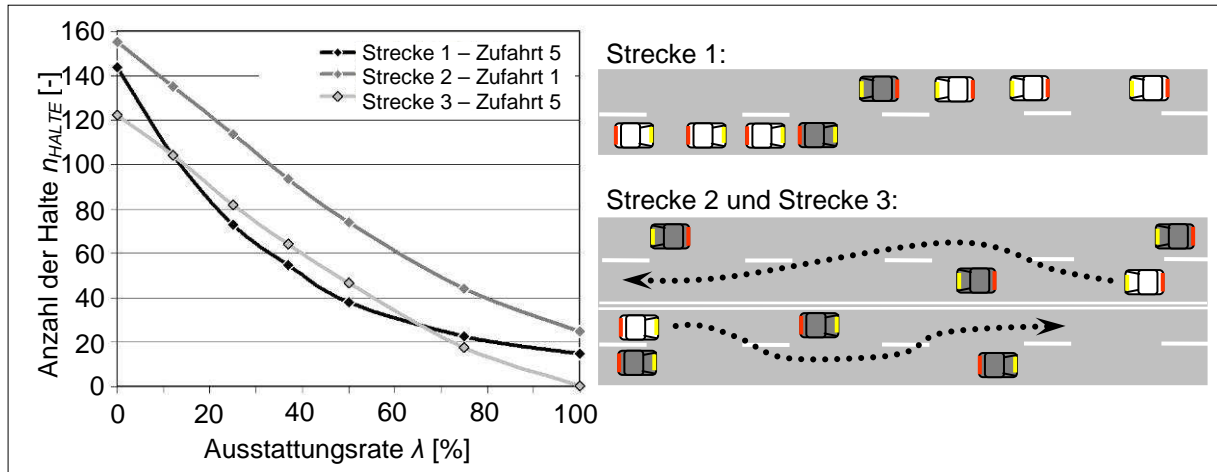


Abbildung 4-12: Einflussfaktor Anzahl der Fahrstreifen – quantitativ

Gut zu erkennen ist, dass die Krümmung der Funktion von Untersuchungsstrecke 1, welche einen einstreifigen Richtungsquerschnitt aufweist, deutlich größer ist als die der zweistreifigen Richtungsquerschnitte von Untersuchungsstrecke 2 und 3. Grund hierfür sind die Überholmöglichkeiten der nicht ausgestatteten Fahrzeuge auf Strecke 2 und 3. Nicht ausgestattete Fahrzeuge können sich somit der indirekten Beeinflussung durch die Interaktion mit ausgestatteten Fahrzeugen entziehen.

#### Einflussfaktor 4: Akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung

Neben der Anzahl der durchgehenden Fahrstreifen beeinflusst die minimal akzeptierte Geschwindigkeit die funktionalen Zusammenhänge zwischen den untersuchten verkehrlichen Kenngrößen und der Ausstattungsrate. Da im realen Verkehrsablauf nicht jede Geschwindigkeitsempfehlung akzeptiert wird, wurden die drei in Abschnitt 4.3.2 definierten Szenarien als Grundlage der Simulationsuntersuchung genutzt. Abbildung 4-13 zeigt den Einfluss der akzeptierten Geschwindigkeitsgrenzen in einer qualitativen Gegenüberstellung der verkehrlichen Kenngrößen zur Ausstattungsrate.

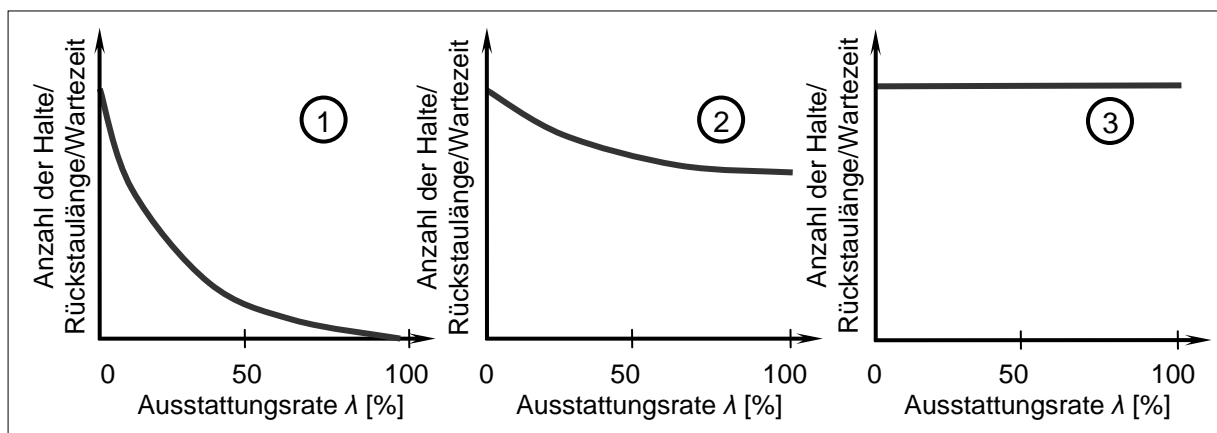


Abbildung 4-13: Einflussfaktor akzeptierte Geschwindigkeit – qualitativ

Die größten Wirkungen, auch bei kleinen Ausstattungsraten, sind im dargestellten Diagramm ① aufgezeigt, welches die Befolgung aller Geschwindigkeitsempfehlungen im



Szenario 1 repräsentiert. Diagramm ③ zeigt den komplett gegenteiligen Fall. Die gerade noch akzeptierten Geschwindigkeiten liegen nahe der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Im Diagramm ② liegen die akzeptierten Geschwindigkeiten zwischen allen Geschwindigkeitsempfehlungen und der planerisch definierten Progressionsgeschwindigkeit der Grünen Welle. Aus dieser Betrachtung kann abgeleitet werden, dass die größten Potenziale in einer Akzeptanz aller Geschwindigkeitsempfehlungen liegen, welche jedoch in der Realität selten gegeben sein wird. Exemplarisch wird in Abbildung 4-14 die Anzahl der Halte der Ausstattungsrate für die drei Szenarien gegenübergestellt. Betrachtet wird die rot hervorgehobene Zufahrt 5 von Untersuchungsstrecke 1. Es ist klar ersichtlich, dass die größten Potenziale nur dann ausgeschöpft werden können, wenn nahezu alle Geschwindigkeitsempfehlungen von den Fahrern akzeptiert werden. Schon bei akzeptierten Geschwindigkeitsgrenzen von  $\geq 30$  km/h (Szenario 3) sind die Effekte in diesem dargestellten Beispiel nur noch sehr gering und die Funktion ist nahezu eine Konstante. Neben dem abgebildeten Fall, ist dieser Effekt bei fast allen Zufahrten der im „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ zusammengestellten Untersuchungsstrecken nachvollziehbar.

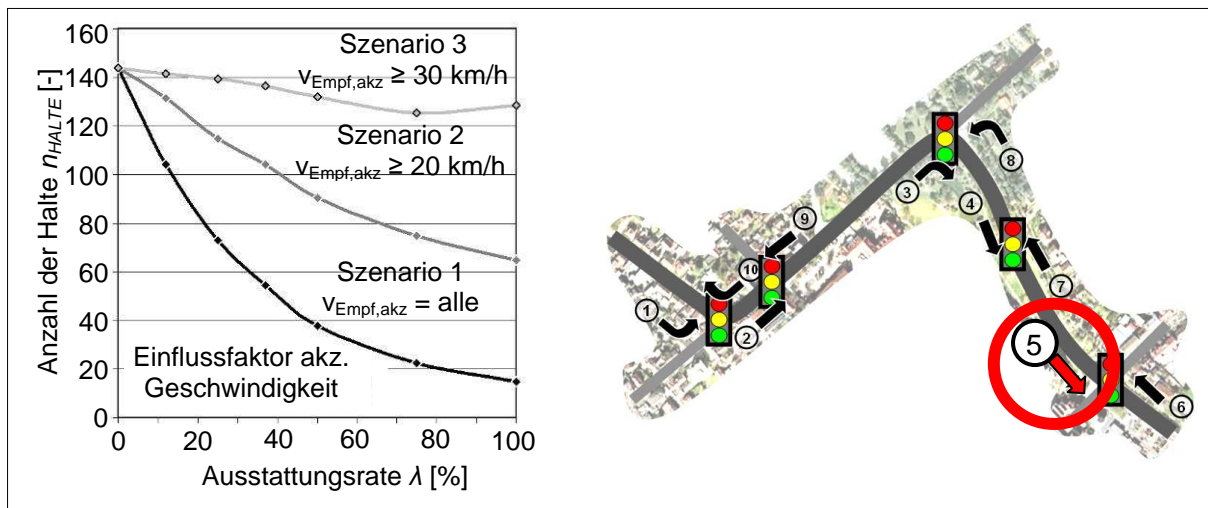


Abbildung 4-14: Einflussfaktor akzeptierte Geschwindigkeit – quantitativ

Abbildung 4-15 zeigt ein Beispiel der Potenziale der Beeinflussung des Fahrverhaltens als konvexen Funktionsteppich. Gezeigt wird der Einfluss der Ausstattungsrate sowie der minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung auf die mögliche prozentuale Reduktion der Anzahl der Halte für das vorgestellte Beispiel. 100 % der möglichen Reduktion der Halte können bei Vollausstattung und allen akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlungen erreicht werden. Der allgemeine Zusammenhang dieser Zufahrt ist im linken Teil der Abbildung verdeutlicht. Im rechten Teil der Abbildung 4-15 sind zwei exemplarische Betrachtungen aufgezeigt. Im oberen Fall ist der Handlungsspielraum rot hinterlegt, welcher sich bei unterschiedlichen Ausstattungsraten und einer minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung von größer oder gleich 20 km/h (Szenario 2) ergibt. Deutlich zu erkennen ist die dadurch reduzierte und rot gekennzeichnete Fläche. Sie gibt den noch verfügbaren Handlungsspielraum der Verkehrsbeeinflussung an. Im unteren Fall ist der Bereich hervorgehoben, der eine Reduktion der Anzahl der Halte über 50 % des Ausgangswertes des

Status quo ermöglicht. Auch hier lassen sich die Einsatzgrenzen und -bereiche der Funktion der kooperativen Verkehrsbeeinflussung klar erkennen.

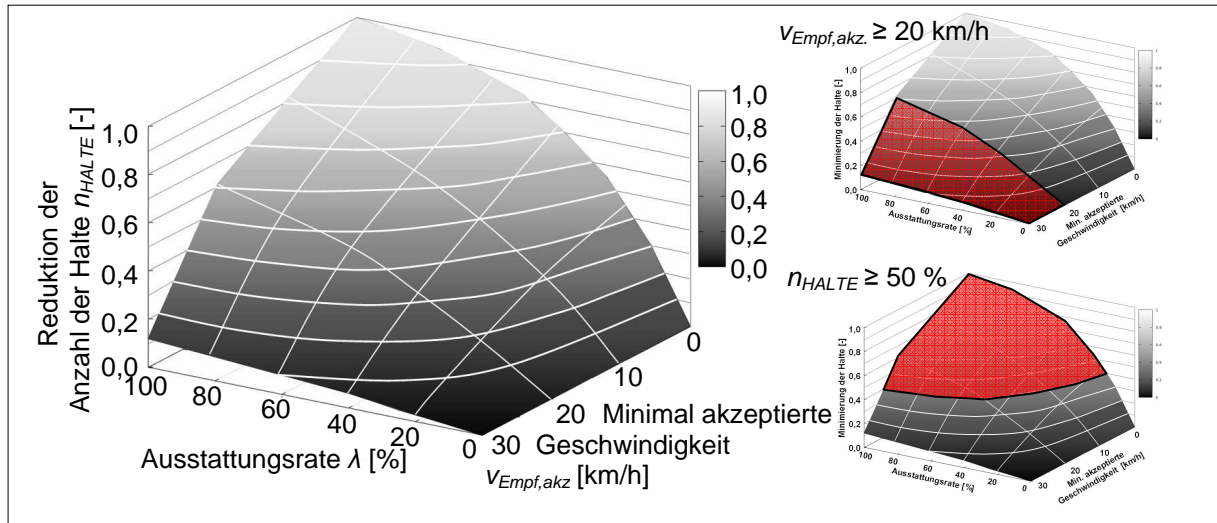


Abbildung 4-15: Einflussfaktor akzeptierte Geschwindigkeit – Beispiel

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass dies eine Beispielbetrachtung für den einen Knotenpunkt ist, die nicht ohne weiteres verallgemeinert werden kann. Als Tendenz lässt sich ableiten, dass die größte Wirksamkeit zu erwarten ist, wenn nahezu alle Geschwindigkeitsempfehlungen akzeptiert werden. Die Ausstattungsrate hat einen wesentlichen Einfluss, welcher bereits diskutiert wurde.

Um weitere Aussagen über den Wirkungsgrad  $\eta$  kooperativer Systeme im Verkehr tätigen zu können, soll dieser Begriff definiert werden. Abbildung 4-16 zeigt die beispielhafte Gegenüberstellung der prozentualen Abweichungen der Kenngrößen Anzahl der Halte  $n_{HALTE}$ , Wartezeit  $t_{WARTE}$  und Rückstaulänge  $x_{STAU}$  vom Ausgangswert, abgetragen über die minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung  $v_{Empf,akz}$ . Exemplarisch wird mit einer Ausstattungsrate von 25 % ( $\lambda = 0,25$ ) gearbeitet. Der Grundwert und somit der höchste Wirkungsgrad von 100 % ( $\eta = 1,00$ ) ergibt sich bei den Untersuchungsergebnissen des Szenarios 1, in dem alle Geschwindigkeitsempfehlungen akzeptiert werden. Weiterhin wird für die Erreichung des Grundwerts eine Vollaussstattung der Fahrzeugflotte ( $\lambda = 1,00$ ) unterstellt.

Zur Herleitung der funktionalen Zusammenhänge werden die vorangestellten Überlegungen herangezogen. Hieraus ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\eta(x_{STAU}) = \frac{x_{STAU}(\lambda = 0, v_{Empf,akz} = \max) - x_{STAU}(\lambda, v_{Empf,akz})}{x_{STAU}(\lambda = 0, v_{Empf,akz} = \max) - x_{STAU}(\lambda, v_{Empf,akz} = \max)} \quad (4-9)$$

$$\eta(t_{WARTE}) = \frac{t_{WARTE}(\lambda = 0, v_{Empf,akz} = \max) - t_{WARTE}(\lambda, v_{Empf,akz})}{t_{WARTE}(\lambda = 0, v_{Empf,akz} = \max) - t_{WARTE}(\lambda, v_{Empf,akz} = \max)} \quad (4-10)$$

$$\eta(n_{HALTE}) = \frac{n_{HALTE}(\lambda = 0, v_{Empf,akz} = \max) - n_{HALTE}(\lambda, v_{Empf,akz})}{n_{HALTE}(\lambda = 0, v_{Empf,akz} = \max) - n_{HALTE}(\lambda, v_{Empf,akz} = \max)} \quad (4-11)$$

Im Nenner der jeweiligen Funktionsterme der Gleichungen (4-9) bis (4-11) wird die maximal mögliche verkehrliche Wirksamkeit bzw. das maximal mögliche Potenzial bei vorgegebener

Ausstattungsrate berechnet. Im Zähler wird die momentane verkehrliche Wirkung unter gegebener Ausstattungsrate und auf Basis der minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung ermittelt. Die Division der momentanen verkehrlichen Wirkung durch die maximal mögliche verkehrliche Wirksamkeit, unter Berücksichtigung der Ausstattungsrate und der minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung, ergibt den Wirkungsgrad  $\eta$  der Funktion der kooperativen Verkehrsbeeinflussung.

Zum Nachweis der ermittelten funktionalen Zusammenhänge soll eine Beispielbetrachtung mit Hilfe der Mittelwerte der funktionalen Zusammenhänge der drei Funktionen der Zufahrten und Strecken mit dem größten verkehrlichen Nutzen stattfinden. Abbildung 4-16 zeigt den Wirkungsgrad abgetragen über die minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung der einzelnen Kenngrößen Rückstaulänge, Anzahl der Halte und Wartezeit unter Berücksichtigung der Fahrstreifenzahl. Die tabellarischen Werte sowie eine Beispielrechnung zur Bestimmung des Wirkungsgrads können dem „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ im Unterpunkt „Wirkungsgrad der kooperativen Verkehrsbeeinflussung“ entnommen werden.

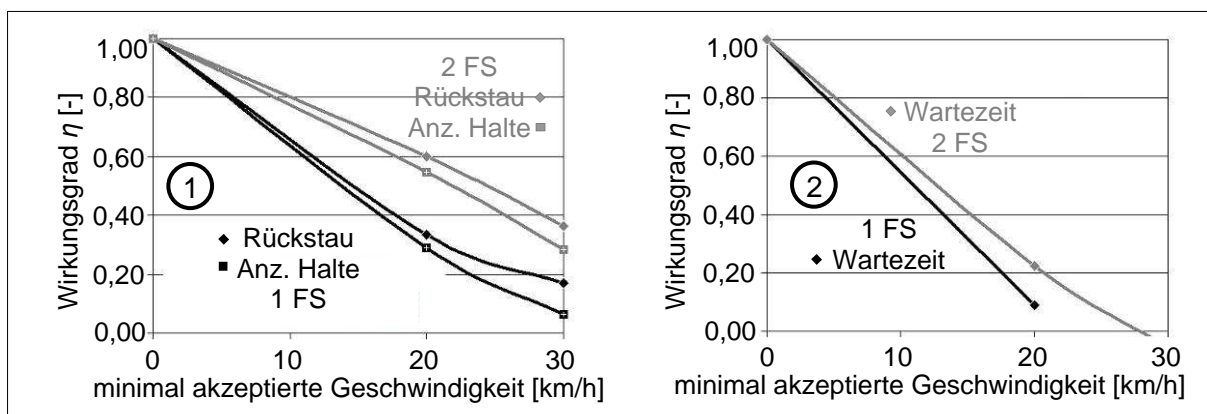


Abbildung 4-16: Einflussfaktor akzeptierte Geschwindigkeit – mittlerer Wirkungsgrad

Zwischen den dargestellten Kenngrößen Wirkungsgrad und minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung bilden sich nahezu lineare Zusammenhänge aus. Die Verläufe der Kennlinien der Zufahrten bezüglich der Parameter Rückstaulänge und Anzahl der Halte im Diagramm ① verhalten sich, abgesehen von der Anzahl der Fahrstreifen, untereinander in etwa identisch. Diagramm ② der Abbildung 4-16 zeigt die Zusammenhänge hinsichtlich der streckenbezogenen Kenngrößen. Die größten Wirkungsgrade können bei der Befolgung aller Geschwindigkeitsempfehlungen nachgewiesen werden. Ab dem Schnittpunkt der Funktion mit der Abszisse, welches die Nullstelle  $\eta = 0$  widerspiegelt, ist die Verkehrsbeeinflussung ohne verkehrliche Effekte. Negative Wirkungsgrade treten ab diesem Punkt nicht auf.

Aus den Diagrammen ist weiterhin ersichtlich, dass die Funktionen der einstreifigen Querschnitte ein steileres Gefälle aufweisen als die funktionalen Zusammenhänge der zweistreifigen Streckenabschnitte. Grund hierfür ist jedoch nicht primär das Kriterium der Anzahl der durchgehenden Richtungsfahrstreifen, was zunächst ursächlich erscheint, sondern vielmehr die Streckencharakteristik. Der durchschnittliche Abstand aller Knotenpunkte der Untersuchungsstrecke mit einstreifiger Richtungsfahrbahn beträgt 170 m. Beide Untersuchungsstrecken mit zweistreifiger Richtungsfahrbahn weisen hingegen einen durchschnittlichen Abstand von 560 m auf. Infolge der größeren mittleren Knotenpunktabstände

verlängern sich auch die zur Verfügung stehenden Reaktionszeiten für die Anpassung der Fahrgeschwindigkeit. Damit führen geringere minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlungen zu höheren Wirkungsgraden. Die Nullstelle der funktionalen Zusammenhänge zwischen Wirkungsgrad und minimal akzeptierter Geschwindigkeitsempfehlung entspräche der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Streckenabschnitt, wenn die Streckenlänge zwischen den Knotenpunkten gegen Unendlich geht. Keines der Fahrzeuge würde so zum Halten kommen. Sowohl die Rückstaulängen als auch die Wartezeiten wären Null.

Die Vereinfachung der Linearisierung der Funktionen, gerade in Bereichen von Wirkungsgraden unter 20 %, erlaubt diese Rückschlüsse auf Schnittpunkte mit der Abszisse und so das Eruiere der Einsatzgrenzen der Beeinflussung des Fahrverhaltens. Real führen sicherlich auch hohe Grenzen der minimal akzeptierten Geschwindigkeiten zu marginalen verkehrlichen Nutzen. Die Funktion würde hier nie die Abszisse schneiden sondern sich ihr in einem Bereich der Wirkungsgrade unter 20 % nicht linear annähern. Bei Wirkungsgraden von unter 20 % sind jedoch auch die erzielten verkehrlichen Effekte entsprechend gering und ein größerer Nutzen des kooperativen Systems könnte dann sicherlich durch die Verkehrssteuerung anstelle der Verkehrsbeeinflussung erzielt werden.

#### **Einflussfaktor 5: Fahrrelation im Streckenabschnitt**

Die Fahrrelationen der Fahrzeuge im Netz ist ein weiterer entscheidender Einflussfaktor für die Krümmung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Verkehrskenngrößen und Ausstattungsrate. Beispielhaft sind typische Fahrrelationen in Abbildung 4-17 dargestellt.

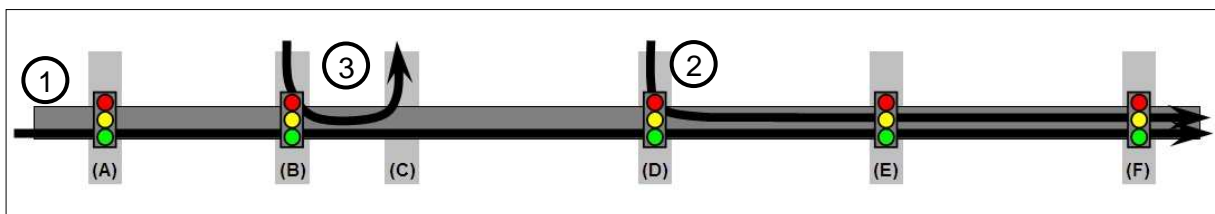


Abbildung 4-17: Einflussfaktor Fahrrelationen – Prinzipskizze

Kooperativ beeinflusst werden in diesem Beispiel alle Fahrzeuge, die sich auf einem infrastrukturseitig ausgerüsteten Streckenabschnitt für die Übermittlung der Geschwindigkeitsempfehlung befinden. In Abbildung 4-17 ist dieser dunkelgrau dargestellt. Auf allen hellgrau hinterlegten Streckenzügen erhalten die Fahrer keine Geschwindigkeitsempfehlung. Von den sechs dargestellten Knotenpunkten sind fünf (A, B, D, E und F) signalisiert. Ein identisches Farbschema wird auch in den Lageplänen der Untersuchungsstrecken im „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ in der Rubrik „Lagepläne der Untersuchungsstrecken“ genutzt. Drei typische Durchfahrten werden kurz beschrieben. Fall ① zeigt ein Fahrzeug, welches die koordinierte Strecke über die Knotenpunkte (A) bis (F) komplett durchfährt. Die Geschwindigkeitsempfehlung wird permanent angezeigt. Fahrzeug ② ist ein aus der Nebenrichtung in die koordinierte Strecke einbiegendes Fahrzeug. Am Einbiegeknotenpunkt (D) bekommt es keine Geschwindigkeitsinformation übermittelt. Erst im Zulauf von Knotenpunkt (E) erfolgt die Anzeige. Fahrzeug ③ tangiert die kooperationsfähig ausgerüstete Strecke lediglich. Die Koordinierung der Strecke ist aufgrund von ungünstigen Knotenpunktabständen über eine reine Planung mit statischer Progressionsgeschwindigkeit oft

schwer realisierbar. Hier bietet die dynamische Anzeige der Geschwindigkeit große Vorteile (Fall ①). Bei Fahrrelation ② kommt hinzu, dass Fahrzeuge in eine Grüne Welle einbiegen und damit in vielen Fällen eine Geschwindigkeit weit unter der zulässigen Höchstgeschwindigkeit empfohlen wird. In der Praxis würden alle nicht ausgestatteten Fahrzeuge am Knotenpunkt (E) zum Stehen kommen, nachdem sie über (D) eingefahren sind. Informierte Fahrer, welche zusätzlich geringe Geschwindigkeitsempfehlungen akzeptieren, können diesen zusätzlichen Halt vermeiden.

Das generell mögliche Verhalten der Kenngrößen gegenüber der Ausstattungsrate wird in den Diagrammen der Abbildung 4-18 qualitativ dargestellt.

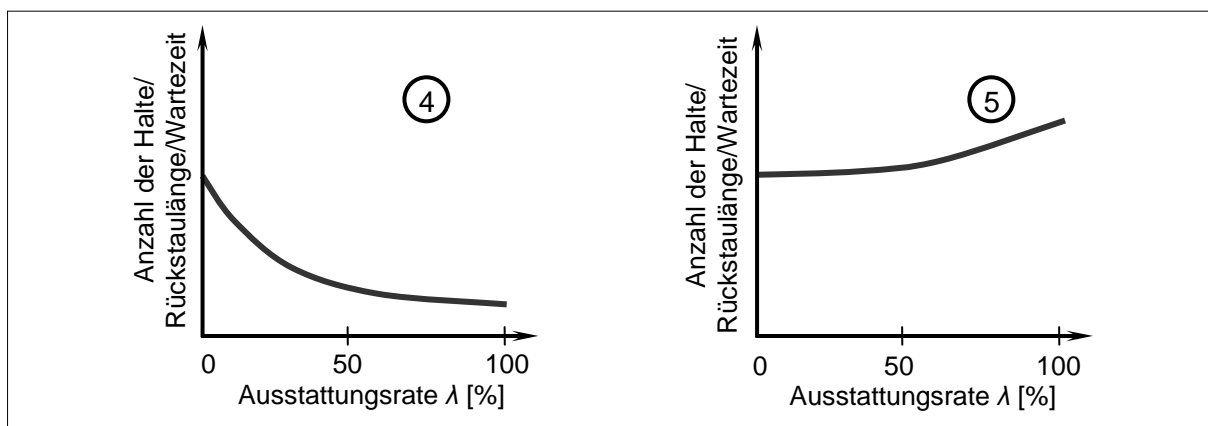


Abbildung 4-18: Einflussfaktor Fahrrelation – qualitativ

Diagramm ④ zeigt die schon bekannten Zusammenhänge der koordinierten Richtung mit Minderung der Anzahl der Halte, Rückstaulängen und Wartezeiten bei größer werdender Ausstattungsrate. Jedoch können auch negative verkehrliche Auswirkungen für Fahrzeuge auf Fahrrelationen entstehen, welche die koordinierte Strecke am nächsten Knoten verlassen wollen und durch angepasst fahrende Fahrzeuge der Hauptrichtung behindert werden. Die Qualität des Verkehrsablaufs dieser Fahrzeuge verschlechtert sich infolgedessen mit zunehmender Ausstattungsrate. Den qualitativen Verlauf der funktionalen Zusammenhänge zeigt Diagramm ⑤. Besonders stark wirkt sich dieser Effekt aus, wenn in der Hauptrichtung stark geminderte Geschwindigkeiten gefahren werden und gleichzeitig die abbiegenden Fahrzeuge dieser Richtungen ein Vorlaufgrün erhalten. Ohne Beeinflussung würden die Fahrzeuge die Lichtsignalanlage bei Grün zum Abbiegen erreichen. Durch die beeinflussten Fahrzeuge der Hauptrichtung erreichen sie die Anlage nicht mehr während der Freigabezeit und müssen bis zur nächsten Freigabe warten. Ein Beispiel des dargestellten Sachverhalts wird in Abbildung 4-19 verdeutlicht. Es werden die Rückstaulängen der Ausstattungsrate gegenüber gestellt. Dargestellt sind die Verläufe für den Linksabbiegerfahrstreifen (Zufahrt 10) und den geradeaus führenden Fahrstreifen (Zufahrt 5) der Untersuchungsstrecke 2, welche in Abbildung 4-19 rot markiert sind. Im aufgezeigten Diagramm ist zu erkennen, dass mit größer werdender Ausstattungsrate die Rückstaulänge der Zufahrt 5, auf welche die Fahrzeuge beeinflusst zufahren, abnimmt. Die Rückstaulänge der Zufahrt 10 nimmt hingegen leicht zu. Die Fahrzeuge, die über Zufahrt 10 abbiegen, werden durch beeinflusste Fahrzeuge der Zufahrt 5 zunehmend behindert.

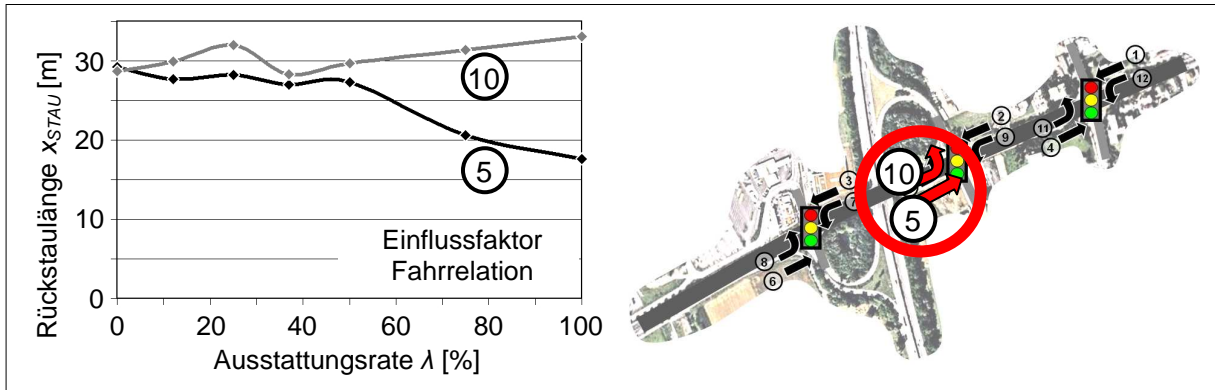


Abbildung 4-19: Einflussfaktor Fahrrelation – quantitativ

Es sollte so immer nur die Fahrrelation mit den größten Verkehrsstärken beeinflusst werden. So können die dargestellten negativen Effekte der Verkehrsbeeinflussung infolge der indirekten Beeinflussung minimiert werden. Diese resultieren vorwiegend aus den Interaktionen zwischen den Fahrzeugen.

### Einflussfaktor 6: Pulkbildung

Neben den schon genannten Vorzügen, welche die Anzeige der Geschwindigkeitsempfehlung für den Fahrer und den Verkehrsablauf bringen, sind die Pulkbildung und der Zusammenhalt der Pulks über größere Streckenabschnitte wesentliche Vorzüge der Funktion der kooperativen Verkehrsbeeinflussung. Abbildung 4-20 zeigt ein Weg-Zeit-Diagramm inklusive der einzelnen Trajektorien.

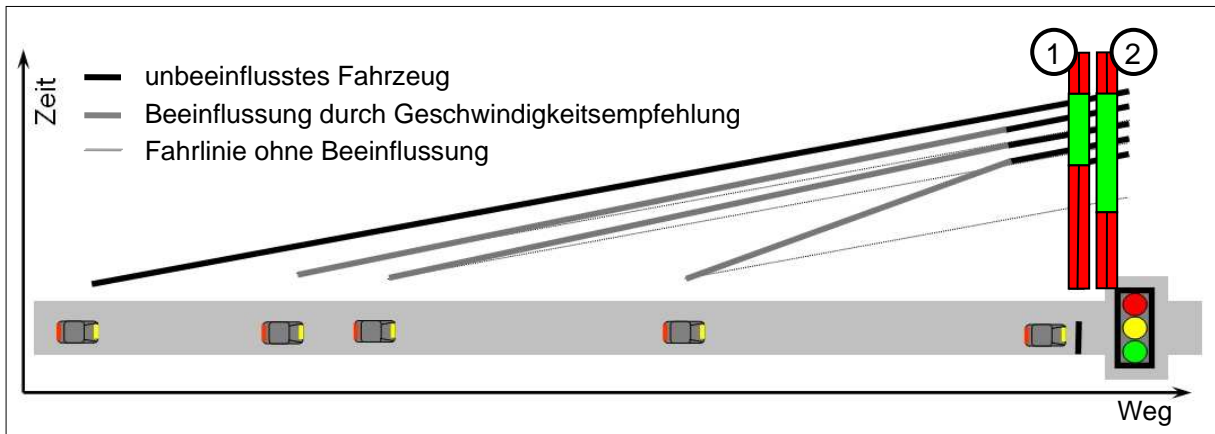


Abbildung 4-20: Einflussfaktor Pulkbildung – Prinzipskizze

Um die theoretische Ankunft im nicht ausgestatteten Fall auch in der Darstellung des Weg-Zeit-Diagramms zu verdeutlichen, sind diese Fahrtverläufe dünn und grau eingezeichnet. Die sehr disperse Verteilung der Fahrzeuge würde ohne Beeinflussung zur Notwendigkeit einer längeren Freigabezeit führen. Sie ist durch ② in Abbildung 4-20 gekennzeichnet. Durch die kooperative Verkehrsbeeinflussung wird das erste Fahrzeug etwas verzögert, das letzte Fahrzeug hingegen fährt mit ungeminderter Geschwindigkeit. Aufgrund der verschiedenen individuellen Geschwindigkeiten kommt es zu einer starken Verdichtung der Fahrzeuge und so zur Bildung eines Pulks. Die Freigabezeiten am Knotenpunkt können wegen eines überwiegend gesättigten Abflusses der Fahrzeuge besser genutzt und auf die unterschiedlichen Verkehrsströme sinnvoll verteilt werden. Infolgedessen kann die Qualität des



Verkehrsablaufs am signalisierten Knotenpunkt verbessert werden. Die nun erforderlichen kürzeren Freigabezeiten sind durch ① in Abbildung 4-20 markiert. Die Gesamtkapazität des Knotenpunkts bleibt unbeeinflusst, da das System zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung lediglich bis Auslastungsgraden der Freigabezeit von 85 % zum Einsatz kommen sollte.

Von WIEDEMANN-1968 wurden Untersuchungen zur Pulkauflösung durchgeführt. Er kam zu dem Ergebnis, dass sich der Pulk im innerstädtischen Bereich ab einer Strecke von 1.000 m stark auflöst. Eine Führung der Grünen Welle über Knotenabstände größer als 1.000 m wird somit nicht als sinnvoll erachtet. Genau dieser Sachverhalt der Pulkauflösung kann mit einem kooperativen Verfahren gemindert werden, so dass es über lange Strecken nicht zum Zerfall der Pulks kommt. Im Gegenteil, aus einer Anzahl von zufällig im Streckenabschnitt fahrenden Fahrzeugen können durch individuelle Geschwindigkeitsempfehlungen kompakte Fahrzeugpuls gebildet werden. Koordinierte Strecken können so bei entsprechenden Ausstattungsgraden auch über größere Knotenpunktabstände als 1.000 m realisiert werden.

### **Einflussfaktor 7: Reisezeit**

Abbildung 4-21 zeigt die Gegenüberstellung der Reisezeit zur Ausstattungsrate im Streckenabschnitt. Klar ersichtlich ist, dass die Reisezeit über alle Bereiche der Ausstattungsrate konstant ist.

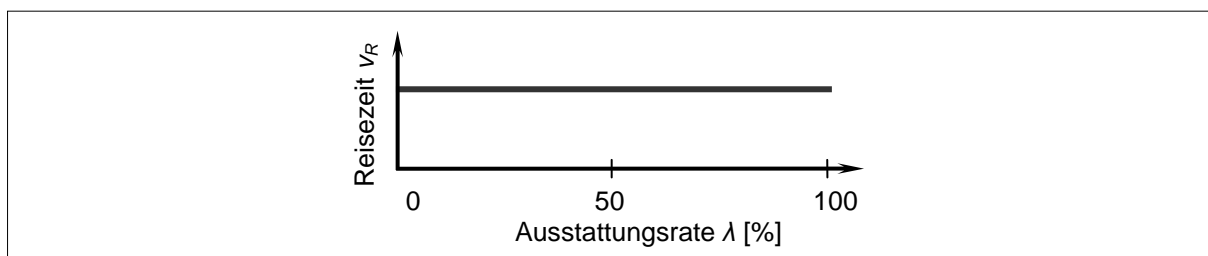


Abbildung 4-21: Einflussfaktor Reisezeit – qualitativ

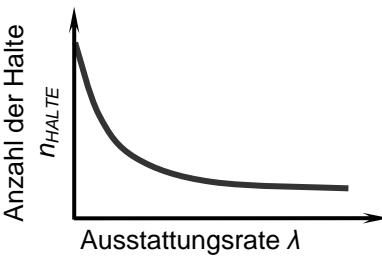
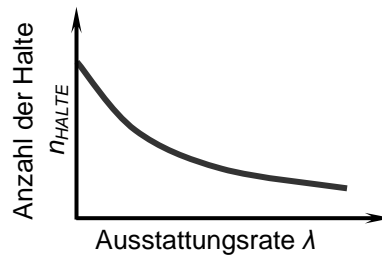
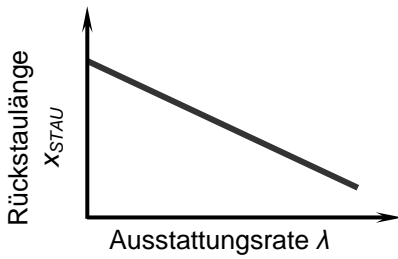
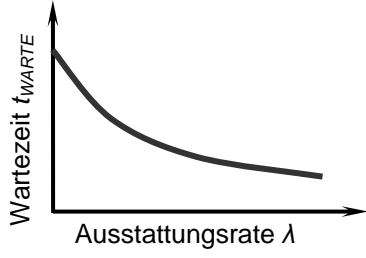
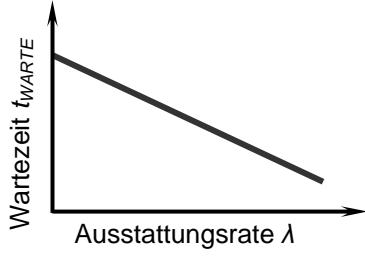
Die detaillierten Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen können „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ entnommen werden. Es erfolgt zwar eine Minimierung der Rückstaulängen, der Anzahl der Halte und auch der Wartezeit, da aber bei der Untersuchung der Verkehrsbeeinflussung keine Anpassung der Lichtsignalsteuerung vorgenommen wurde, kommt es auch nicht zu Einsparungen bei der Reisezeit. Infolge der zur Verfügung stehenden dynamischen Geschwindigkeitsempfehlung wird der Streckenabschnitt harmonischer und energieeffizienter durchfahren. Einzig für die Fahrrelation ③ in Abbildung 4-17 kommt es zu einer Verlängerung der Gesamtreisezeit. Begründet ist dies darin, dass Fahrzeuge dieser Fahrrelation im Bereich der Grünen Welle Strecke eigentlich unbeeinflusst fahren könnten, da sie keinen signalisierten Knotenpunkt passieren. Durch die vorausfahrenden beeinflussten Fahrzeuge müssen sie ihre Geschwindigkeit jedoch reduzieren. Diese negative Beeinflussung betrifft in den Simulationsuntersuchungen nur sehr wenige Fahrzeuge und steht in der Gesamtbetrachtung aufgrund der gewonnenen Vorteile für die Fahrzeuge der Hauptrichtung im Hintergrund.

### **Zusammenfassung der Einflussfaktoren**

Das Maß der Krümmung der funktionalen Zusammenhänge zwischen den Verkehrskenngrößen und der Ausstattungsrate  $\lambda$  hängt von den beschriebenen Einflussfaktoren ab. In

Abhängigkeit der Anzahl der durchgehenden Fahrstreifen ergeben sich die in Tabelle 4-2 qualitativ dargestellten formalen Zusammenhänge zwischen den einzelnen verkehrlichen Kenngrößen und der Ausstattungsrate. Detaillierte Nachweise der funktionalen Zusammenhänge sowie die zugehörigen Signifikanztests können dem „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ entnommen werden.

Tabelle 4-2: Zusammenhänge der Kenngrößen und Einflussfaktoren

Zusammenhänge zwischen Ausstattungsrate und ...	Strecke mit einstreifigem Richtungsquerschnitt	Strecke mit zweistreifigem Richtungsquerschnitt
Anzahl der Halte	 $n_{HALTE}(\lambda) = d \cdot e^{-f \cdot \lambda}$	 $n_{HALTE}(\lambda) = a \cdot \lambda^2 - b \cdot \lambda + c$
Rückstaulänge	 $x_{STAU}(\lambda) = -b \cdot \lambda + c$	
Wartezeit	 $t_{WARTE}(\lambda) = a \cdot \lambda^2 + b \cdot \lambda + c$	 $t_{WARTE}(\lambda) = -b \cdot \lambda + c$
$a, b, c, d$ und $f = \text{konst.}$		

Die einzelnen Faktoren der funktionalen Zusammenhänge bestimmen maßgebend die Steigung, Krümmung und die Schnittpunkte mit den Achsen der Diagramme. Faktor  $a$  ist die Variable der Funktion, die für den quadratischen Anteil und damit für das Maß der Krümmung verantwortlich ist. Je größer der Wert ist, desto stärker ist die Funktion gekrümmt und desto geringer muss die Ausstattungsrate sein, um vorgegebene verkehrliche Effekte zu erzielen. Läuft  $a$  gegen Null, so ist allein der lineare Anteil der Funktion für das Verhalten der Kenngrößen verantwortlich. Die Faktoren  $b$  und  $c$  sind Variablen des linearen Anteils der Funktion. Die Steigung der Funktion wird von  $b$  bestimmt und die Verschiebung auf der Ordinate von der Variable  $c$ . Die Faktoren  $d$  und  $f$  bestimmen das Verhalten der Exponentialfunktion. Der Faktor  $d$  ist für die Verschiebung auf der Abszisse verantwortlich. Die Variable  $f$



gibt die Krümmung der Funktion an. Je größer  $f$  ist, desto stärker wird die Funktion gekrümmt.

Die kenngrößenbezogenen Wirkungen sollen kurz am Beispiel der einstreifigen Verkehrsführung verdeutlicht werden. Zwischen der Kenngröße Anzahl der Halte in der Zufahrt eines signalisierten Knotenpunkts und der Ausstattungsrate lässt sich in nahezu allen Fällen ein exponentieller Zusammenhang nachweisen. Zwischen den Kenngrößen Wartezeit und Ausstattungsrate folgt der Zusammenhang einer quadratischen Funktion. Dabei wirkt sich die Beeinflussung von nur einem Fahrzeug in beiden Fällen positiv auf mehrere andere Fahrzeuge aus. Grund hierfür ist die begrenzte Möglichkeit der nicht ausgestatteten Fahrzeuge, sich der Beeinflussung der ausgestatteten Fahrzeuge zu entziehen. Da die Erfassung der Wartezeiten aus der in VISSIM verfügbaren streckenbezogenen Messung über alle durchfahrene Knotenpunkte extrahiert wird, die Anzahl der Halte jedoch mittels eines Stauzählers unmittelbar in der Knotenpunktzufahrt gemessen wird, kommt es zu der ermittelten Unterscheidung zwischen einem exponentiellen und einem quadratischen Verlauf der Regressionsfunktionen. Die mannigfaltigen Einflüsse im Verlauf des Streckenabschnittes führen dabei zu einer leichten Reduktion der Wirksamkeit bezüglich der Kenngröße Wartezeit gegenüber der zufahrtsbezogen ermittelten Kenngröße Anzahl der Halte. Auch die Rückstaulänge wird zufahrtsbezogen ermittelt. Die funktionellen Zusammenhänge zwischen Rückstaulänge und Ausstattungsrate stellen sich jedoch noch etwas anders dar als bei den zuvor beschriebenen Kenngrößen. Sowohl bei ein- als auch bei zweistreifiger Verkehrsführung je Richtung besteht ein negativ-linearer Zusammenhang zur Ausstattungsrate. Dies bedeutet, dass ein ausgestattetes Fahrzeug genau ein weiteres Fahrzeug beeinflusst. Wenn somit 20 % der Fahrzeuge ausgestattet sind, kann die Rückstaulänge um ca. 20 % reduziert werden. Im Zuge der Simulationsuntersuchung konnte nur in Einzelfällen eine leichte Tendenz zu potenziellen Regressionen belegt werden. Zur gezeigten Linearisierung kommt es durch die Art und Weise, wie der Stauzähler die mittlere Staulänge erfasst. Als Staus gelten auch Fahrzeugpuls, wenn die Abstände zwischen den Fahrzeugen kleiner als 20 m sind. Auch empfohlene niedrige Geschwindigkeiten der kooperativen Anwendung können so „Quasi-Staus“ auf der Strecke erzeugen. Dies führt zu einer Minderung der Wirksamkeit der kooperativen Verkehrsbeeinflussung bei größeren Ausstattungsraten im Vergleich der Kenngrößen Anzahl der Halte und Wartezeit. Im realen Verkehrsablauf sind vermutlich die Einsparungen beim Stau deutlich größer, da auch hier ein Fahrzeug mehrere andere mit beeinflusst.

Zur beispielhaften Bestimmung der größtmöglichen Wirkung der Anzeige der Geschwindigkeitsempfehlung in der Grünen Welle werden die drei verkehrlich wirksamsten Zusammenhänge und damit die am stärksten gekrümmten Funktionen jeder Kenngröße bei gegebener Ausstattungsrate untersucht. Es werden die Mittelwerte der drei Funktionen von Anzahl der Halte, Rückstaulänge und Wartezeit der Ausstattungsrate gegenüber gestellt. Die Auswahl ist dem „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ der Rubrik „Lagepläne der Untersuchungsstrecken“ zu entnehmen und in Tabelle 4-3 sowie Tabelle 4-4 zusammengefasst. Die Angaben der Minderung der Kenngrößen sind in Prozent angegeben. Der Status quo bildet den Bezugswert, in dem keines der Fahrzeuge ausgestattet ist. Diesem

Beispiel wird das Szenario 1 unterstellt. In diesem Szenario tritt die größte verkehrliche Wirksamkeit aufgrund der Befolgung aller Geschwindigkeitsempfehlungen ein.

Tabelle 4-3: Ausstattungsraten bei Verkehrsbeeinflussung (einstreifiger Querschnitt)

	Prozentuale Reduktion bei gegebener Ausstattungsrates $\lambda$					Typ
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	
<b>Anzahl der Halte</b>	47,9 %	62,5 %	73,2 %	81,1 %	87,0 %	exponentiell
<b>Rückstaulänge</b>	10,0 %	20,0 %	30,0 %	40,0 %	50,0 %	linear
<b>Wartezeit</b>	14,5 %	27,9 %	40,4 %	51,8 %	62,4 %	quadratisch

Im Zuge einer einstreifig durchgängigen Richtungsfahrbahn können bereits mit einer Ausstattungsrates von 20 % die Anzahl der Halte um ca. 63 %, die Rückstaulänge in der Zufahrt um ca. 20 % und die Wartezeit über die Strecke um ca. 28 % reduziert werden. Im Fall, dass die Hälfte der Fahrzeugflotte ausgestattet ist, kann die Anzahl der Halte in den Zufahrten sogar bis ca. 87 % gemindert werden. Die Rückstaulängen in den Zufahrten verkürzen sich dann bis auf die Hälfte des Grundwerts und die Wartezeiten der Strecke können bis auf ca.  $\frac{2}{3}$  des Grundwerts reduziert werden.

Tabelle 4-4: Ausstattungsrates bei Verkehrsbeeinflussung (zweistreifiger Querschnitt)

	Prozentuale Reduktion bei gegebener Ausstattungsrates $\lambda$					Typ
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	
<b>Anzahl der Halte</b>	14,3 %	27,6 %	40,0 %	51,4 %	61,9 %	quadratisch
<b>Rückstaulänge</b>	10,0 %	20,0 %	30,0 %	40,0 %	50,0 %	linear
<b>Wartezeit</b>	10,0 %	20,0 %	30,0 %	40,0 %	50,0 %	linear

Die erzielten Ergebnisse der zweistreifigen Zufahrten und Strecken liegen infolge der zunehmenden Linearisierung der funktionalen Zusammenhänge unter denen der einstreifig durchgehenden Richtungsfahrbahnen und werden in Tabelle 4-4 zusammengefasst. Bei einer Ausstattungsrates von 20 % kann die Anzahl der Halte um bis zu 27 % und die Rückstaulänge sowie die Wartezeit um bis zu 20 % in den betrachteten drei Zufahrten mit größter verkehrlicher Wirksamkeit reduziert werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass schon mit geringen Ausstattungsrates in ein- und zweistreifigen Richtungsquerschnitten die Anzahl der Halte wesentlich reduziert werden kann. Auch Wartezeiten und Rückstaulängen lassen sich deutlich reduzieren. Die simulativ gewonnen Ergebnisse und Erkenntnisse belegen damit die größten möglichen Potenziale hinsichtlich der kooperativen Verkehrsbeeinflussung auf den untersuchten Beispielstrecken. Es handelt sich um individuelle Ergebnisse. Die individuellen Ergebnisse schwanken in einem Intervall zwischen keinem Nutzen, z. B. in sehr gut koordinierten Streckenabschnitten, bis hin zu den maximalen verkehrlichen Nutzen des zuvor genannten Beispiels. Auch wenige Einzelfälle mit negativen verkehrlichen Wirkungen auf einzelnen Fahrrelationen wurden thematisiert. Durch die Vielzahl an Einflussfaktoren können die Ergebnisse in anderen Netzen von den vorgestellten Ergebnissen sowohl zum Positiven als auch zum Negativen abweichen.

### 4.3.4 Diskussion der Fahrtrajektorien

Im folgenden Abschnitt sollen die Einflussfaktoren anhand der Fahrtrajektorien nachgewiesen werden. Als Datengrundlage werden sowohl die Fahrten der Simulationsuntersuchungen, wie auch die im Testfeld durchgeführten Messfahrten genutzt. Es erfolgt eine Gegenüberstellung der Fahrlinien im Geschwindigkeits-Weg-Diagramm. Zudem werden Erkenntnisse zur Anpassung des Geschwindigkeitsverhaltens, zu stattfindenden Beschleunigungsvorgängen und zu Halten im Streckenabschnitt abgeleitet.

#### Fahrtrajektorien der Simulation

Um Aussagen zu Ausstattungsraten ableiten zu können, wird die mikroskopische Verkehrssimulation als Hilfsmittel genutzt, da die reale Testflotte lediglich auf drei Fahrzeuge beschränkt war. Aus simulierten Fahrten werden mittlere Fahrlinien über alle Fahrtverläufe und Routen gebildet. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit mit den Messergebnissen des realen Testfelds werden im Zuge dieser Untersuchung die Fahrzeuge auf der Untersuchungsstrecke 1 an folgenden genannten Routen und an folgenden zugeordneten Lichtsignalanlagen beeinflusst:

- Route 1 an LSA 8 und LSA 10
- Route 2 an LSA 8 und LSA 6/7
- Route 3 an LSA 8
- Route 4 an LSA 6/7

Die Vorteile der gemittelten Geschwindigkeitsprofile sind die einfache Erörterung des Einflusses der Ausstattungsrate und der Grenze der minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung. Zufällige Ausprägungen von individuellen Einzelfahrlinien werden durch die Mittelwertbildung ausgeblendet. Geschwindigkeitseinbrüche innerhalb der Fahrlinien können fahrdynamische Ursachen infolge der Streckengeometrie oder verkehrliche Ursachen bspw. infolge gestauter Fahrzeuge, hoher Verkehrsstärken oder Sperrzeiten von Lichtsignalanlagen haben. Dieser Abschnitt umfasst eine Zusammenstellung der wichtigsten Erkenntnisse. Die vollständige Darstellung aller Fahrlinien kann dem „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ in der Rubrik „Geschwindigkeitsprofile der Simulationsuntersuchung“ entnommen werden.

Bei Betrachtung der mittleren Fahrlinien ist zu beachten, dass Halte vor den Lichtsignalanlagen nicht mehr direkt erkannt werden können. Lediglich aus sehr geringen Geschwindigkeiten kann auf Halte mehrerer Fahrzeuge rückgeschlossen werden. Einzelhalte sowie Rückstaulängen wurden daher zuvor bei der Untersuchung der Einzelfaktoren aufgenommen, bewertet und ausgewertet. Exemplarisch werden für die Erläuterung der verkehrlichen Wirksamkeit des Einflusses der Ausstattungsrate die Ergebnisse der Fahrlinien von Route 4 herangezogen. Abbildung 4-22 zeigt die Geschwindigkeits-Weg-Profile der gemittelten Fahrlinien aller Fahrzeuge ( $n \approx 700$ ) bei Ausstattungsraten von 0 %, 10 %, 20 %, 50 % und 100 %. Die Lichtsignalanlagen auf Route 4 sind in dieser Relation nicht koordiniert. Fast alle Fahrzeuge kommen daher im Status quo, dargestellt durch die hellgraue Linie bei 0 % Ausstattung, an LSA 7 zum Stehen. In den Bereichen ① und ④ wird kein Fahrzeug kooperativ beeinflusst. Es ist klar ersichtlich, dass sich die Fahrlinien in diesem Bereich stark

gleichen. An LSA 8 kommen fast alle Fahrzeuge zum Stehen. An LSA 6 halten vereinzelt Fahrzeuge, ein anderer Teil reduziert infolge der fahrdynamischen Beeinflussung die Geschwindigkeit. Bereich ② zeigt das Fahrprofil der Zufahrt von LSA 7. Die verkehrlichen Effekte unterschiedlicher Ausstattungsrate kooperationsfähiger Fahrzeuge sind deutlich nachvollziehbar. Durch die zunehmende Reduktion der mittleren Geschwindigkeit infolge der kooperativen Verkehrsbeeinflussung können auch Halte an LSA 7 vermieden werden. Im Bereich ③ ist das Passieren des Knotenpunkts 7 erkennbar. In diesem Bereich lässt sich feststellen, dass sich die Ausstattungsrate proportional zur mittleren Geschwindigkeit verhält. Je größer die Ausstattungsrate ist, desto weniger Fahrzeuge kommen im Mittel zum Halten.

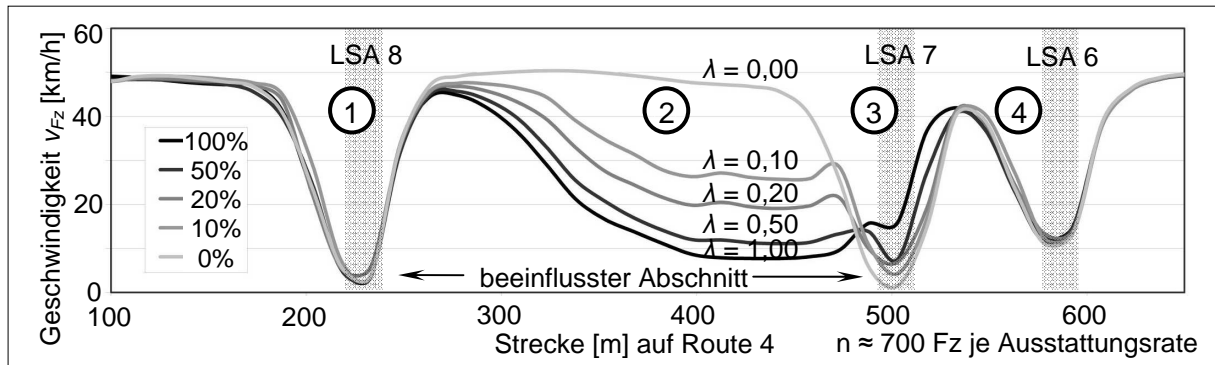


Abbildung 4-22: Fahrprofil bei variablen Ausstattungsraten

Neben der Ausstattungsrate soll der Einfluss der minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung der kooperativen Verkehrsbeeinflussung mittels der Fahrtrajektorien im Geschwindigkeits-Weg-Diagramm untersucht werden. Hierzu werden die Fahrprofil der Route 4 von Szenario 1, in dem alle Geschwindigkeitsempfehlungen, und Szenario 3, in dem lediglich Geschwindigkeitsempfehlungen über 30 km/h akzeptiert werden, in Abbildung 4-23 gegenübergestellt.

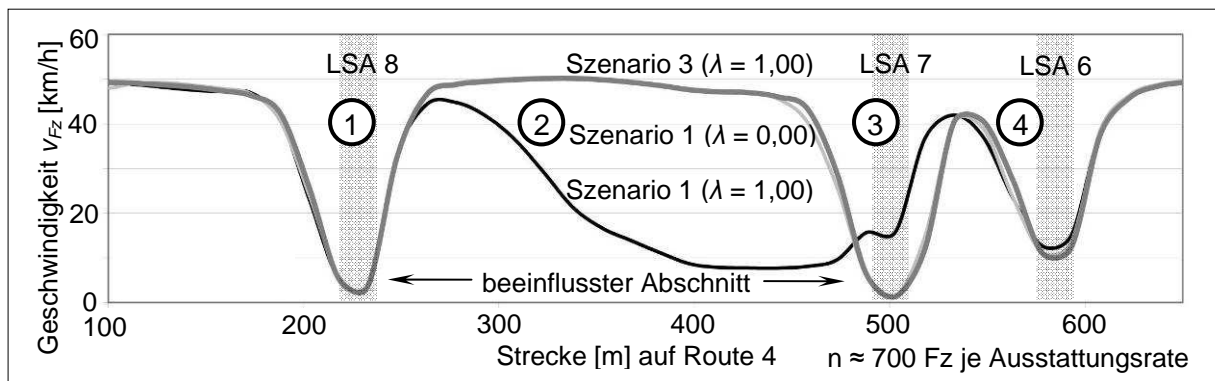


Abbildung 4-23: Fahrprofil bei variablen akzeptierten Geschwindigkeiten

Die Bereiche ① und ④, in denen auch ausgestattete Fahrzeuge nicht beeinflusst werden, gleichen dabei stark den zuvor geschilderten Zusammenhängen. In den Bereichen ② und ③ lassen sich jedoch wesentliche Unterschiede erkennen. Durch die statisch nicht vorgesehene Grünen Welle auf dieser Route und der daraus folgenden hohen Zeitdifferenzen zwischen der Ankunft der Fahrzeuge und dem Freigabezeitbeginn, gepaart mit einem verhältnismäßig geringen Knotenpunkt Abstand von ca. 250 m für die Anpassung der Fahrgeschwindigkeit, kommt es zu sehr geringen Geschwindigkeitsempfehlungen. Die

Empfehlungen des Beispiels liegen nahezu immer unter der Akzeptanzgrenze der Fahrer des Szenarios 2, in dem Geschwindigkeitsempfehlungen unter 20 km/h nicht mehr akzeptiert werden. Keiner der informierten Fahrer befolgt daher die Geschwindigkeitsempfehlung. Sie ist ohne verkehrlichen Nutzen. Die Fahrlinie bei einer Ausstattungsrate von 100 % gleicht dem Status quo, in dem keines der Fahrzeuge kooperationsfähig ausgestattet ist.

Eine Grenze der hier vorliegenden Untersuchungsmethodik ist, dass durch die Einspeisung der Geschwindigkeitsempfehlung als Wunschgeschwindigkeit die Geschwindigkeitsbegrenzung der Langsamfahrbereiche, welche zur realistischen Abbildung des Fahrverhaltens in Kurven angeordnet sind, für ausgestattete Fahrzeuge überschrieben wird. Dies ermöglicht zwar einerseits ein schnellstmögliches Beschleunigen auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit, um kapazitätsmindernde und sicherheitsrelevante Auswirkungen im Konfliktbereich des Knotenpunkts zu unterbinden, andererseits wird dann jedoch nicht das reale Fahrverhalten bei Durchfahrung von Kurvenbereichen nachgebildet. Ersichtlich wird dies an LSA 8 auf den Routen 1 und 3 sowie an LSA 10 auf Route 3. Alle anderen Routen und LSA bleiben unbeeinträchtigt. Die Differenzen zwischen den Beschleunigungsverhalten von ausgestatteten und nicht ausgestatteten Fahrzeugen werden in Abbildung 4-24 durch die dunkelgraue Fläche ① dargestellt. Zusätzlich sind die Langsamfahrbereiche durch rote Flächen und Ziffer ③ hervorgehoben. In allen Fällen wirkt sich diese frühere Beschleunigung eher negativ auf die ausgestatteten Fahrzeuge aus und mindert die verkehrliche Wirkung der Verkehrsbeeinflussung. Da ausgestattete Fahrzeuge zunächst beschleunigen und dann wieder verzögern müssen, weil sie sonst bezüglich ihrer Lage in der Koordinierung zu früh am Knotenpunkt ankommen, ist diese Grenze der Untersuchungsmethodik hinsichtlich der maximal ermittelten verkehrlichen Potenziale der Verkehrsbeeinflussung als unkritisch anzusehen.

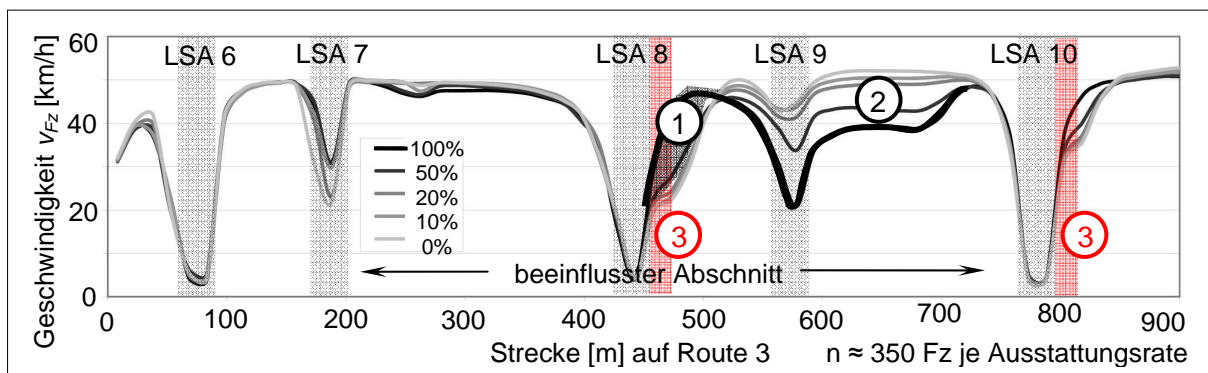


Abbildung 4-24: Fahrlinien unter Betrachtung negativer Auswirkungen

Abgesehen von der genannten Grenze der Untersuchungsmethodik ist die nicht kooperationsfähig ausgerüstete LSA 9 im Streckenabschnitt als kritisch zu benennen. Das Simulationsmodell spiegelt hier die realen Gegebenheiten wider. Die Geschwindigkeitsempfehlung nach Passieren der LSA 8 wird für LSA 10 berechnet. Ausgestattete Fahrzeuge fahren an LSA 9 auf Rot. Der Einbruch der Geschwindigkeit wird im Diagramm durch Bereich ② verdeutlicht. Bei der Installation und Inbetriebnahme eines telematischen Gesamtsystems sollten zwingend alle im Streckenzug bzw. in der Netzmasche befindlichen

Lichtsignalanlagen kooperationsfähig ausgestattet werden, um die vorgestellten negativen Auswirkungen an LSA 9 zu vermeiden.

Auf allen Routen spiegeln die Differenzflächen zwischen der Fahrlinie mit einer Ausstattungsrate von 0 % und der Fahrlinie der entsprechenden Ausstattungsrate des Vergleichsfalls das Potenzial der Verkehrsbeeinflussung wider. Es lassen sich deutliche Unterschiede zu den von RICHTER-2005 in Kapitel 2 vorgestellten Fahrtrajektorien erkennen. Um die Räumzeiten im Knotenpunkt nicht künstlich zu verlängern, ist im Konfliktbereich zunächst eine Beschleunigung auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit notwendig. Eine Anpassung der Geschwindigkeit kann somit erst nach dem Passieren des Knotenpunkts erfolgen. Sie erfolgt allmählich durch leichtes Verzögern der Fahrzeuge oder Ausrollen lassen. Dieser Punkt wurde in den Untersuchungen von RICHTER-2005 vernachlässigt.

### Fahrtrajektorien der Messfahrten

Zur Prüfung der simulativ gewonnenen Erkenntnisse wurden die Fahrtrajektorien einiger real durchgeführter Messfahrten denen der Simulation gegenüber gestellt. Abbildung 4-25 und Abbildung 4-26 zeigen einen qualitativen Vergleich von typischen Fahrtrajektorien ausgestatteter Fahrzeuge gegenüber nicht ausgestatteten Fahrzeugen auf den Routen 1 und 2.

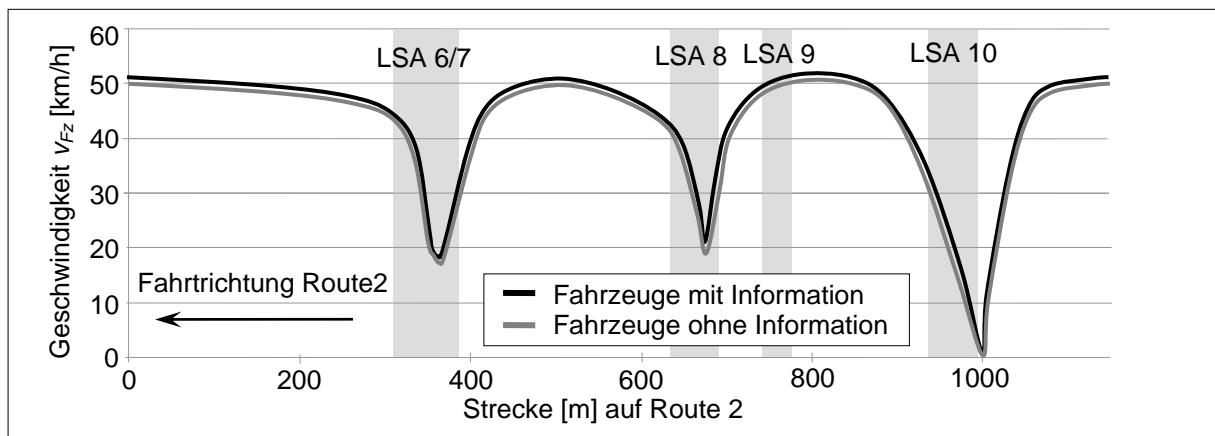


Abbildung 4-25: Fahrtrajektorien der Testfahrten auf Route 2

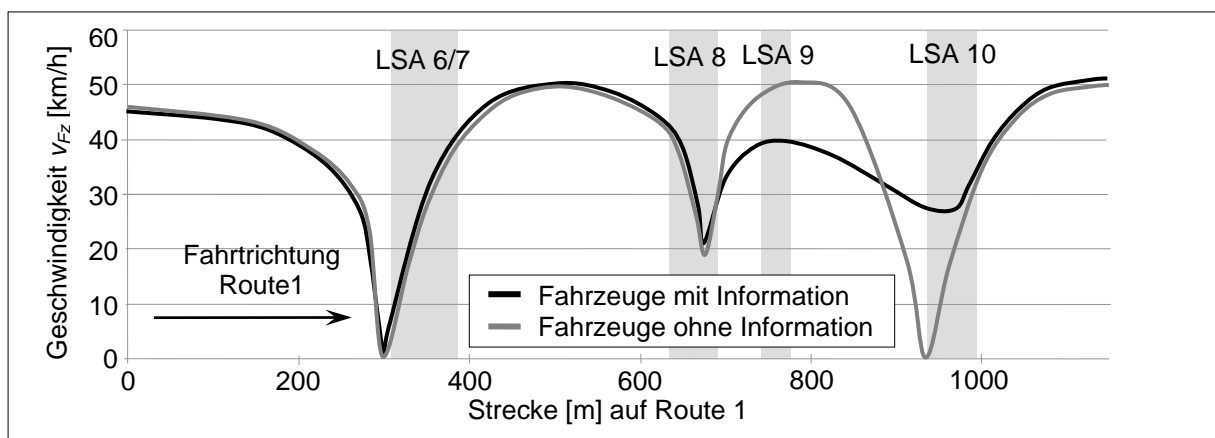


Abbildung 4-26: Fahrtrajektorien der Testfahrten auf Route 1

Beispielhaft zeigt Abbildung 4-25 die qualitativen Fahrtrajektorien der Route 2 beeinflusster und nicht beeinflusster Fahrer. Die Fahrtrichtung ist im Diagramm von rechts nach links dargestellt. Die Vergleichbarkeit beider gegenläufiger Routen ist so einfach möglich. Route 2

entspricht einer Fahrrelation mit planerisch hinterlegter Grüner Welle und statischer Progressionsgeschwindigkeit von 50 km/h. Aus der zusätzlichen Anzeige der Geschwindigkeitsempfehlung resultiert daher kein verkehrlicher Nutzen.

Anders verhält sich dies bei Fahrten der Gegenrichtung auf Route 1, welche von links nach rechts in Abbildung 4-26 dargestellt sind. Aufgrund der verschiedenen Knotenpunktabstände ist eine Koordinierung in beiden Richtungen mit statischer Progressionsgeschwindigkeit nicht möglich. Es lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den Fahrlinien der ausgestatteten und der nicht ausgestatteten Fahrzeuge erkennen. Während nicht ausgestattete Fahrzeuge an LSA 10 zum Halten kommen, reduzieren die ausgestatteten Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit auf ca. 30 km/h infolge der geringen Zeitdifferenz von 10 s zwischen theoretischer Fahrzeit mit Höchstgeschwindigkeit und Versatzzeit. Die ausgestatteten Fahrzeuge beschleunigen zunächst identisch wie die nicht ausgestatteten Fahrzeuge und passen ihre Fahrgeschwindigkeit ab der Verfügbarkeit der Geschwindigkeitsempfehlung dieser an.

Die quantitativ dargestellten Geschwindigkeits-Weg-Diagramme aller Mess- und Erhebungsfahrten sind dem „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ der Rubrik „Geschwindigkeitsprofile der Testfahrten“ zu entnehmen. Die Fahrlinien von Route 3 und 4 zeigen nahezu identische Verläufe der mit mobilen Endgeräten ausgestatteten und nicht ausgestatteten Fahrzeuge. Beide Routen sind nicht in die statische Grüne Welle eingepasst. Die auszugleichende Zeitdifferenz zwischen Fahrzeugankunft und Beginn der Freigabezeit ist extrem groß. Daraus resultieren sehr geringe empfohlene Geschwindigkeiten zum Erreichen der nächsten Anlage bei Grün. Diese wurden durch die Testfahrer jedoch nicht mehr akzeptiert bzw. war der Verkehrsdruck durch andere Fahrer so groß, dass die Geschwindigkeitsempfehlungen nicht mehr akzeptiert werden konnten. Die minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung lag während der Testfahrten bei etwa 20-25 km/h. Alle Geschwindigkeiten, die unterhalb dieser Grenze lagen, führten zu dichten Auffahren, Hupen und anderen teils unsicheren Situationen. Die dynamische Geschwindigkeitsempfehlung war deshalb auf diesen Routen aus verkehrlicher Sicht wirkungslos. Da die anderen Fahrzeugführer den Grund für das langsame Fahren der ausgestatteten Fahrzeuge nicht kannten, akzeptieren sie die Verkehrsbeeinflussung nicht. Bei umfassender Kenntnis und infolge weiterer Gewöhnungseffekte könnte es durchaus noch zu einer Steigerung der Akzeptanz kommen. Die ermittelten Grenzen der minimal akzeptierten Geschwindigkeit liegen somit deutlich unter den von HOFFMANN-1986 ermittelten und in Abschnitt 2.2.3 vorgestellten Werten. Damit sind mit Hilfe der kooperativen Verkehrsbeeinflussung größere verkehrliche Effekte als in der von HOFFMANN-1986 vorgestellten Untersuchung möglich, da der nutzbare Geschwindigkeitsbereich der Empfehlungen erweitert wird.

#### **Gegenüberstellung von Simulation und Messfahrten**

Hinsichtlich der Reisezeiten in den Streckenabschnitten lässt sich feststellen, dass diese sowohl in den Simulationsuntersuchungen als auch bei den Messfahrten auf nahezu allen Routen konstant bleiben. Sie sind von der Beeinflussung gänzlich unabhängig und werden lediglich durch Störungen im Verkehrsablauf und dadurch bedingte zusätzliche Halte und Wartevorgänge auf Freigaben des nächsten Umlaufs bestimmt. Erhöhungen der Reisezeiten sind damit meist Vielfache der Umlaufzeit. Die Umlaufzeit an den Knotenpunkten der

Simulations- und Messstrecken betrug 90 s. Tabelle 4-5 zeigt die ermittelten Reisezeiten der Messfahrten zusammengefasst. Trotz der verhältnismäßig kleinen Stichprobe werden die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen, dass bei keiner Änderung der Signalsteuerung auch keine Einsparungen an Reisezeiten resultieren, durch die realen Mess- und Erhebungsfahrten bestätigt.

Tabelle 4-5: Reisegeschwindigkeit mit/ohne Verkehrsbeeinflussung

Fahrt	ausgestattet					nicht ausgestattet		
	1 [s]	2 [s]	3 [s]	4 [s]	5 [s]	1 [s]	2 [s]	3 [s]
Route 1	156	167	164	163		168	163	
Route 2	125	116	116			98	111	196
Route 3	216	203	187	212	213	287	135	214
Route 4	117	112	168	189	119	107	102	106

Des Weiteren wurde die Beschleunigung der Fahrzeuge während der realen Messfahrten aufgenommen und ausgewertet. Die durchschnittliche Beschleunigung  $\bar{a}$  der Messfahrten über alle Routen  $n$  und Fahrzeuge  $i$  wird wie folgt berechnet:

$$\bar{a} = \frac{1}{i} \cdot \sum_{\text{Routen}}^i \left( \frac{1}{n} \cdot \sum_{\text{Fahrzeuge}}^n |a_{n,i}| \right) \quad (4-12)$$

$\bar{a}$  mittlere Beschleunigung über alle Routen  $i$  und Fahrzeuge  $n$

Die Gegenüberstellung der betragsmäßigen Beschleunigungswerte, unterschieden nach Routen und Ausstattung, können Abbildung 4-27 entnommen werden. Die Einzelwerte sind in einer Tabelle im „Anhang D: Verkehrsbeeinflussung“ in der Rubrik „Beschleunigungsmittelwert der Testfahrten“ zusammengefasst.

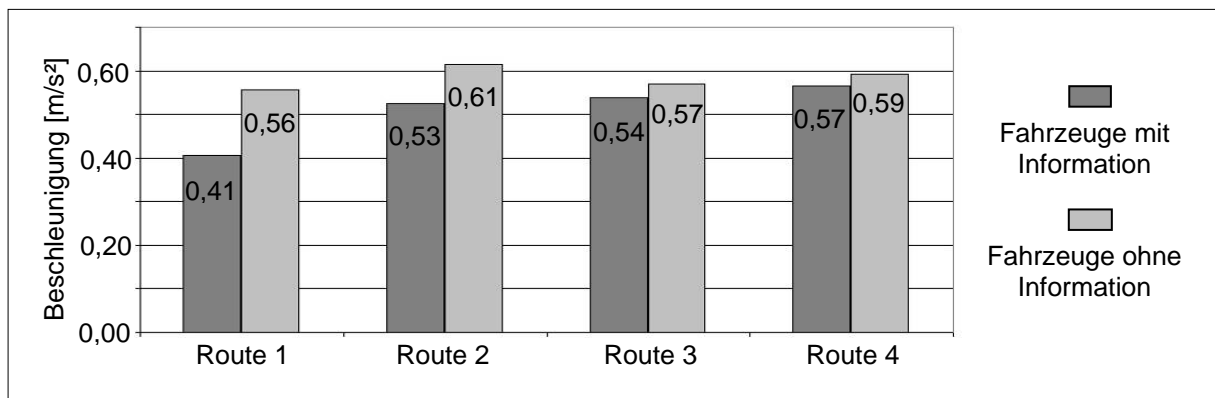


Abbildung 4-27: Mittlere Beschleunigung mit/ohne Verkehrsbeeinflussung

Der Betrag der Beschleunigung dient als Maß der Stetigkeit des Verkehrsflusses. Fahrzeugführer, welche die Geschwindigkeitsempfehlung in der Zufahrt des signalisierten Knotenpunkts erhalten, fahren vorausschauender auf die Anlage zu. Im Mittel ergeben sich auf allen Routen geringere durchschnittliche Beschleunigungen von ca. 10 % gegenüber den nicht informierten Fahrern.

Während der Testfahrten konnte die Pulkbildung im Streckenabschnitt gut nachvollzogen und beobachtet werden. Aufgrund der einstreifigen Verkehrsführung ist ein Überholen



nahezu ausgeschlossen. Alle dem ausgerüsteten Fahrzeug folgenden Fahrzeuge mussten so ihre Fahrgeschwindigkeit anpassen. Nahezu alle in der Simulation ermittelten Ergebnisse können auch im realen Testfeld nachgewiesen und belegt werden. Die Haupteinflüsse Ausstattungsrate, Koordinierungsmaß, minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung und die Fahrrelation im Streckenabschnitt haben einen wesentlichen Einfluss auf die verkehrliche Wirksamkeit der kooperativen Verkehrsbeeinflussung. Da die realen Mess- und Untersuchungsfahrten nur in einem Testfeld durchgeführt wurden, ist der Nachweis über die Auswirkungen der Anzahl der durchgehenden Fahrstreifen auf den Verkehrsablauf nicht möglich. Durch die geringe Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge während der Messfahrten und durch teils nicht quantifizierbare externe Fehlereinflüsse sowie infolge des individuell sehr unterschiedlichen Umgangs mit der Geschwindigkeitsempfehlung konnten teilweise nur Tendenzen nachgewiesen werden. Die in der Simulation belegten Einsparungspotenziale stellen damit den Optimalfall dar und können in der Realität geringer ausfallen.

### 4.3.5 Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen

Aus den vorgestellten Auswertungen lässt sich erkennen, dass hauptsächlich zeitlich-physikalische Belange einen Einfluss auf den verkehrlichen Nutzen der Beeinflussung des Fahrverhaltens mit Hilfe der Geschwindigkeitsinformation haben. Die Untersuchungen konnten belegen, dass im Bereich von guten bis sehr guten Koordinierungen kaum verkehrliche Effekte mittels dynamischer Geschwindigkeitsempfehlungen zu erzielen sind. Begründet ist dies in mehreren Fakten, welche im Folgenden genannt und erläutert werden sollen.

Ein wesentlicher Einflussfaktor ist die Grenze der akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung  $v_{Empf,akz}$ . Sie liegt zwischen sehr geringen akzeptierten Geschwindigkeiten und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit  $v_{zul}$  und ist im Diagramm der Abbildung 4-28 auf der Abszisse abgetragen. Den funktionalen Zusammenhängen der Abbildung 4-28 und Abbildung 4-29 wird eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h unterstellt. Die auszugleichende Restrotzeit  $t_{ROT}$  bei Ankunft des Fahrzeugs mit der Berücksichtigung der Zeit für den Abbau des Rückstaus ist der zweite Einflussfaktor und wurde bereits über Gleichung (4-5) beschrieben. Diese Zeitdifferenz ist auf der Ordinate abgetragen.

Eine Restrotzeit von mehr als 140 s kommt in der Realität selten vor, da die Umlaufzeit der Anlagen oft schon einen geringeren Wert annimmt. Die Entfernung zum Knotenpunkt bzw. auf den Rückstau  $x_{LSA}$ , berechnet über Gleichung (4-1), spielt für die Ermittlung der Geschwindigkeitsempfehlung eine entscheidende Rolle und ist der dritte Einflussfaktor. Im Diagramm ist diese bis zu 1.000 m dargestellt. Der Abstand von signalisierten Knotenpunkten im innerstädtischen Bereich überschreitet nur selten diesen Wert. Die markierten Flächen in Abbildung 4-28 visualisieren die Einsatzbereiche der Verkehrsbeeinflussung unter Berücksichtigung der zuvor aufgelisteten drei Einflussfaktoren. Alle außerhalb der hinterlegten Bereiche befindlichen Kombinationen der Faktoren sind für den Einsatz ungeeignet. Als Grundlage für Abbildung 4-28 dient Gleichung (4-13).

$$t_{ROT} = \frac{x_{LSA}}{v_{Empf,akz}} - \frac{x_{LSA}}{v_{zul}} \quad (4-13)$$

$t_{ROT}$  LSA: Restrotzeit bei Ankunft des Fahrzeugs  
 $v_{Empf,akz}$  minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung  
 $v_{zul}$  zulässige Höchstgeschwindigkeit  
 $x_{LSA}$  Fahrstrecke des Fahrzeugs bis Haltlinie oder Rückstau

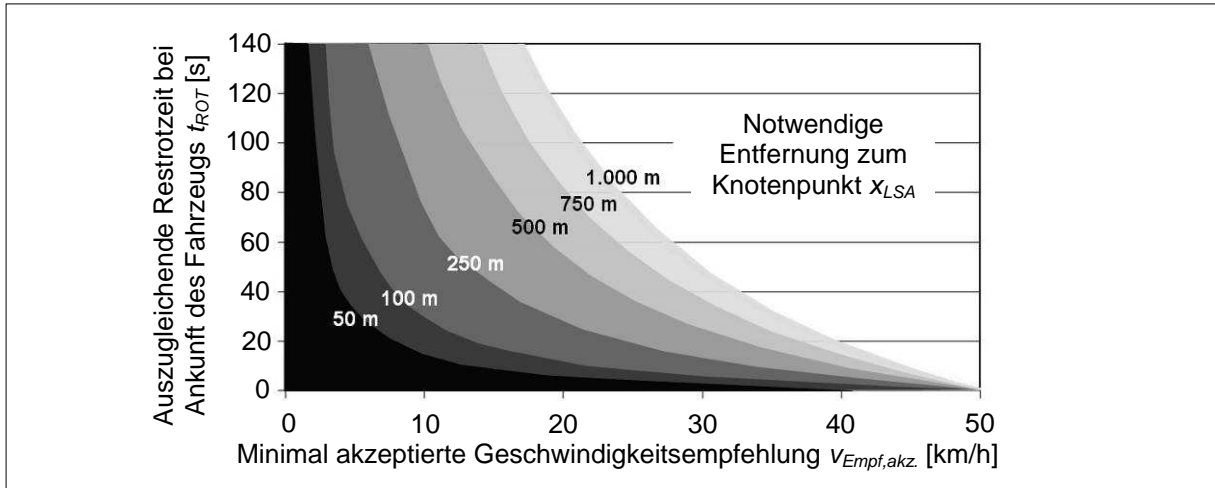


Abbildung 4-28: Einfluss Streckengeometrie auf die Verkehrsbeeinflussung – Darstellung

Abbildung 4-29 zeigt eine ähnliche, jedoch dreidimensionale Darstellung eines Diagramms. Zielgröße ist hierbei die empfohlene Geschwindigkeit, welche ermittelt wird, um den stromabwärtigen Knotenpunkt bei Grün zu erreichen. Nach Umstellung von (4-13) folgt:

$$v_{Empf} = \frac{x_{LSA}}{t_{ROT} + \frac{x_{LSA}}{v_{zul}}} \quad (4-14)$$

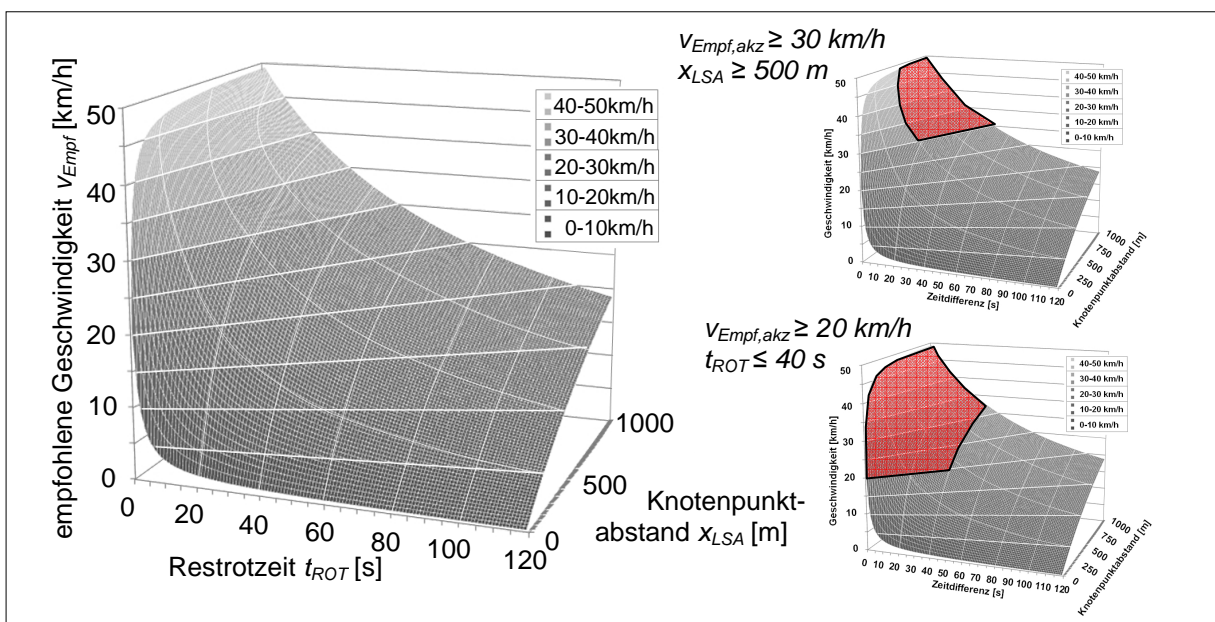


Abbildung 4-29: Einfluss der Streckengeometrie Verkehrsbeeinflussung – Beispiel

Das linke Diagramm der Abbildung 4-29 zeigt die Gesamtpotenziale der Funktion der kooperativen Verkehrsbeeinflussung als konvex dargestelltes Flächendiagramm. Im rechten Teil der Abbildung 4-29 sind beispielhaft zwei Diagramme dargestellt, die deutlich zeigen, in welchem Maß sich die Potenziale des verkehrlichen Nutzens reduzieren, wenn sich die Kriterien Knotenpunkt Abstand oder Restrotzeit als Randbedingung ändern. Im oberen Diagramm ist der Bereich markiert, der verbleibt, wenn die minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung größer oder gleich 30 km/h und der Knotenpunkt Abstand größer als 500 m ist. Die mögliche ausgleichbare Restrotzeit wird dargestellt. Das untere Diagramm zeigt die Einsatzbereiche bei einer minimal akzeptierten Geschwindigkeit von größer als 20 km/h und einer Restrotzeit von kleiner oder gleich 40 s. Der Knotenpunkt Abstand, welcher für den Ausgleich der Restrotzeit unter Annahme der minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung verfügbar sein muss, wird mittels des markierten Bereichs des Funktions Teppichs dargestellt.

Aus den gezeigten Beispielen wird deutlich, dass die Verkehrsbeeinflussung ihre größten Potenziale bei geringen auszugleichenden Restrotzeiten bei Ankunft der Fahrzeuge an der LSA, bei großen Knotenpunkt Abständen und bei der Befolgung nahezu aller empfohlener Geschwindigkeiten entfaltet. Ersichtlich ist dies sowohl aus den vorgestellten Zusammenhängen dieses Abschnitts als auch aus der Diskussion der Einflussfaktoren in den Abschnitten 4.3.3 und 4.3.4.

Bei einem Auslastungsgrad der LSA-Freigabezeiten von über 85 Prozent sollte auf die Anzeige der Geschwindigkeitsempfehlungen verzichtet werden. Hier haben auch herkömmliche Grüne Wellen ihre Einsatzgrenzen. Die Verkehrsbeeinflussung würde zu gegenseitigen Behinderungen der Fahrzeuge verschiedener Fahrrelationen und somit zu zusätzlichen Instabilitäten im Streckenabschnitt führen. Es käme zu Kapazitätsminderungen. Innerhalb der Einsatzgrenzen der Grünen Welle kann die Information der dynamischen Geschwindigkeitsempfehlung als Funktion der kooperativen Verkehrsbeeinflussung die Kapazität der Knotenpunkte nicht erhöhen, mindert sie aber unter Berücksichtigung der vorgestellten Randbedingungen auch nicht ab. Die Qualität des Verkehrsablaufs kann durch die stärkere Pulkung im Streckenabschnitt und die Vermeidung von Anfahrvorgängen partiell sogar verbessert werden.

### 4.4 Zusammenfassung

Untersuchungsgegenstände zur Änderung der Qualität des Verkehrsablaufs mittels der Beeinflussung des Fahrverhaltens infolge der kooperativen Verkehrsbeeinflussung dieses Kapitels waren die Anzeige der Restzeitinformation und der Geschwindigkeitsinformation. Die Anzeige der Restzeitinformation kann zu einer Reduktion von Emissionen infolge einer sinnvollen Motorabschaltung bei entsprechender Ausrüstung der Fahrzeuge führen. Das Hauptaugenmerk lag jedoch auf der Geschwindigkeitsinformation, da diese einen wesentlich größeren Einfluss auf den Verkehrsablauf hat, als die Anzeige der Restzeitinformation.

Die verkehrliche Wirksamkeit der dynamischen Geschwindigkeitsinformation wird durch folgende Einflüsse bestimmt:

1. Ausstattungsrate der kooperationsfähigen Fahrzeuge in der Fahrzeugflotte
2. Koordinierungsmaß der signalisierten Knotenpunkte untereinander
3. Anzahl der durchgehenden Richtungsfahrstreifen
4. minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung
5. geometrische und zeitliche Bedingungen im Straßennetz
  - a. Abstand der Knotenpunkte
  - b. zeitliche Differenz zwischen der Fahrzeugankunft und dem Grünbeginn
6. Fahrrelation im Streckenzug

Die Einflüsse der einzelnen Faktoren, welche in den vorangestellten Forschungshypothesen H 4-2 und H 4-3 auf Seite 49 vermutet wurden, konnten mit Hilfe der Simulation quantifiziert werden. In weiterführenden Testfahrten wurden die simulativ ermittelten Ergebnisse mit den tatsächlichen Erhebungsdaten belegt.

Gerade hinsichtlich der Fahrrelation im Streckennetz, welche als wesentlicher Einflussfaktor in Hypothese H 4-3 unterstellt wurde, gilt es zu beachten, dass die Beeinflussung der Fahrgeschwindigkeiten auch durchaus negative Effekte auf den Verkehrsablauf haben kann. Einsatzbereich und -grenzen der Verkehrsbeeinflussung bezüglich der Fahrrelation werden in Abbildung 4-30 graphisch verdeutlicht.

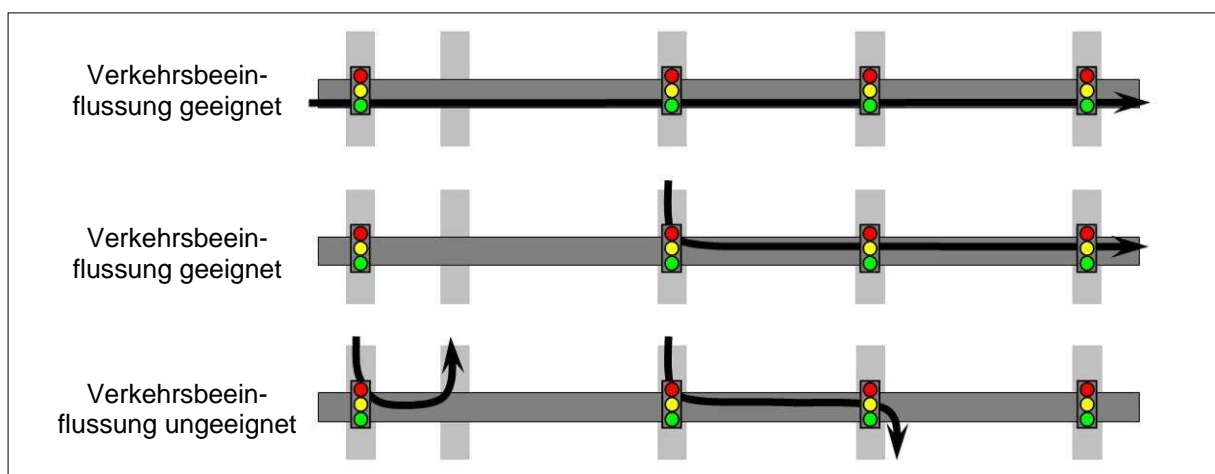


Abbildung 4-30: Einfluss Routenwahl auf Verkehrsbeeinflussung

Sowohl für Ströme auf einer Hauptachse als auch für alle in die Grüne Welle einbiegende Ströme birgt die Übertragung von Geschwindigkeitsempfehlungen Möglichkeiten der Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs. Existieren hingegen starke Abbiegeströme aus der Hauptstrecke der Grünen Welle, so sollte auf eine Geschwindigkeitsempfehlung verzichtet werden. Die abbiegenden Fahrzeuge können dann unter Umständen durch die informierten Fahrzeuge der Hauptrichtung negativ beeinflusst und blockiert werden. Ab welchem Kenntnisgrad des telematischen Gesamtsystems die Akzeptanz der nicht informierten Fahrzeugfahrer groß genug ist, dass sie die ausgestatteten nicht mehr überholen, muss durch weitere Untersuchungen festgestellt werden.

Im Zuge der Simulationsuntersuchung wurden die Steuerungen der Lichtsignalanlagen nicht an das aktuelle Verkehrsgeschehen angepasst. Lediglich die Fahrer wurden über aktuelle und zukünftige Steuerungsentscheidungen informiert. Somit kam es auf den Untersuchungsstrecken weder zur Verkürzung oder Verlängerung der Reisezeiten noch zu einer Minderung oder Erhöhung der Kapazität. Durch die Übermittlung von Geschwindigkeitsempfehlungen kommt es zu einer Verdichtung des Fahrzeugstroms innerhalb der Zuflussstrecken der Lichtsignalanlagen, zu einer Entstehung von Fahrzeugpuls sowie zu einer Harmonisierung des Verkehrsablaufs. Neben der Verkehrssteuerung über LSA ist die Beeinflussung des Fahrverhaltens, wie in Hypothese H 4-1 vermutet wurde, ebenfalls ein wirksames Instrument zur Verbesserung der Qualität des innerstädtischen Verkehrsablaufs.

Im Vergleich mit den vorangestellten Ergebnissen der Untersuchungen zur „Wolfsburger Welle“ HOFFMANN ET AL.-1986 lassen sich viele Parallelen ziehen. Die Abnahme der Reisezeit war im Testfeld Wolfsburg nur minimal, in den Simulationsuntersuchungen geht sie gegen Null. In beiden Untersuchungen lässt sich eine deutliche Reduktion der Anzahl der Halte sowie der Wartezeit erkennen. Überhöhte Geschwindigkeiten zum Erreichen des stromabwärtigen Knotenpunkts zur vorherigen Freigabe können durch restriktive Sperrung der Anzeige unterbunden werden.

Neben Streckenabschnitten, die heute schon gut koordiniert werden können und in denen die Beeinflussung der Fahrgeschwindigkeit wenig Wirkung auf den Verkehrsablauf zeigt, gibt es Streckenabschnitte die aus den unterschiedlichsten Gründen nicht adäquat in eine Koordinierung einbezogen werden können. Auf diesen Streckenabschnitten bestehen die größten Potenziale der hier vorgestellten kooperativen Verkehrsbeeinflussung.

Bei Auslastungsgraden der Zufahrten von über 85 % ist es auch mit dieser kooperativen Anwendung nicht mehr möglich sinnvolle Informationen zu übermitteln und somit die Qualität des Verkehrsablaufs zu verbessern. Aufgrund der sich einstellenden negativen Einflüsse auf die Kapazität sollte in diesem Fall auf die Anzeige von Geschwindigkeitsempfehlungen verzichtet werden. Generell lässt sich sagen, je länger der zur Verfügung stehende Streckenabschnitt ist, je niedriger die akzeptierte Grenze der Geschwindigkeitsempfehlung ist und je kleiner die auszugleichende Zeitdifferenz zwischen Fahrzeit und Versatzzeit der Knotenpunkte ist, desto größer ist die erzielbare verkehrliche Wirksamkeit der kooperativen Verkehrsbeeinflussung. Ist die auszugleichende Zeitdifferenz zwischen Fahrzeit und Versatzzeit gleich Null, besteht eine statisch gut koordinierte Grüne Welle und die dynamische Geschwindigkeitsempfehlung zeigt keinen zusätzlichen Nutzen. Das Optimum des Nutzens des kooperativen Systems ist im Zusammenspiel des Fahrers mit der Lichtsignalanlage zu sehen. Das Fahrverhalten kann einerseits über aktuelle und prognostizierte Entscheidungen der Steuerung beeinflusst werden, andererseits kann der Erfassungshorizont mittels mobil erfasster individueller Verkehrskenngrößen erweitert werden. Die diesem Kapitel vorangestellte Forschungshypothese H 4-4 kann somit noch nicht bewiesen werden. Im nächsten Kapitel werden die mobil erfassten Verkehrskenngrößen für die kooperative Verkehrssteuerung näher untersucht.

## 5 Kooperative Verkehrssteuerung

### 5.1 Problemstellung

Hauptfokus dieser Arbeit ist die Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs infolge eines erhöhten fahrerseitigen und LSA-seitigen Informationsgehalts durch den wechselseitigen Datenaustausch im telematischen Gesamtsystem. In diesem Kapitel sollen die funktionalen Zusammenhänge zwischen den mobil erfassten Verkehrskenngrößen ermittelt werden. Mobil erfasste Daten sind aus der Fahrzeugortung stammende Daten wie geographische Breite und Länge, Fahrgeschwindigkeit sowie Fahrtrichtung. Daraus lassen sich Informationen wie Abstand des Fahrzeugs zum Knotenpunkt oder mobil erfasste Kenngrößen wie Reisezeit, Wartezeit, Anzahl der Halte oder die Rückstaulänge ableiten. Infrastrukturseitig können diese individuellen Kenngrößen zum Abbilden der aktuellen Verkehrssituation und für die Optimierung der Lichtsignalsteuerung genutzt werden. Aufgrund des erheblich erweiterten Erfassungshorizonts der mobilen Datenerfassung gegenüber der herkömmlichen stationären Datenerfassung kann bei entsprechender Ausstattungsrate ein räumlich-zeitlich konsistentes Verkehrslagebild ermittelt werden. Die Erfassung der aktuellen Verkehrssituation und die Anpassung der Signalsteuerung werden in dieser Arbeit als kooperative Verkehrssteuerung definiert. Im Gegensatz zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung, welche einen empfehlenden Charakter hat, ist die kooperative Verkehrssteuerung als rechtlich bindend anzusehen.

Die funktionalen Zusammenhänge zwischen den mobil erfassten Kenngrößen sind heute weitgehend unerforscht. Je nach Verkehrssituation innerhalb der Zufahrt werden für das Abbilden der aktuellen Verkehrslage unterschiedliche Kenngrößen von Interesse sein. Ein Ziel dieses Kapitels wird es sein, die Frage zu klären, mit welchen mobil erfassten Verkehrskenngrößen die aktuelle Verkehrssituation hinreichend genau ermittelt werden kann. Eine notwendige Mindestausstattungsrate kooperationsfähiger Fahrzeuge im Fahrzeugkollektiv ist hierfür Voraussetzung. Infolge eines genauen Abbilds der Verkehrslage mittels FCD kann es zur Einsparung stationärer Erfassungseinrichtungen kommen.

#### **Forschungshypothesen:**

- 
- |       |  |
|-------|--|
| H 5-1 | Zwischen den für die LSA-Steuerung relevanten mobil erfassten Daten bestehen funktionale Zusammenhänge. Für die Anpassung der Signalisierung an die aktuelle Verkehrslage genügt eine Auswahl dieser mobil erfassten Kenngrößen. |
|-------|--|
- 
- |       |   |
|-------|---|
| H 5-2 | Die Anzahl der ausgestatteten Fahrzeuge hat einen Einfluss auf die Qualität der Lichtsignalsteuerung mittels mobil erfasster Daten. Es gibt einen Schwellwert, ab dem auf den Einsatz stationärer Erfassungseinrichtungen verzichtet werden kann. |
|-------|---|
- 
- |       |  |
|-------|--|
| H 5-3 | Das Gesamtsystem zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung entfaltet die volle Wirkung im Zusammenspiel zwischen der Beeinflussung des Fahrverhaltens und der Steuerung der LSA auf Grundlage mobil erfasster Verkehrskenngrößen. |
|-------|--|
-

## 5.2 Gegenüberstellung mobil erfasster Parameter

### 5.2.1 Untersuchungsmethodik

Hauptvorteil und Ansatzpunkt des kooperativen Systems zur Verkehrssteuerung ist die Einbindung der mobil gewonnenen Daten zur detaillierten Nachbildung der aktuellen Verkehrssituation. Mobil erfasste individuelle Daten bieten prinzipiell ein breites Spektrum an ableitbaren verkehrlichen Kenngrößen. Für die Abschätzung der Verkehrssituation und die Bestimmung der Qualität des Verkehrsablaufs muss eine Selektion vorgenommen werden. Die Auswahl der mobil zu erfassenden Parameter erfolgt auf der Grundlage der in Abschnitt 2.3.3 zusammengestellten kollektiven Qualitätskenngrößen des Verkehrsablaufs. Die aufschlussreichsten mobil gewonnenen Verkehrskenngrößen zur Bestimmung der Qualität einer Zufahrt sind die Wartezeit, die Verlustzeit und die Rückstaulänge. Zur Ermittlung der Qualität im Streckenabschnitt und des Maßes der Koordinierung wird ergänzend die Kenngröße Anzahl der Halte erfasst. Die Reisezeit sowie weitere Daten des individuellen Fahrtverlaufs können für die netzweite Betrachtung der Qualität des Verkehrsablaufs genutzt werden. Da hinsichtlich der Definitionen der mobil und individuell erfassten Daten in der Literatur keine einheitlichen Angaben zu finden sind, werden nachfolgend für die Untersuchung relevante Verkehrskenngrößen definiert.

**Wartezeit**  $t_{FCD,WARTE}$ : Die Wartezeit ist in dieser Arbeit definiert als die Haltezeit von Fahrzeugen innerhalb einer Zufahrt signalisierter Knotenpunkte zuzüglich der Zeiten, die beim Aufrücken im Staubereich bis zum Passieren der Haltlinie entstehen. Die Erfassung der Wartezeit startet, sobald das kooperationsfähige Fahrzeug zum Stehen kommt ( $v_{Fz} = 0$  km/h). Die Wartezeit umfasst alle Aufrückvorgänge innerhalb des Staubereichs. Es werden die Zeitstempel des Einfahrens in den Staubereich  $t_{FCD,STAU}^*$  und des Passierens der Haltlinie  $t_{HI}^*$  erfasst.

$$t_{FCD,WARTE} = t_{HI}^* - t_{FCD,STAU}^* \quad (5-1)$$

$t_{FCD,WARTE}$  mobil erfasste Wartezeit  
 $t_{FCD,STAU}^*$  Zeitstempel des ersten Halts bedingt durch den Rückstau der LSA  
 $t_{HI}^*$  Zeitstempel beim Überfahren der Haltlinie

**Verlustzeit**  $t_{FCD,VERLUST}$ : Die Verlustzeit wird in dieser Arbeit als die Zeitdifferenz zwischen der Fahrzeit mit ermittelter Reisegeschwindigkeit  $v_R$  und der Zeit der freien Fahrt mit Wunschgeschwindigkeit  $v_W$  im Streckenabschnitt  $x$  definiert. Technisch ist die Verlustzeit schwer zu ermitteln, da die Wunschgeschwindigkeit der Fahrer oft nicht bekannt ist und zwischen den einzelnen Fahrergruppen starken Streuungen unterliegt.

$$t_{FCD,VERLUST} = \frac{x}{v_R} - \frac{x}{v_W} \quad (5-2)$$

$t_{FCD,VERLUST}$  mobil erfasste Verlustzeit  
 $v_R$  Reisegeschwindigkeit im durchfahrenen Streckenabschnitt  
 $v_W$  Wunschgeschwindigkeit im durchfahrenen Streckabschnitt  
 $x$  Wegstrecke des durchfahrenen Streckenabschnitts

**Rückstaulänge  $x_{FCD,STAU}$ :** Die Ermittlung der Rückstaulänge in der Zufahrt zum Zeitpunkt der Ankunft des ausgestatteten Fahrzeugs erfolgt, sobald das Fahrzeug zum Stehen kommt ( $v_{Fz} = 0$  km/h). Sie wird als Abstand zwischen der Position der Haltlinie  $x_{HI}^*$  und der georeferenzierten Fahrzeugposition  $x_{Fz,STAU}^*$  ermittelt.

$$x_{FCD,STAU} = x_{Fz,STAU}^* - x_{HI}^* \quad (5-3)$$

$x_{FCD,STAU}$  mobil erfasste Staulänge bei Ankunft des ausgestatteten Fahrzeugs  
 $x_{Fz,STAU}^*$  Position des Fahrzeugs bei Einfahrt in den Stau  
 $x_{HI}^*$  Position der Haltlinie in der Zufahrt

**Anzahl der Halte  $n_{FCD,HALTE}$ :** Die Anzahl der mobil erfassten Halte gibt an, wie oft ein Fahrzeug im Bereich einer Zufahrt zum Stehen ( $v_{Fz} = 0$  km/h) kommt. Zwischen zwei Einzelhalten liegt immer ein Beschleunigungsvorgang. Die Dauer des Beschleunigungsvorgangs ist irrelevant.

### Simulationsmodell und Simulationsszenarien

Für die Erforschung der Zusammenhänge der mobil erfassten Verkehrskenngrößen untereinander sowie für die Ermittlung der notwendigen Ausstattungsraten wurde eine Simulationsuntersuchung durchgeführt. Als Werkzeug der Simulationsuntersuchung diente die mikroskopische Simulationsumgebung VISSIM 5.10. Zur Untersuchung der Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen mobil erfassten Verkehrskenngrößen wurden deren funktionale Zusammenhänge in der Zufahrt eines signalisierten Knotenpunkts ermittelt. Ergebnis war die Bestimmung der wesentlichen mobil erfassten Parameter zur Abbildung der aktuellen Verkehrssituation. Die Prinzipskizze des Simulationsmodells ist Abbildung 5-1 zu entnehmen.

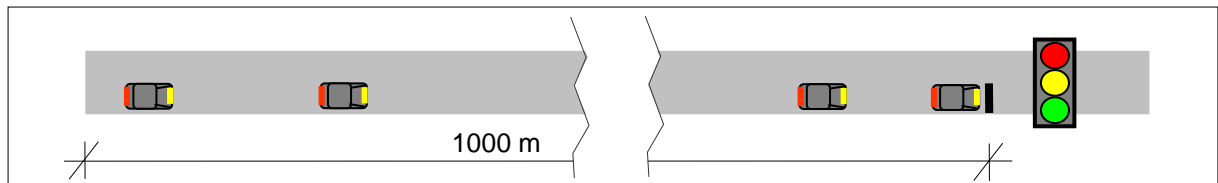


Abbildung 5-1: Simulationsmodell Signalgruppeneinfahrt

Die Untersuchungsstrecke wies eine Länge von 1.000 m auf. Eine größere Ausdehnung der Zufahrten war im Rahmen der simulativen Untersuchungen nicht notwendig. Einerseits sind die Knotenpunktabstände im innerstädtischen Straßennetz oft kleiner als 1.000 m und andererseits verlängern sich mit größerem Abstand der Fahrzeuge zum Knotenpunkt die Fahrzeit und auch die Reaktionszeit für Steuerungsentscheidungen der kooperativen Lichtsignalsteuerung.

Da es sich um vergleichende Simulationsuntersuchungen handelte, wurden die Standardmodellparametersätze des implementierten Fahrverhaltens während aller Simulationsläufe unverändert gelassen. Die mobil erfassten Kenngrößen verhielten sich so relativ identisch zueinander. Der absolute Fehler beeinträchtigte die abgeleiteten Aussagen der Vergleichsuntersuchung nicht. Die Wunschgeschwindigkeitsverteilung wurde als gleichverteilt im Bereich zwischen 48 und 58 km/h angenommen. Die Realisierung der kooperativen Anwendungen im Simulationswerkzeug erfolgte über die vorhandene VISSIM-COM-



Schnittstelle. Das Auslesen der mobil erfassten Daten wurde mit Hilfe eines eigens entwickelten Softwaremoduls realisiert.

Zur Erforschung der funktionalen Zusammenhänge zwischen den mobil erfassten Verkehrskenngrößen wurden bei den verschiedenen Simulationsläufen wesentliche Parameter der Signalsteuerung und des Verkehrsablaufs variiert. Dies waren die Verkehrsstärken, die Freigabezeitanteile, welche den Anteil der Freigabezeit an der Umlaufzeit widerspiegeln, und die daraus resultierenden Auslastungsgrade. Die mobil erfassten Kenngrößen wurden von jedem Fahrzeug sekundlich protokolliert. Für die spätere Gegenüberstellung der Zusammenhänge hinsichtlich der Verkehrssituation wurde zwischen gesättigten bzw. übersättigten Zufahrten und nicht gesättigten Zufahrten hinsichtlich der Freigabezeit unterschieden. Der Freigabezeitbedarf von gesättigten bzw. übersättigten Zufahrten lag gleich bzw. über der verfügbaren Freigabezeit. Ein konstanter bzw. ständig wachsender Rückstau innerhalb der Zufahrt war charakteristisch. Die Zuflussverkehrsmenge war gleich oder infolge der zu geringen Freigabezeit größer der Abflussverkehrsmenge. In den Simulationsläufen wurde die Zuflussverkehrsstärke auf 700 Fz/h bei einem konstanten Freigabezeitanteil von 30 % festgelegt. Es wurden Umlaufzeiten von 60 s, 80 s, 100 s und 120 s untersucht. Dem gegenüber standen nicht gesättigte Zufahrten mit einer Auslastung der Freigabezeit von unter 100 %. Der entstehende Rückstau in der Zufahrt konnte während eines Umlaufs komplett abfließen. Fahrzeuge kamen maximal einmal in der Zufahrt zum Halten. Die Wartezeiten waren dank der ausreichend langen Freigabezeit kleiner als die Umlaufzeit der Lichtsignalanlage. Während der Simulationsuntersuchungen wurden in diesem Szenario eine Zuflussverkehrsstärke von 300 Fz/h und ein Freigabezeitanteil von 30 % unterstellt. Um den Einfluss des Freigabezeitanteils und die Lage der Freigabezeit nicht unberücksichtigt zu lassen, wurden zusätzlich Analysen mit geänderten Freigabezeitanteil von 20 %, geänderter Verkehrsstärke von 500 Fz/h und geänderter Lage der Freigabezeit im Umlauf durchgeführt. Die Länge sowie die Lage der Freigabezeiten im Umlauf aller Szenarien sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Parameter des Simulationsmodells der Signalgruppenezufahrt

Umlaufzeit	Freigabezeit	Sperrzeit	Freigabezeitanteil
$t_U = 60 \text{ s}$	Sekunde 30 bis 48	42 s	$f = 0,30$
$t_U = 80 \text{ s}$	Sekunde 40 bis 64	56 s	$f = 0,30$
$t_U = 100 \text{ s}$	Sekunde 50 bis 80	70 s	$f = 0,30$
$t_U = 120 \text{ s}$	Sekunde 60 bis 96	84 s	$f = 0,30$
$t_U = 100 \text{ s}$	Sekunde 30 bis 50	80 s	$f = 0,20$

Den Simulationsuntersuchungen lag ein Festzeitprogramm mit konstanter Umlaufzeit und konstanter Freigabezeit während eines Simulationslaufs zugrunde. Aussagen zu den funktionalen Zusammenhängen zwischen den mobil erfassten Kenngrößen bei verkehrsabhängigen Steuerungen sollten aus den Erkenntnissen zur Festzeitsteuerung abgeleitet werden.

### Simulationsumfang

Für den Nachweis der Repräsentativität der Stichprobe musste die Anzahl der Simulationsläufe genügend groß sein. Die Anzahl der Simulationsläufe richtet sich nach dem Mittelwert

und der Streuung der zu untersuchenden Kenngröße. Da in einem Simulationsszenario gleichzeitig mehrere Verkehrskenngrößen untersucht wurden, musste im Voraus eine Simulationsdauer von 12.000 s über 10 Startzufallszahlen festgelegt werden. Über all diese Simulationsläufe wurde im Anschluss überprüft, ob der Stichprobenumfang mit vorgegebener statistischer Sicherheit und die gewünschte Genauigkeit ( $\alpha = 99\%$ ) die Grundgesamtheit repräsentativ widerspiegelt. Bei Simulationsläufen mit gesättigten bzw. übersättigten Zufahrten konnten so ca. 21.000 Fahrten ausgewertet werden. In der Gesamtheit aller Untersuchungen der einzelnen Szenarien erfolgten Auswertungen von über 125.000 Fahrten während 264.000 s Simulationsdauer. Im Zuge der Untersuchungen der gesättigten Zufahrten konnten die mobil erfassten Daten von rund 6.300 Fahrzeugen analysiert werden. Die Formelgrundlage für alle statistischen Nachweise der funktionalen Zusammenhänge und für den statistischen Nachweis der Anzahl der Simulationsläufe sind im „Anhang B: Statistische Tests und Stichprobenumfang“ und „Anhang E: Mobil erfasste Parameter“ zusammengefasst.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die funktionalen Zusammenhänge der mobil erfassten Kenngrößen Wartezeit, Verlustzeit, Rückstaulänge und Anzahl der Halte untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist die Extrahierung relevanter Daten zur Abbildung der Verkehrssituation in Abhängigkeit der Auslastung der Freigabezeit der Zufahrt.

### 5.2.2 Wartezeit und Verlustzeit

Wenn sich herausstellen sollte, dass sich die mobil erfassten Verkehrskenngrößen Wartezeit und Verlustzeit nahezu identisch verhalten, kann sich bei allen weiteren Untersuchungen auf eine der beiden konzentriert werden. Aus diesem Grund wurden die Wartezeiten und Verlustzeiten jedes ausgestatteten Fahrzeugs simulativ erfasst. Beim Überfahren der Haltlinie fand eine Übermittlung an die kooperative Lichtsignalanlage statt. Durch das sekundliche Protokollieren und Übermitteln sind diese Werte vom Charakter her auch diskret. Abbildung 5-2 zeigt die Gegenüberstellung der Kenngrößen nicht gesättigter Zufahrten im Diagramm ① und gesättigter bzw. übersättigter Zufahrten im Diagramm ②.

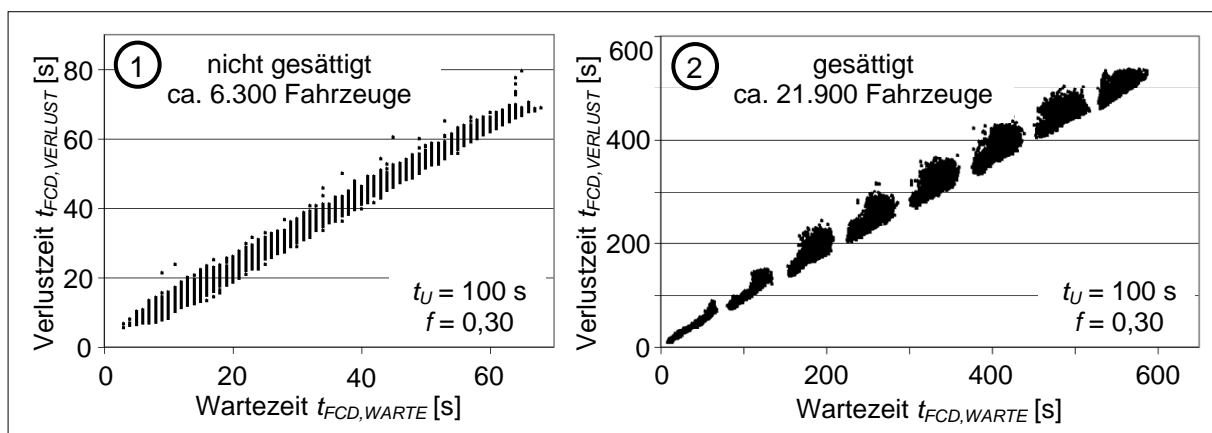


Abbildung 5-2: Gegenüberstellung von Verlustzeit und Wartezeit

Jedes Wertepaar, also jedes kooperationsfähige Fahrzeug, wird durch genau einen Punkt im Diagramm repräsentiert. Die dargestellten Diagramme wurden mit einem Freigabezeitanteil  $f = 30\%$  und einer Umlaufzeit  $t_U = 100$  s erstellt. Alle weiteren Diagramme und die

statistischen Nachweise der funktionalen Zusammenhänge können „Anhang E: Mobil erfasste Parameter“ entnommen werden. Unberücksichtigt bleiben alle Fahrzeuge, welche in der Zufahrt nicht zum Stehen kommen und deren Wartezeit somit Null ist. Zwischen den Kenngrößen lässt sich bei gesättigten bzw. übersättigten Zufahrten im Diagramm ② und bei nicht gesättigter Zufahrten im Diagramm ①, folgender linearer Zusammenhang erkennen:

$$t_{FCD,VERLUST} = a \cdot t_{FCD,WARTE} + b \quad (a, b = \text{konst.}) \quad (5-4)$$

$t_{FCD,VERLUST}$  mobil erfasste Verlustzeit  
 $t_{FCD,WARTE}$  mobil erfasste Wartezeit

In der gesättigten bzw. übersättigten Zufahrt ist die Streuung in Bereichen geringer Wartezeiten eher klein und nimmt bei größer werdenden Wartezeiten etwas zu. Grund hierfür ist die zunehmende Stop-and-Go-Verkehrsflusscharakteristik bei langen Warteschlangen im Bereich ab ca. 200 m. Es lassen sich die Grenzen der in den einzelnen Umläufen wartenden ausgestatteten Fahrzeuge anhand der Lücken zwischen den Punktwolken deutlich erkennen. Diese Lücken zwischen den Punktwolken ergeben sich als Vielfaches der Sperrzeit zuzüglich einer geringen Differenz. Tabelle 5-2 fasst die Ergebnisse in Abhängigkeit der Umlaufzeit und Freigabezeit zusammen.

Tabelle 5-2: Zusammenfassung – Lücken der Punktwolken der Wartezeiten

Umlaufzeit	Lage der gemittelten Lücken zwischen den Punktwolken	Sperrzeit	Abstand der Unstetigkeiten
$t_U = 60 \text{ s}$	50/95/140/180/230/275/320/370/405/450/500	$t_S = 42 \text{ s}$	45 s
$t_U = 80 \text{ s}$	75/125/185/230/305/370/410/485	$t_S = 56 \text{ s}$	56 s
$t_U = 100 \text{ s}$	80/160/230/300/380/460/530	$t_S = 70 \text{ s}$	76 s
$t_U = 120 \text{ s}$	100/185/280/375/465/550	$t_S = 84 \text{ s}$	92 s
$t_U = 100 \text{ s}$	90/172/255/335/402/493/586/666/748	$t_S = 80 \text{ s}$	83 s

Die Differenz zwischen Sperrzeit und Abstand der mittleren Lücken entspricht etwa 4 % bis 6 % der Sperrzeit der Lichtsignalanlage. Dieser Differenzbetrag resultiert aus der Tatsache, dass Fahrzeuge an der ersten Position nicht direkt an der Haltlinie zum Stehen kommen, sondern einige Meter in die Zufahrt hinein versetzt. Maßgebend ist hier nicht die Fahrzeugfront, sondern die Mitte des Fahrzeugs, wo sich real zumeist auch die Ortungskomponente im mobilen Endgerät befinden wird. Da laut Definition der Wartezeit aus Gleichung (5-1) die Zeit zwischen dem Anfahren und dem Passieren der Haltlinie mit in der Wartezeit enthalten ist, resultiert ein Differenzbetrag zwischen Sperrzeit und Lage der Lücken zwischen den Punktwolken.

Abschließend kann festgestellt werden, dass sich aus technischer Sicht die Wartezeit einfacher erfassen lässt als die Verlustzeit. Da beide mobil erfassten Kenngrößen in einem direkten linearen Zusammenhang stehen, kann allein der Parameter Wartezeit für die Beschreibung der Verkehrssituation genutzt werden. Die Verlustzeit braucht in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

### 5.2.3 Wartezeit und Rückstaulänge

Mit Hilfe der Gegenüberstellung von Wartezeit und Rückstaulänge soll der funktionale Zusammenhang ermittelt werden. Weiter wird eruiert, welche der beiden mobil erfassten Verkehrskenngrößen für die Abbildung der aktuellen Verkehrssituation ausgewählt werden kann. Es erfolgt eine Unterscheidung zwischen nicht gesättigten und gesättigten bzw. übersättigten Zufahrten.

#### Nicht gesättigte Zufahrten hinsichtlich der Freigabezeiten

Abbildung 5-3 zeigt die beispielhafte Darstellung der Wartezeit über die Rückstaulänge mehrerer Simulationsuntersuchungen und -szenarien. Für die beispielhafte Darstellung wurde eine nicht gesättigte Zufahrt mit einer Umlaufzeit von 100 s und einem Freigabezeitanteil von 30 % gewählt. Die graphischen Darstellungen aller weiteren Untersuchungen mit geänderten Umlaufzeiten und Freigabezeitanteilen sind dem „Anhang E: Mobil erfasste Parameter“ zu entnehmen. Für die nicht gesättigte Zufahrt wurden in einem ersten Schritt poisonverteilte Fahrzeugankünfte unterstellt. Jeder dargestellte Punkt visualisiert genau ein Wartepaar von maximaler Rückstaulänge und Wartezeit eines ausgestatteten Fahrzeugs, welches nach Passieren der Haltlinie an die Lichtsignalanlage übermittelt wurde.

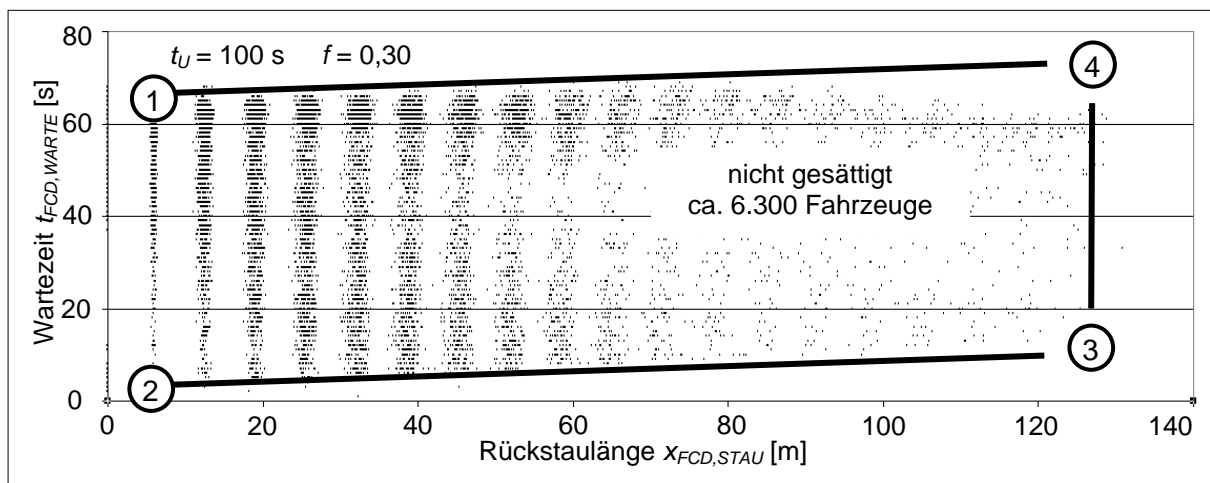


Abbildung 5-3: Gegenüberstellung von Wartezeit und Rückstaulänge – nicht gesättigt

Bei der Darstellung der Zusammenhänge beider mobil erfasster Kenngrößen lässt sich eine typische geometrische Form erkennen, welche folgend als Quasi-Rechteck bezeichnet wird. Dieses Quasi-Rechteck kann über die Punkte ①, ②, ③ und ④ beschrieben werden. Die quasi-rechteckige Form der Punktwolke entsteht infolge der Betrachtung aller Zeitpunkte von Fahrzeugankünften im Umlauf. Die Wartepositionen der Fahrzeuge lassen sich durch senkrecht entstehende Punktwolken bis zu einer Rückstaulänge von ca. 80 m eindeutig erkennen. Die Bruttoweglücke variiert je nach Fahrzeugmischung im Verkehrsstrom sowie je nach durchschnittlichem Abstand zwischen den Fahrzeugen und beträgt bei den hier vorgestellten Untersuchungen mit einem Schwerverkehrsanteil von 3 % im Mittel 6,50 m. Mit wachsender Position in der Warteschlange streuen die Haltepositionen zunehmend. Es wird vermutet, dass die Haltepositionen des realen Verkehrsablaufs gegenüber den simulierten Ergebnissen noch stärker streuen. Für die weiteren Untersuchungen hat dies jedoch keine Bedeutung.

Zur Abbildung der aktuellen Verkehrssituation einer Zufahrt sollen die Quasi-Rechteckflächen formell und allgemeingültig beschrieben werden. Nur so können die Auslastung der Zufahrt sowie die Qualität des Verkehrsablaufs bestimmt werden. Sowohl die maximale Rückstaulänge als auch die maximale Wartezeit der Zufahrt lassen sich der Abbildung 5-3 entnehmen. Die minimale Wartezeit, abhängig von der Position in der Zufahrt, ergibt sich durch die zwischen den Punkten ② und ③ beschriebene Gerade aus der Geradengrundgleichung wie folgt:

$$t_{FCD,WARTE\ 2-3} = a_{2-3} \cdot x_{FCD,STAU} + b_{2-3} \quad (a, b = \text{konst.}) \quad (5-5)$$

$a_{2-3}$	Anstieg der Gerade zwischen den Punkten ② und ③
$b_{2-3}$	Verschiebung der Gerade zwischen den Punkten ② und ③ auf der Ordinate
$t_{FCD,WARTE\ 2-3}$	minimal mobil erfasste Wartezeit zw. ② und ③
$x_{FCD,STAU}$	mobil erfasste Staulänge

Die Funktion zeigt einen geringen Anstieg  $a_{2-3}$ , welcher aus der Definition der Wartezeit aus (5-1) resultiert. Die Wartezeit wird vom ersten Halten bis zum Passieren der Haltlinie erfasst. Da die Zeit bis zum Passieren der Haltlinie wegen der größeren Fahrstrecke bei größeren Rückstaulängen zunimmt, steigt proportional auch die minimale Wartezeit  $t_{FCD,WARTE\ 2-3}$  mit zunehmender Position in der Warteschlange. Die charakteristischen Punkte ② ( $P_2$ ) und ③ ( $P_3$ ) aus Abbildung 5-3 sollen als Stützpunkte für die Bestimmung des Anstiegs  $a_{(2)-(3)}$  genutzt werden.

$$P_2 (\Delta x_{Fz} \mid \tau_B) \text{ und } P_3 \left( n_{Fz,W} \cdot \Delta x_{Fz} \mid \tau_B + \frac{1}{2} (n_{Fz,W} - 1) \right) \quad (5-6)$$

$n_{Fz,W}$	Position des Fahrzeugs in der Warteschlange
$\Delta x_{Fz}$	Bruttoweglücke zwischen den Fahrzeugen
$\tau_B$	Zeitbedarfswert des gesättigten Abflusses der Fahrzeuge

Als Grundlage für die Berechnung dient der Zeitbedarfswert  $\tau_B$  für den gesättigten Abfluss einer Zufahrt, die Bruttoweglücke  $\Delta x_{Fz}$  und die Position des Fahrzeugs in der Warteschlange  $n_{Fz,W}$ . Über das Einsetzen von  $P_2$  und  $P_3$  ergibt sich für den Anstieg  $a_{2-3}$  folgender Zusammenhang:

$$a_{2-3} = \frac{\Delta t_{FCD,WARTE}}{\Delta x_{FCD,STAU}} = \frac{\left[ \tau_B + \frac{1}{2} (n_{Fz,W} - 1) \right] - \tau_B}{n_{Fz,W} \cdot \Delta x_{Fz} - \Delta x_{Fz}} = \frac{1}{2 \cdot \Delta x_{Fz}} \quad (5-7)$$

Mit Einsetzen von (5-7) in (5-5) und Umstellen nach  $b_{2-3}$  sowie Einsetzen von  $P_2$  folgt:

$$b_{2-3} = t_{FCD,WARTE} - \frac{x_{FCD,STAU}}{2 \cdot \Delta x_{Fz}} = \tau_B - \frac{\Delta x_{Fz}}{2 \cdot \Delta x_{Fz}} = \tau_B - \frac{1}{2} \quad (5-8)$$

Die Gleichung der minimalen Wartezeit resultiert nun aus Einsetzen von (5-7) und (5-8) in (5-5):

$$t_{FCD,WARTE\ 2-3} = \frac{1}{2 \cdot \Delta x_{Fz}} \cdot x_{FCD,STAU} + \tau_B - \frac{1}{2} \quad (5-9)$$

Ein ähnlicher Zusammenhang ergibt sich für die Funktion der maximalen Wartezeit  $t_{FCD,WARTE\ 1-4}$  in der nicht gesättigten Zufahrt, welche im Diagramm der Abbildung 5-3 durch die Gerade zwischen den Punkten ① und ④ beschrieben wird. Einziger Unterschied ist der Versatz auf der Ordinate  $b_{1-4}$  um die Sperrzeit  $t_s$  der Zufahrt. Als Stützpunkt dient  $P_1(\Delta x_{Fz} | t_s)$ . Die Funktionsgleichung ergibt sich wie folgt:

$$t_{FCD,WARTE\ 1-4} = a_{2-3} \cdot x_{FCD,STAU} + b_{1-4} = \frac{1}{2 \cdot \Delta x_{Fz}} \cdot x_{FCD,STAU} + t_s - \frac{1}{2} \quad (a, b = \text{konst.}) \quad (5-10)$$

$a_{1-4}$	Anstieg der Gerade zwischen den Punkten ① und ④
$b_{1-4}$	Verschiebung der Gerade zwischen den Punkten ① und ④ auf der Ordinate
$t_{FCD,WARTE\ 1-4}$	maximal mobil erfasste Wartezeit zw. ① und ④
$x_{FCD,STAU}$	mobil erfasste Rückstaulänge
$t_s$	Sperrzeit der LSA

Aus den voranstehenden Erörterungen ist ersichtlich, dass sowohl die Rückstaulänge  $x_{FCD,STAU}$  als auch die Wartezeit  $t_{FCD,WARTE}$  in nicht gesättigten Zufahrten benötigt wird, um Aussagen über die Verkehrssituation und Qualität des Verkehrsablaufs ableiten zu können. Die Wartezeit dient dabei zur Ermittlung der Dringlichkeit einer Freigabe, die Rückstaulänge hingegen ermöglicht Aussagen über die notwendige Dauer der Freigabe. Die Dringlichkeit kann durch verkehrlich oder politisch gesetzte Maximalwerte für Wartezeiten definiert werden.

Solange sich das übermittelte Wertepaar des ausgestatteten Fahrzeugs zwischen den über die Gleichung (5-9) und (5-10) ermittelten Geraden und somit auch innerhalb der Quasi-Rechteckfläche zwischen den Punkten ①, ②, ③ und ④ in Abbildung 5-3 befindet, kann davon ausgegangen werden, dass die Zufahrt des Knotenpunkts hinsichtlich der Freigabezeit nicht gesättigt ist. Die Qualität des Verkehrsablaufs der betrachteten Zufahrt ist entsprechend gut.

Innerhalb der dargestellten Quasi-Rechteckfläche lassen sich mehrere Bereiche unterscheiden, welche bestimmten Verkehrssituationen zugeordnet werden können. Je nach Ankunft der Fahrzeuge im Umlauf, der Koordinierung des Streckenabschnitts und der Existenz von Fahrzeugpulk bilden sich unterschiedliche, aber jeweils charakteristische Formen der Punktwolken aus. Für die Untersuchung wird der in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Signalgruppenezufahrt des Simulationsmodells eine weitere LSA vorgelagert, um den typischen Verkehrsablaufs im innerstädtischen Verkehr nachbilden zu können. Eine Prinzipskizze ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

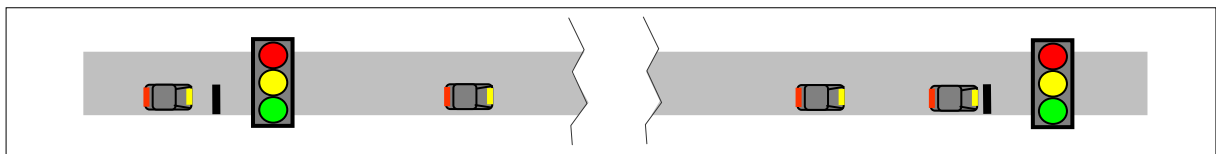


Abbildung 5-4: Simulationsmodell Streckenzug

Einige verkehrlich interessante Konstellationen werden in der folgenden Abbildung 5-5 mit Hilfe einer Fallbetrachtung definiert und graphisch verdeutlicht. Über die Kenntnis von

Wartezeit und Rückstaulänge lassen sich somit relativ einfach Aussagen über die Qualität der Koordinierung im Streckenabschnitt ableiten.

*Fall 1* der Abbildung 5-5 zeigt die typische Darstellung von außerörtlichen Verkehrsflussverhältnissen. Im Umkreis des in *Fall 1* betrachteten Knotenpunkts gibt es keine weiteren den Verkehrsablauf beeinflussenden Lichtsignalanlagen. Infolgedessen ist eine Koordinierung nicht notwendig bzw. möglich. Über die poisonverteilten Fahrzeugankünfte lässt sich der Verkehrszustand einfach ermitteln. Es entsteht eine charakteristische Dreiecksform zwischen den Punkten ①, ② und ③. Fahrzeuge an erster Warteposition streuen hinsichtlich ihrer Wartezeiten im gesamten Bereich zwischen den Punkten ① und ②, Fahrzeuge an letzter Warteposition weisen hingegen geringe Wartezeiten auf (Punkt ③), da sie an eine freigegebene LSA und einen sich auflösenden Rückstau auffahren. Eine vertiefende Untersuchung dieses Falls kann dem Beitrag OTTO & HOYER-2010B entnommen werden.

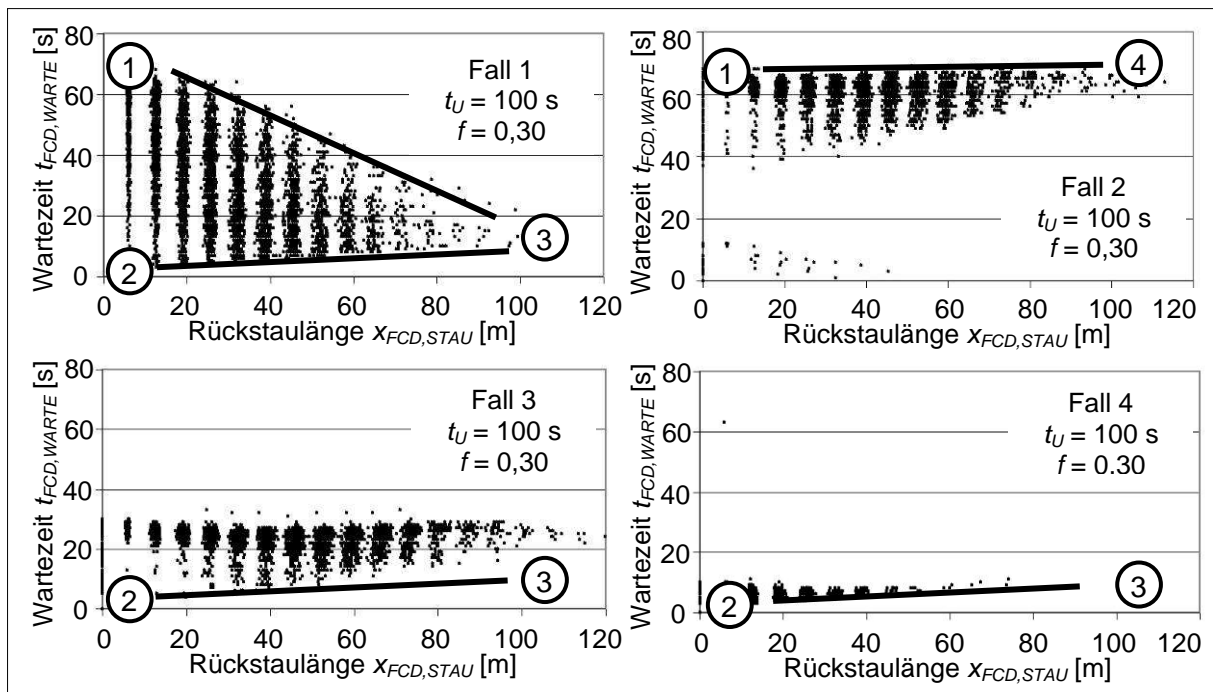


Abbildung 5-5: Gegenüberstellung von Wartezeit und Rückstaulänge – Beispiel

*Fall 2* veranschaulicht einen innerstädtischen Verkehrsfluss mit einer sehr schlechten bzw. keiner Koordinierung. Der Fahrzeugpulk und damit nahezu alle Fahrzeuge erreichen die Lichtsignalanlage kurz nach dem Ende der Freigabezeit und erleiden sehr hohe Wartezeiten. Die Grünzeit im *Fall 2* müsste um ca. 30 s verlängert bzw. zeitlich nach hinten verschoben werden.

Auch *Fall 3* zeigt ein typisches Bild des innerstädtischen Verkehrsablaufs. Die Koordinierung des Streckenzugs weist ein gewisses Defizit auf. Die Freigabezeit der Anlage muss ähnlich wie in *Fall 2* um ca. 30 s verlängert, aber in diesem Fall früher gelegt werden. Der Fahrzeugpulk erreicht die Anlage 30 s vor Beginn der Freigabe. Die Wartezeiten sind geringer als in *Fall 2*. Die Qualität des Verkehrsablaufs ist gegenüber *Fall 2* dennoch erheblich besser.

Geringe Mängel in der Qualität der Koordinierung, wie sie wegen der unterschiedlichen Knotenpunktabstände oftmals in historisch gewachsenen Netzen beobachtet werden können, sind beispielhaft im *Fall 4* dargestellt. Die Spitzenfahrzeuge der Pulks erreichen den Knotenpunkt knapp vor Beginn der Freigabezeit und müssen kurz halten. Die Rückstaulängen und Wartezeiten sind sehr gering. Die Qualität des Verkehrsablaufs ist deutlich besser als in den *Fällen 3* oder *gar 2*.

*Fall 5* wird durch kein Diagramm visualisiert. Bei einer optimalen Koordinierung der Lichtsignalanlagen in einer Grünen Welle erreichen alle Fahrzeuge der Hauptrichtung die LSA während der Freigabezeit. In der graphischen Darstellung würden alle Punkte im Koordinatenursprung abgetragen, da weder Wartezeiten noch Rückstaulängen erfasst werden. Lediglich einbiegende Fahrzeuge der Querrichtung würden ggf. an der Lichtsignalanlage zum Stehen kommen.

Alle genannten Fälle können auch in Kombination auftreten. Eine Kombination von *Fall 2* und *Fall 4* bzw. *Fall 2* und *Fall 3* zeigen eine eindeutige Ausbildung mehrerer Pulks in der Zufahrt der Lichtsignalanlage. Auch können sie einen Hinweis auf eine drohende Übersättigung der Zufahrt hinsichtlich der Freigabezeit im kommenden bzw. aktuellen Umlauf geben. Eine automatisierte Qualitätsüberwachung bestehender Steuerungen sowie eine Anpassung der Steuerungsentscheidung bei festgestellten Qualitätsmängeln sind so verhältnismäßig einfach und im laufenden Betrieb möglich. Der Umfang der Qualitätssicherung von LSA, wie er als Problem in Abschnitt 2.3.3 dargestellt wurde, kann infolge einer teilweisen Automatisierung reduziert werden.

### Gesättigte und übersättigte Zufahrten hinsichtlich der Freigabezeiten

Gesättigte bzw. übersättigte Zufahrten signalisierter Knotenpunkte sind durch einen konstant langen oder ständig wachsenden Rückstau charakterisiert. Dieser Rückstau kann über die kommende bzw. aktuelle Freigabezeit nicht komplett abgebaut werden. Der Auslastungsgrad der Freigabezeit ist größer oder gleich 100 %. Eine Gegenüberstellung der Wartezeit zur Rückstaulänge ist beispielhaft in Abbildung 5-6 für  $t_U = 100$  s und einen konstanten Freigabezeitanteil von  $f = 0,30$  dargestellt.

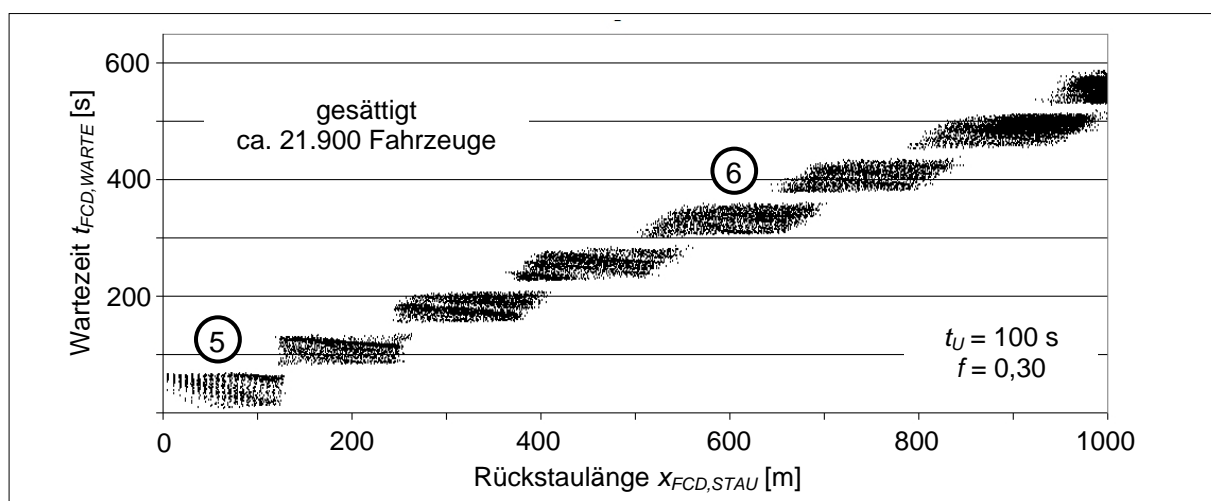


Abbildung 5-6: Gegenüberstellung von Wartezeit und Rückstaulänge – gesättigt



Jedes ausgestattete Fahrzeug überträgt die Staulänge bei Ankunft am Stauende  $x_{FCD,STAU}$  und die in der Zufahrt entstandene Wartezeit  $t_{FCD,WARTE}$  bei Überfahrt der Haltlinie an die kooperative Lichtsignalanlage. Die Wertepaare sind im Diagramm als Punkte veranschaulicht. Es ergibt sich in der graphischen Darstellung eine sehr markante Treppenform der einzelnen Punktwolken. Ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen der Wartezeit und Rückstaulänge ist erkennbar.

$$x_{FCD,STAU} \sim t_{FCD,WARTE} \quad (5-11)$$

$t_{FCD,WARTE}$  mobil erfasste Wartezeit  
 $x_{FCD,STAU}$  mobil erfasste Rückstaulänge

Die quasi-rechteckige Form der Punktwolke, wie sie bereits bei nicht gesättigten Zufahrten beschrieben wurde, ist in Abbildung 5-6 im Bereich ⑤ hervorgehoben. Diese Quasi-Rechteckform wandelt sich bei größer werdenden Rückstaulängen und Wartezeiten mehr und mehr zu Parallelogrammen, wie sie bspw. im Bereich ⑥ zu sehen sind. Je geringer die Umlaufzeit ist, desto schneller kommt es zum Übergang der Quasi-Rechtecke in Parallelogramme. Der Übergang resultiert aus der Verkehrszusammensetzung sowie aus dem unterschiedlichen Abstandsverhalten der Fahrer innerhalb der Warteschlange. Vergrößerte Detailausschnitte des Diagramms aus Abbildung 5-6 sind in Abbildung 5-7 dargestellt.

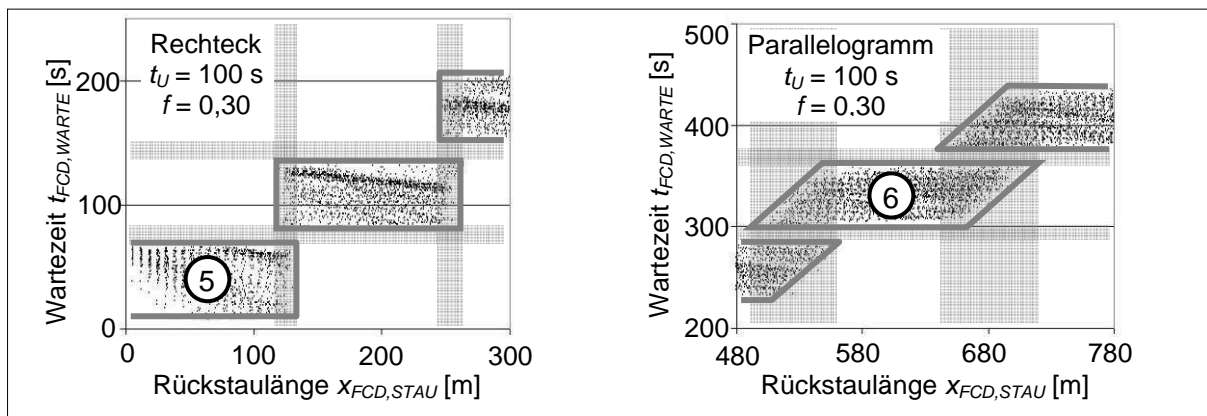


Abbildung 5-7: Gegenüberstellung von Wartezeit und Rückstaulänge – Detailansicht

Mit dem Fokus auf die mobil erfasste Kenngröße Wartezeit lassen sich Lücken zwischen den Punktwolken in der Horizontalen erkennen. Diese Lücken sind in Abbildung 5-7 durch waagerechte graue Felder gekennzeichnet. Die mobil erfasste Verkehrskenngröße Rückstaulänge bietet diese eindeutige Zuordnung der Fahrzeuge zu den Umläufen nicht. Mit größer werdender Wartezeit entstehen zunehmend breitere Bereiche der Überlappung, die durch senkrecht dargestellte graue Felder verdeutlicht werden.

Jede dieser Punktwolken setzt sich aus den Wertepaaren von Wartezeit und Rückstaulänge der Einzelfahrzeuge zusammen. Jeder der resultierenden Quasi-Rechteck- und Parallelogrammformen kann über die Kenngröße Wartezeit genau die Anzahl der Umläufe zugeordnet werden, die ein ausgestattetes Fahrzeug in der Zufahrt gewartet hat. Fahrzeuge, die durch den Bereich ⑤ repräsentiert werden, passieren die Haltlinie innerhalb eines Umlaufs. Fahrzeuge, die hingegen durch die Punktwolke des Parallelogramms im Bereich ⑥

repräsentiert werden, müssen vier Umläufe warten und können im fünften Umlauf den Knotenpunkt passieren (vgl. Abbildung 5-6).

Zum Zweck der Abbildung und Ermittlung der aktuellen Verkehrssituation im Bereich gesättigter oder übersättigter Zufahrten soll der vorgestellte Zusammenhang mathematisch beschrieben werden. Ziel der Verkehrssteuerung ist es, die Dauer der Freigabezeiten und deren Verteilung auf die unterschiedlichen Signalgruppen des Knotenpunkts optimal an die Verkehrssituation anzupassen. Der erforderliche Freigabezeitbedarf  $t_{F,erf}$  ergibt sich aus der Überlegung, dass alle momentan in der Zufahrt gestauten Fahrzeuge den Knotenpunkt passieren müssen. Der Freigabezeitbedarf lässt sich aus der Anzahl der freizugebenden Umläufe  $n_{U,erf}$  ableiten. Der weitere Zufluss an Fahrzeugen während der Freigabe wird zunächst nicht berücksichtigt.

Als Grundlage der Herleitung dient die Proportionalität aus (5-11) und die zuvor beschriebene klare Ausbildung der einzelnen Umläufe als Punktwolken.

$$t_{FCD,WARTE} = a_1 \cdot n_{U,erf} + b \quad (a_1, b = \text{konst.}) \quad (5-12)$$

$$n_{U,erf} = \frac{t_{FCD,WARTE} - b}{a_1} \quad (a_1, b = \text{konst.})$$

- $a_1$  Anstieg der Geradengleichung
- $b$  Verschiebung der Geradengleichung auf der Ordinate
- $n_{U,erf}$  erforderliche Anzahl der freizugebenden Umläufe, um die aktuell gestaute Verkehrsmenge der Zufahrt abfertigen zu können
- $t_{FCD,WARTE}$  mobil erfasste Wartezeit

Die weitere Herleitung der funktionalen Zusammenhänge soll für das Beispiel eines Freigabezeitanteils von  $f = 0,30$  und Umlaufzeiten von 60 s, 80 s, 100 s und 120 s durchgeführt werden. Abbildung 5-8 zeigt die aus Gleichung (5-12) bekannte Gegenüberstellung der mobil erfassten Kenngröße Wartezeit zur Anzahl der freizugebenden Umläufe.

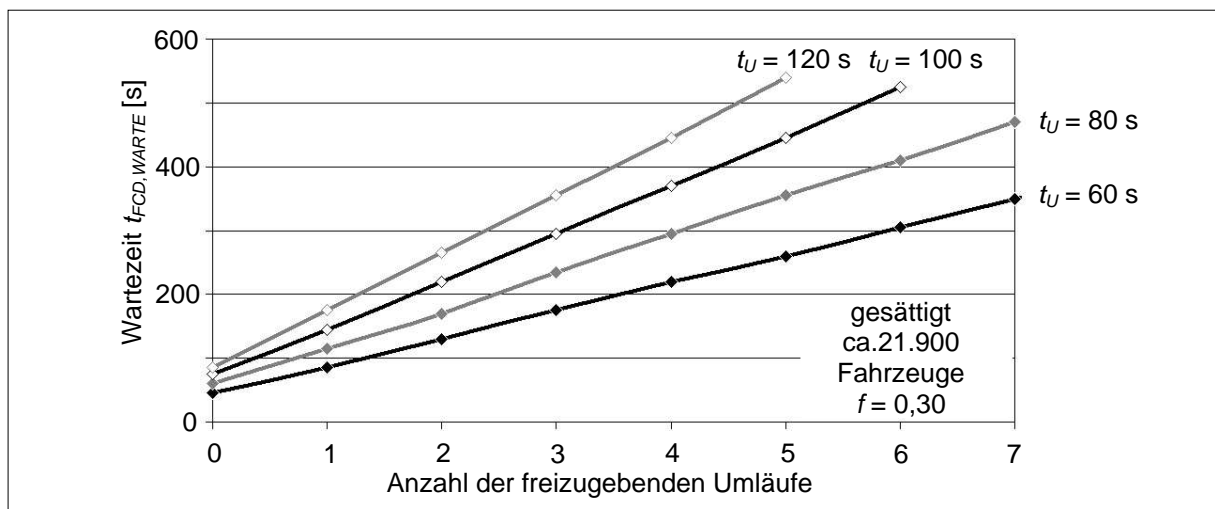


Abbildung 5-8: Gegenüberstellung von Wartezeit und freizugebende Umläufe

Eine vollständige Darstellung mit Variation der Freigabezeitanteile und Nachweis der regressiven funktionalen Zusammenhänge kann dem „Anhang F: Kooperative Lichtsignalanlage“ in der Rubrik „Herleitung der Zusammenhänge bei gesättigten Zufahrten“ entnommen werden.

Die Formelgrundlage ist im „Anhang B: Statistische Tests und Stichprobenumfang“ unter der Rubrik „Formelgrundlage der Regressionsanalyse“ aufgelistet.

Ziel der Herleitung ist die Berechnung des notwendigen Freigabezeitbedarfs, um die aktuell in der Zufahrt gestaute Verkehrsmenge abfertigen zu können. Dafür sind zwei weitere Herleitungsschritte nötig.

Schritt 1: Deutlich erkennbar ist der lineare Zusammenhang zwischen der Wartezeit und der Anzahl der zu wartenden Umläufe. Die Grenzwerte der Anzahl an freizugebenden Umläufen sind identisch mit den in Tabelle 5-2 aufgezeigten Lücken zwischen den Punktwolken. Die im Diagramm der Abbildung 5-8 dargestellten Anstiege der Funktionen für einen Freigabezeitanteil von 30 % und alle untersuchten Freigabezeitanteile von 20 %, 40 % und 60 % folgen einem bestimmten Schema. Daher werden diese Funktionen über die Anzahl zu wartenden Umläufe  $n_{U,erf}$  abgeleitet und bei unterschiedlichen Freigabezeitanteilen in Abbildung 5-9 im Diagramm ① über die Umlaufzeit  $t_U$  dargestellt. Vereinfachend wird ein Schnittpunkt der Funktionen im Koordinatenursprung angenommen. Als theoretische Kenngröße würde sich die „Wartezeit je erforderliche freizugebende Umläufe“ ergeben. Diese Kenngröße dient hier allerdings nur als Rechengröße und hat keine weitere Bewandnis.

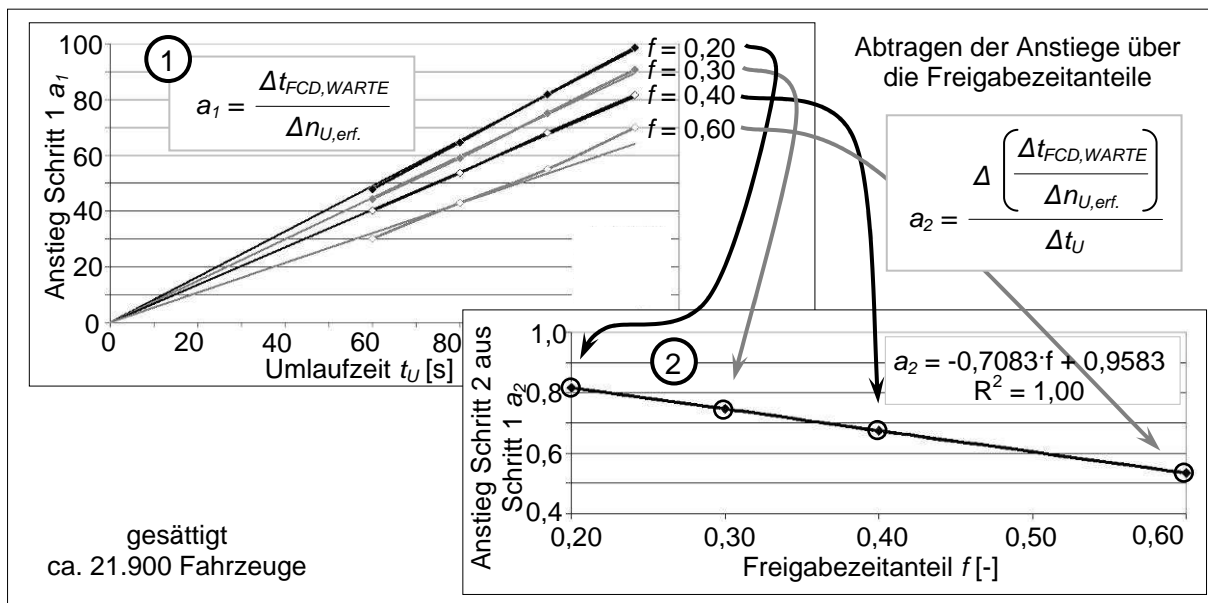


Abbildung 5-9: Herleitung der erforderlichen Freigabezeit

Schritt 2: In einem weiteren Schritt wird untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen dieser theoretischen Rechengröße aus Schritt 1 und dem Freigabezeitanteil besteht. Die Rechengröße wird ein weiteres Mal, diesmal jedoch nach der Umlaufzeit  $t_U$ , abgeleitet. Die resultierenden Anstiege  $a_2$  stellt Diagramm ② dem Freigabezeitanteil  $f$  gegenüber. Diese Gegenüberstellung ist nun unabhängig von der Umlaufzeit der Lichtsignalsteuerung. Es ergibt sich für dieses Beispiel im Ergebnis einer Regressionsanalyse ein linearer Zusammenhang, der sich mathematisch wie folgt fassen lässt:

$$a_2 = -0,7083 \cdot f + 0,9583 \quad (5-13)$$

Eine Kalibrierung dieser Parameter ist für jede Zufahrt notwendig, kann aber automatisiert erfolgen. Die Umlaufzeiten der Untersuchung variieren im üblichen Intervall zwischen 60 s und 120 s. Größere Freigabezeitanteile als 0,60 und kleiner als 0,20 können über den linearen formellen Zusammenhang extrapoliert werden.

Aus der Zusammenführung der Ergebnisse von Schritt 1 und Schritt 2 folgt für den Anstieg  $a_1$  folgende Gleichung:

$$a_1 = a_2 \cdot t_U = (-0,7083 \cdot f + 0,9583) \cdot t_U \quad (5-14)$$

Aus empirischen Untersuchungen hat sich ergeben, dass der Versatz der Funktion auf der Ordinate  $b$  in etwa der mittleren Sperrzeit  $t_S$  je Umlauf der Anlage entspricht.

$$b \approx t_S \quad (5-15)$$

Bei Festzeitsteuerung mit konstanter Umlaufzeit besteht immer ein rekursiver Zusammenhang zwischen der Sperrzeit  $t_S$  und der Freigabezeit  $t_F$ . Durch Einsetzen von (5-14) und (5-15) in (5-12) folgt die Gleichung zur Berechnung der notwendigen Anzahl an freizugebenden Umläufen  $n_{U,erf}$  (5-16) und die Gleichung zur Ermittlung der erforderlichen Freigabezeit  $t_{F,erf}$  (5-17).

$$n_{U,erf} = \frac{t_{FCD,WARTE} - t_S}{(-0,7083 \cdot f + 0,9583) \cdot t_U} \quad (5-16)$$

$$t_{F,erf} = n_{U,erf} \cdot t_F = \frac{(t_{FCD,WARTE} - t_S) \cdot t_F}{(-0,7083 \cdot f + 0,9583) \cdot t_U}$$

$$t_{F,erf} = \frac{(t_{FCD,WARTE} - t_S)}{(-0,7083 \cdot f + 0,9583)} \cdot f \quad (5-17)$$

$f$	Freigabezeitanteil
$n_{U,erf}$	erforderliche Anzahl der freizugebenden Umläufe, um die aktuell gestaute Verkehrsmenge der Zufahrt abfertigen zu können
$t_{FCD,WARTE}$	mobil erfasste Wartezeit
$t_F$	Freigabezeit
$t_{F,erf}$	erforderliche Freigabezeit, um die aktuell gestaute Verkehrsmenge der Zufahrt abfertigen zu können
$t_S$	Sperrzeit
$t_U$	Umlaufzeit

Eine Beispielrechnung für die dargestellten formalen Zusammenhänge kann im „Anhang E: Mobil erfasste Parameter“ nachvollzogen werden. Die Gleichungen (5-16) und (5-17) gelten zunächst nur für die Festzeitsteuerung. Da Festzeitsteuerungen heute nur noch selten zur Anwendung kommen, müssen die Freigabezeitanteile, Umlauf-, Freigabe- und Sperrzeiten als Variablen über den betrachteten Zeitraum in einer ersten Näherung gemittelt werden. Die praktische Überprüfung der Überführung der genannten Zusammenhänge steht noch aus und wird in dieser Arbeit nicht vorgenommen. Sie sei als weiterer Forschungsbedarf zu nennen.

Aus den vorangestellten Analysen und den formellen Zusammenhängen aus Gleichung (5-16) und (5-17) kann zusammenfassend festgestellt werden, dass es bei gesättigten bzw. übersättigten Zufahrten genügt, die Wartezeit als Parameter zur Beschreibung der Verkehrssituation zu erfassen. Mit Hilfe der Wartezeit kann sowohl die Dringlichkeit als auch der Freigabezeitbedarf ermittelt werden. Die Berücksichtigung der Ausstattungsraten erfolgt in Abschnitt 5.3.2.

## 5.2.4 Anzahl der Halte

Zusätzlich zur Betrachtung der funktionalen Zusammenhänge zwischen den mobil erfassten Verkehrskenngrößen Rückstaulänge und Wartezeit soll der Parameter Anzahl der Halte als Qualitätskriterium der Koordinierung von Lichtsignalanlagen untersucht werden.

In nicht gesättigten Zufahrten von Lichtsignalanlagen kommt es bei sehr guter Koordinierung zu nahezu keinem Halt der Fahrzeuge. Die ausgestatteten Fahrzeuge übermitteln so eine Rückstaulänge von 0 m und eine Wartezeit von 0 s. Dies wurde bereits als Fall 5 im Abschnitt 5.2.3 dargestellt. Über die in diesem Abschnitt weiter vorgestellten Untersuchungen lassen sich für nicht gesättigte Zufahrten bereits genügend genaue Aussagen über die Qualität der Koordinierung ableiten. In gesättigten bzw. übersättigten Zufahrten ist eine Beurteilung der Qualität der Koordinierung nicht sinnvoll, da Grüne Wellen lediglich bis zu einem Auslastungsgrad von 85 % (RILSA-2010) adäquat funktionieren. Dennoch sollen die Ergebnisse zur vollständigen Darstellung der funktionalen Zusammenhänge mobil erfasster Kenngrößen aufgezeigt werden.

Die beispielhafte Gegenüberstellung der Wertepaare von Anzahl der Halte und der Wartezeit bzw. der Rückstaulänge kann Abbildung 5-10 für  $t_U = 100$  s und für konstanten Freigabezeitanteil von  $f = 0,30$  entnommen werden. Alle weiteren Diagramme der funktionalen Zusammenhänge mit geänderten Freigabezeitanteilen und Umlaufzeiten sowie der Nachweis der Regressionsfunktionen sind dem „Anhang E: Mobil erfasste Parameter“ zu entnehmen.

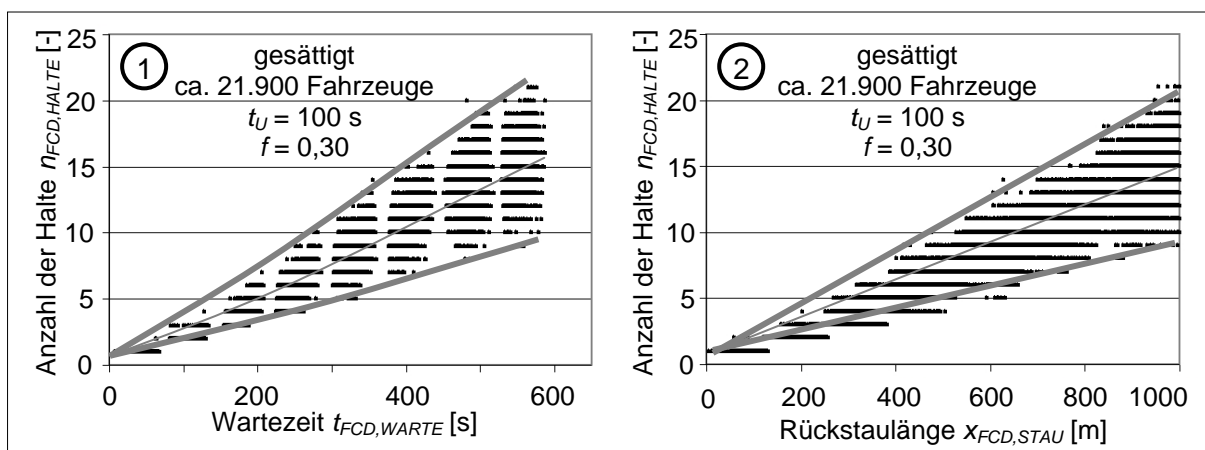


Abbildung 5-10: Gegenüberstellung – Anzahl der Halte und Wartezeit/Rückstaulänge

Wartezeiten über 600 s bzw. Rückstaulängen von über 1.000 m treten im innerstädtischen Straßennetz in der Zufahrt eines Knotenpunktes praktisch eher selten auf. Sie werden somit nicht betrachtet. Der Vergleich der funktionalen Zusammenhänge zwischen Anzahl der Halte und Wartezeit bzw. Rückstaulänge zeigt sehr ähnliche funktionale Zusammenhänge.

Im Diagramm ① von Abbildung 5-10 lässt sich ein schwach potenzieller Zusammenhang zwischen Anzahl der Halte  $n_{FCD,HALTE}$  und Wartezeit  $t_{FCD,WARTE}$  ableiten:

$$n_{FCD,HALTE} = a \cdot t_{FCD,WARTE}^b \quad (a, b = \text{konst.}) \quad (5-18)$$

$n_{FCD,HALTE}$       Anzahl der mobil erfassten Halte  
 $t_{FCD,WARTE}$       mobil erfasste Wartezeit

Diagramm ② zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen Anzahl der Halte  $n_{FCD,HALTE}$  und Rückstaulänge  $x_{FCD,STAU}$ .

$$n_{FCD,HALTE} = a \cdot x_{FCD,STAU} + b \quad (a, b = \text{konst.}) \quad (5-19)$$

$x_{FCD,STAU}$       mobil erfasste Rückstaulänge

Bei der Betrachtung der Anzahl der Halte gegenüber der Rückstaulänge und Wartezeit wird ersichtlich, dass die Streuung mit steigenden Wartezeiten bzw. Rückstaulängen zunimmt. Grund ist die zähfließende Verkehrsflusscharakteristik im Staubereich. Dadurch kommen die Fahrzeuge bei identischen Wartezeiten bzw. Rückstaulängen unterschiedlich oft zum Stehen. Eine eindeutige Zuordnung zwischen der Wartezeit bzw. der Rückstaulänge und der Anzahl der Halte ist nicht möglich. Dagegen eindeutig lassen sich jedoch die Werte der Wartezeit der Anzahl der zu wartenden Umläufe zuordnen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Anzahl der Halte für die Betrachtung von städtischen Hauptverkehrsstraßennetzen mit Auslastungsgraden der Freigabezeiten kleiner 85 % von fundamentalem Interesse ist. Die großen Streuungen der Anzahl der Halte zu Zeitpunkten mit großen Rückstaulängen und langen Wartezeiten sind von untergeordnetem Interesse, da bei gesättigten bzw. übersättigten Verkehrsflussverhältnissen keine brauchbare Grüne Welle eingerichtet werden kann. Aus der starken Korrelation zwischen Wartezeit und Anzahl der Halte kann in gesättigten bzw. übersättigten Zufahrten allein auf die Wartezeit zurückgegriffen werden, um die Verkehrssituation abbilden zu können.

### 5.2.5 Zusammenfassung

Mit Hilfe der vorangestellten Untersuchungen der individuell mobil erfassten Verkehrskenngößen konnte nachgewiesen werden, dass einige Kenngößen zueinander im engen funktionalen Zusammenhang stehen. Aus Sicht der kooperativen Verkehrssteuerung ist die Ab- bzw. Nachbildung der aktuellen Verkehrssituation der wichtigste Bestandteil für eine bedarfsgerechte Anpassung der verkehrsabhängigen Lichtsignalsteuerung. Durch die Gegenüberstellung der mobil erfassten Verkehrskenngößen sollen die Einsatzgebiete und die Einsatzgrenzen der verschiedenen Parameter unter unterschiedlichen Randbedingungen eruiert werden. Hauptkriterium der Gegenüberstellung ist die Auslastung der Freigabezeit der Zufahrt, da diese den größten Einfluss auf die Wahl der notwendigen mobil erfassten Parameter zur Abbildung der aktuellen Verkehrssituation hat. Zudem ist eine Unterscheidung zwischen nicht gesättigten und gesättigten bzw. übersättigten Zufahrten hinsichtlich der Freigabezeit über die zuvor dargestellten Zusammenhänge der mobil erfassten Kenngößen relativ einfach möglich. In Abbildung 5-11 werden den unterschiedlichen Auslastungen der

Freigabezeiten die Verkehrssituation und die zu erfassenden mobilen Verkehrskenngrößen zugeordnet.

Es konnte nachgewiesen werden, dass zur Beschreibung der aktuellen Verkehrssituation nicht alle Verkehrskenngrößen notwendig sind. Die mobile Erfassung umfasst die drei Parameter Rückstaulänge, Anzahl der Halte und Wartezeit. Die Auswertung aller drei Kenngrößen sollte vor allem bis zu einer Auslastung der Freigabezeiten von 85 % erfolgen. In diesem Bereich sind Zufahrten hinsichtlich ihrer Freigabezeit nicht gesättigt und der Verkehrszustand befindet sich innerhalb des Einsatzbereichs der Grünen Welle. Eine alleinige Abbildung der Verkehrssituation über die Wartezeit und Rückstaulänge ist zwar möglich, die Anzahl der Halte wird jedoch als Qualitätskriterium für koordinierte Streckenzüge mit ausgewertet.

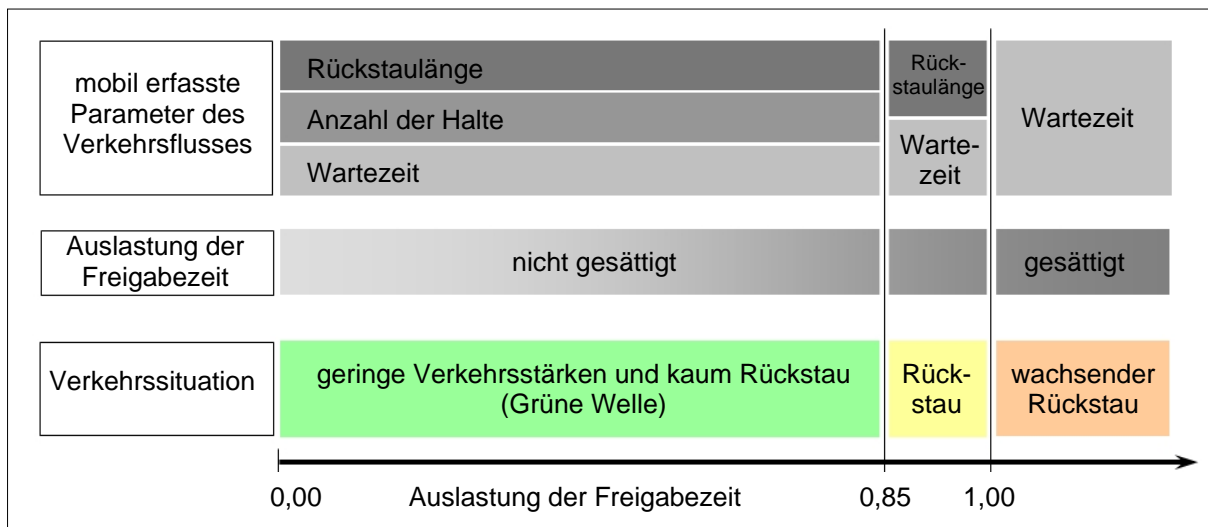


Abbildung 5-11: Zusammenstellung mobil erfasster Parameter

Bei Auslastungen der Freigabezeit zwischen 85 % und 100 % findet die Kenngröße Anzahl der Halte keine Berücksichtigung mehr, da sich der aktuelle Verkehrszustand außerhalb des Einsatzbereichs der Grünen Welle befindet. Bei gesättigten bzw. übersättigten Zufahrten mit Auslastungen der Freigabezeit größer oder gleich 100 % genügt allein die Wartezeit zur Erfassung und Abbildung der Verkehrssituation.

Zu Zeiten hoher Verkehrsbelastungen muss die Recheneinheit der Lichtsignalanlage somit lediglich einen Parameter auswerten. Zu Zeiten geringer Belastungen, zu denen ohnehin nur die Daten weniger Fahrzeuge ausgewertet werden müssen, besteht die Möglichkeit alle relevanten Parameter zur Abbildung der aktuellen Verkehrssituation auszuwerten. Die verfügbaren Ressourcen können so hinsichtlich ihrer Rechenleistung optimal genutzt werden.

## 5.3 Kooperative Lichtsignalsteuerung

### 5.3.1 Datenaustausch in der Zufahrt

Für die Beschreibung der aktuellen Verkehrssituation in der Zufahrt ist es wichtig zu wissen, welche mobil erfassten Daten verfügbar sind und wie sie miteinander im funktionalen Zusammenhang stehen. Dies wurde im vorangestellten Abschnitt umfassend analysiert.

Neben diesen Erkenntnissen muss die Frage geklärt werden, wann es möglich ist, diese Daten zwischen der Lichtsignalanlage und dem ausgestatteten Fahrzeug auszutauschen. Die Kommunikationsbereiche haben großen Einfluss auf die Qualität der Anpassung der Steuerungsentscheidungen und somit auf die Abstimmung des Freigabezeitangebots an die ermittelte Verkehrssituation. Infolge des großen Einflusses der Kommunikationsbereiche und Kommunikationszeitpunkte auf die Qualität der Abbildung der Verkehrssituation werden in Abbildung 5-12 zunächst fünf Bereiche bzw. Punkte definiert.

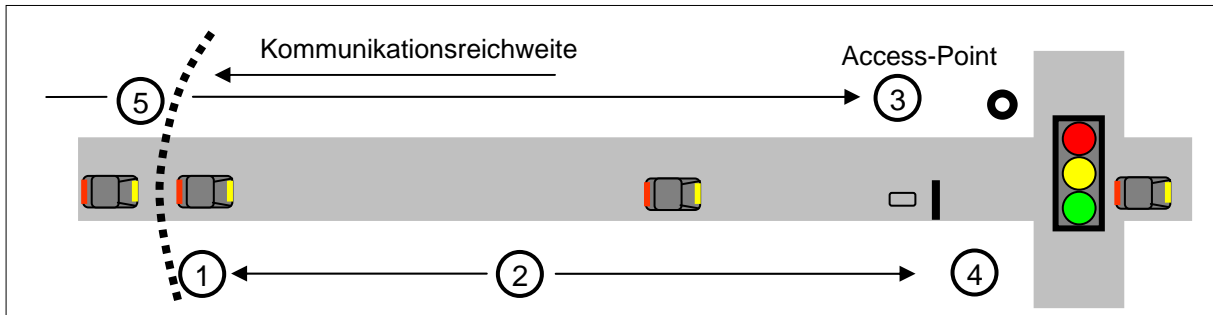


Abbildung 5-12: Prinzipdarstellung der Bereiche und Zeitpunkte der Datenübertragung

### ① Mobile Anmeldung

Im Bereich ① erreicht das kooperationsfähige Fahrzeug die Kommunikationsreichweite der kooperativen Lichtsignalanlage und hat erstmalig die Möglichkeit, mobil erfasste Daten auszutauschen. Von Interesse sind zu diesem Zeitpunkt vor allem der Fahrtverlauf und damit der Verkehrszustand der gesamten Zulaufstrecke außerhalb der Kommunikationsreichweite der Lichtsignalanlage. Sollte sich ein durch die Lichtsignalanlage bedingter Rückstau bis außerhalb der Kommunikationsreichweite (Annahme: 100 m) aufgebaut haben, ist die Zufahrt mit großer Wahrscheinlichkeit gesättigt bzw. übersättigt. Die Länge des Rückstaus außerhalb der Kommunikationsreichweite und folglich auch der erforderliche Freigabezeitbedarf kann mit Hilfe von Prognosemodellen ermittelt werden. Im Bereich ① erfolgt die mobile Anmeldung der ausgestatteten Fahrzeuge an der Lichtsignalanlage. Sie finden dadurch eine wesentlich zeitigere Berücksichtigung für zukünftige Steuerungsentscheidungen, als dies über herkömmliche stationäre haltliniennahe Erfassungseinrichtungen möglich wäre.

### ② Mobile Übermittlung

Innerhalb der Kommunikationsreichweite der kooperativen Lichtsignalanlage im Bereich ② werden die mobil erfassten Verkehrskenngrößen zeitschritt- bzw. ereignisorientiert übermittelt. Die Lichtsignalanlage kann so bei hohen Ausstattungsraten permanent die Verkehrssituation in der Zufahrt abbilden bzw. bei geringen Ausstattungsraten die Verkehrssituation berechnen. Aussagen über ausgelastete bzw. überlastete Stauräume oder auch zu notwendigen Änderungen der Freigabezeitverteilung am Knotenpunkt können abgeleitet werden.

### ③ Stationäre haltliniennahe Erfassung

Im Bereich ③ erfolgt eine punktuelle kontinuierliche Erfassung der Parameter Belegung und Zeitlücke über herkömmliche stationäre Detektoren. Die Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen der stationären Erfassung wurden in Abschnitt 2.1.1 ausführlich erläutert. So kann auch ein nicht ausgestattetes Fahrzeug berücksichtigt werden. Der Schwellwert, ab dem auf



stationäre Erfassungseinrichtungen gänzlich verzichtet werden kann, wird in Abschnitt 5.3.2 rein theoretisch ermittelt.

### ④ Mobile Abmeldung

Die mobile Abmeldung des ausgestatteten Fahrzeugs erfolgt im Bereich ④ nach Passieren der Haltlinie. Es werden die Wartezeit, Anzahl der Halte und Rückstaulänge des gesamten individuellen Fahrtverlaufs im Zufahrtsbereich der Lichtsignalanlage übermittelt. Einerseits können diese Daten zur Kalibrierung der ermittelten Abflussverkehrsmengen bei nicht vorhandener Vollausrüstung genutzt werden, andererseits dienen sie der Erfassung von Einzelfahrzeugen bzw. Fahrzeugpuls und der Weitergabe dieser Informationen an die stromabwärtige Lichtsignalanlage für die Prognose der Ankunftszeitpunkte. Über die Weitergabe der Informationen zwischen den Lichtsignalanlagen ist eine netzweite Gleichbehandlung identischer zuvor festgelegter Verkehrsteilnehmergruppen möglich. Ein Fahrzeug, welches im Netz vermehrt gewartet hat, kann so zumindest teilweise bevorzugt abgefertigt werden. Letztlich kann die mobile Abmeldung der Rücksetzung sämtlicher Anmeldungen dienen, um so ein zeitnahes Umschalten der Anlage auf andere abzufertigende Ströme zu ermöglichen.

### ⑤ Positionsprognose

Ein Datenaustausch zwischen ausgestattetem Fahrzeug und kooperativer Lichtsignalanlage ist bei der hier vorgestellten Systemlösung mit Kommunikation über WLAN nicht in jedem Fall im gesamten Bereich einer Zufahrt möglich. In Bereichen ohne die Möglichkeit der Kooperation werden die Fahrzeugpositionen prognostiziert. Abbildung 5-13 stellt den Prognosebereich des telematischen Gesamtsystems schematisch dar.

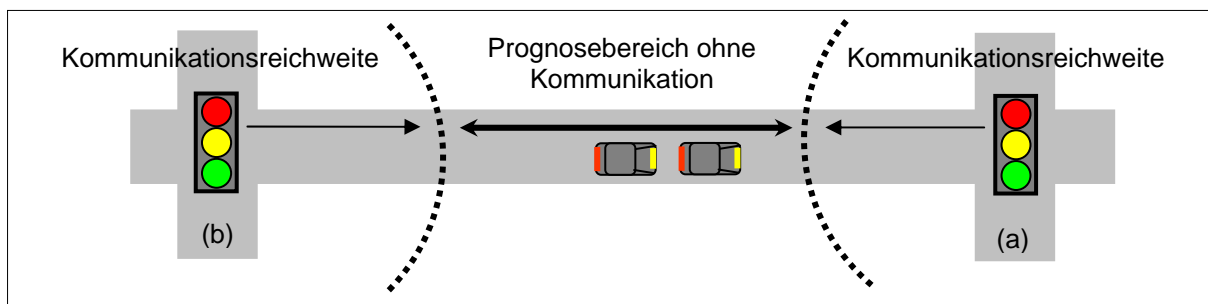


Abbildung 5-13: Kommunikations- und Prognosebereich zwischen kooperativen LSA

Außerhalb des Kommunikationsradius der aktuellen Lichtsignalanlage (a) werden die Daten der stromaufwärts befindlichen Lichtsignalanlage (b) genutzt, um die Position ausgestatteter Fahrzeuge zu prognostizieren. Dies ermöglicht eine Erkennung von Fahrzeugpuls sowie die frühzeitige Berücksichtigung der ankommenden Fahrzeugpuls und Einzelfahrzeuge an der stromabwärtigen Lichtsignalanlage (a). Die Kommunikationsreichweite ist abhängig von den örtlichen Gegebenheiten sowie der eingesetzten Technik und variiert stark, wie bereits in Unterkapitel 3.4 näher untersucht wurde. Ein wirtschaftlich sinnvoller Grenzwert zwischen der Ausdehnung der Kommunikationsreichweite, inklusive höherer infrastruktureitiger Kosten, und zweckmäßigen Genauigkeitsanforderungen an die Prognose ist zu ermitteln. Für eine sinnvolle Umsetzung des vorgestellten Systems sollte der Kommunikationsradius mindestens 100 m betragen.

Die Prognose der Fahrzeugpositionen und des Verkehrszustandes innerhalb von Bereichen, in denen keine Möglichkeit der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur besteht, ist für kooperative Gesamtlösungen von großer Bedeutung. Die kooperative Lichtsignalanlage sollte in der Lage sein, ihre Steuerungsentscheidung frühzeitig auf die aktuelle Verkehrssituation der einzelnen Zufahrten anpassen zu können. Über die Abschätzung der Ausstattungsraten in Kombination mit Aussagen zum Auslastungsgrad der Freigabezeit am stromaufwärtigen Knotenpunkt lassen sich für den stromabwärtigen Knotenpunkt Aussagen über den Ankunftszeitpunkt von Einzelfahrzeugen und Fahrzeugpuls ableiten. Voraussetzung hierfür ist, dass sich zwischen den kooperativen Lichtsignalanlagen keine Knotenpunkte mit hohem Verkehrsaufkommen hinsichtlich einbiegender oder abbiegender Verkehrsströme befinden. Im Streckenabschnitt sollte es deshalb nicht zu signifikanten Veränderungen im Pulkverhalten bzw. hinsichtlich der Verkehrsstärkeverhältnisse kommen.

Die Fahrzeugposition eines ausgestatteten Fahrzeugs kann im Prognosebereich über relativ einfache Bewegungsmodelle oder auch über komplexere Prognoseverfahren abgeschätzt werden. Die Streuung der Prognoseposition infolge von Ungenauigkeiten im Prognoseverfahren kann sowohl zu einer früheren Ankunft als auch zu einer späteren Ankunft des Fahrzeugs im Kommunikationsbereich führen. In der Regel kann die kooperative Verkehrsbeeinflussung auf eine zu frühe Ankunft durch die Übermittlung einer etwas reduzierten Geschwindigkeit reagieren, wenn keine Reaktion der Verkehrssteuerung mehr möglich ist. Im Fall einer späteren Ankunft ist die Zufahrt zu früh freigegeben und es kommt zu marginal geminderten Kapazitäten des Knotenpunktes, da die Freigabezeit nicht komplett genutzt wird. Ähnliche Effekte treten bei Fehlern der Fahrzeugortung in Längsrichtung auf, welche durch die Georeferenzierung nicht korrigiert werden können. Dies wurde bereits in Abschnitt 3.3.2 thematisiert. Gegenüber der Größenordnung der Prognosefehler sind die Ortungsfehler in Längsrichtung jedoch als geringfügig einzustufen.

Im Fall einer Überstauung der Zufahrt bis in den Prognosebereich wird eine Abschätzung der Verkehrssituation notwendig, um Aussagen im gesamten Bereich der Zufahrt treffen zu können. Es ist infolge der in Unterkapitel 3.4 vorgestellten Untersuchung zu den Kommunikationsreichweiten davon auszugehen, dass die Freigabezeit der Zufahrt zum Zeitpunkt der Überstauung bis in den Prognosebereich gesättigt bzw. übersättigt ist. Konkrete Verfahren für die Positions- und Zustandsprognose in Bereich ohne die Möglichkeit des Datenaustauschs werden in dieser Arbeit nicht weiter vertieft und sollen als weiterer Forschungsbedarf angeführt werden.

Das Maß der Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs mit Hilfe der kooperativen Verkehrssteuerung gegenüber herkömmlichen Steuerungen korreliert mit der Möglichkeit der exakten Abbildung bzw. Prognose der Verkehrssituation. Einer der wichtigsten Aspekte ist die Ausstattungsrate der Fahrzeugflotte mit mobilen Endgeräten zur Realisierung der telematischen Gesamtlösung.

### 5.3.2 Ausstattungsraten kooperationsfähiger Fahrzeuge

Da es sich bei kooperativ gewonnenen Daten um individuelle Daten des Verkehrsablaufs handelt, ist die Ausstattungsrate der Fahrzeuge im Verkehrsstrom ein wesentlicher

Einflussfaktor für die Güte der Abbildung und Prognose der Verkehrslage. Neben den schon genannten Vorteilen der weitläufigeren und umfassenderen Informationen mittels mobil erfasster Daten können unter bestimmten Randbedingungen auch stationäre Detektoren eingespart werden.

Die für die Untersuchung der Einsparung von stationären Erfassungseinrichtungen zu betrachtenden Kriterien sind folgende

- Ausstattungsrate der kooperationsfähigen Fahrzeuge im Verkehrsstrom
- Verkehrsstärke in einer Zufahrt
- Länge eines Umlaufs der LSA

Nachfolgende Überlegungen gehen davon aus, dass sich ausgerüstete Fahrzeuge gleichverteilt im Netz bewegen. Weiterhin wird unterstellt, dass Lichtsignalsteuerungen zum Abbilden der Verkehrssituation eine Mindestanzahl an kooperationsfähigen Fahrzeugen  $n_{Fz,koop}$  während eines Umlaufs benötigen. Einen ähnlichen Ansatz wählten PRIEMER & FRIEDRICH-2008 zur Abschätzung des Rückstaus in Zufahrten vor LSA. Diese Mindestanzahl spiegelt die Qualitätsanforderungen an die Steuerung wider, um z. B. geringstenfalls die identische Güte der Anpassung der Lichtsignalsteuerung über mobil erfasste Daten im Vergleich zu stationär erfassten Daten zu erzielen. Sie wird sich sicherlich zwischen den Verfahren unterscheiden. Mit Vorgabe einer maximalen Umlaufzeit  $t_U$ , Verkehrsstärke  $q$  und Ausstattungsrate  $\lambda$  als Variablen kann so ermittelt werden, bei welchen Kombinationen der Kenngrößen auf stationäre Erfassungseinrichtungen verzichtet werden kann. Im Mittel wird dann die Anzahl vorgegebener ausgestatteter Fahrzeuge  $n_{Fz,koop}$  pro Umlauf zur Ermittlung der Verkehrssituation verfügbar sein. Aus diesen Überlegungen ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$q = \frac{n_{Fz,koop} \cdot 3600}{t_U \cdot \lambda} \quad (5-20)$$

$\lambda$	Ausstattungsrate an kooperativen Fahrzeugen
$n_{Fz,koop}$	Anzahl notwendiger ausgestatteter kooperativer Fahrzeuge je Umlauf
$q$	Verkehrsstärke
$t_U$	Umlaufzeit der LSA

Abbildung 5-14 zeigt eine exemplarische Darstellung der vorgestellten Zusammenhänge aus Gleichung (5-20) mit einer unterstellten Umlaufzeit von 60 s. Die jeweiligen Einsatzbereiche sind durch graue Flächen hinterlegt. Weitere Darstellungen für Umlaufzeiten von 80 s, 100 s und 120 s können dem „Anhang F: Kooperative Lichtsignalanlage“ im Punkt „Erforderliche Ausstattungsrate für kooperative Lichtsignalsteuerung“ entnommen werden. Eindeutig feststellbar ist der umgekehrt proportionale Verlauf zwischen den Kenngrößen Verkehrsstärke und Ausstattungsrate. Dieser funktionale Zusammenhang wirkt sich positiv auf die Funktion der kooperativen Verkehrssteuerung aus. Bereits bei verhältnismäßig geringen Ausstattungsrate kann die Verkehrssituation in der Zufahrt der Lichtsignalanlage gut abgebildet werden. Der funktionale Zusammenhang weist in diesem Bereich eine starke Krümmung verbunden mit einem steilen Gefälle auf.

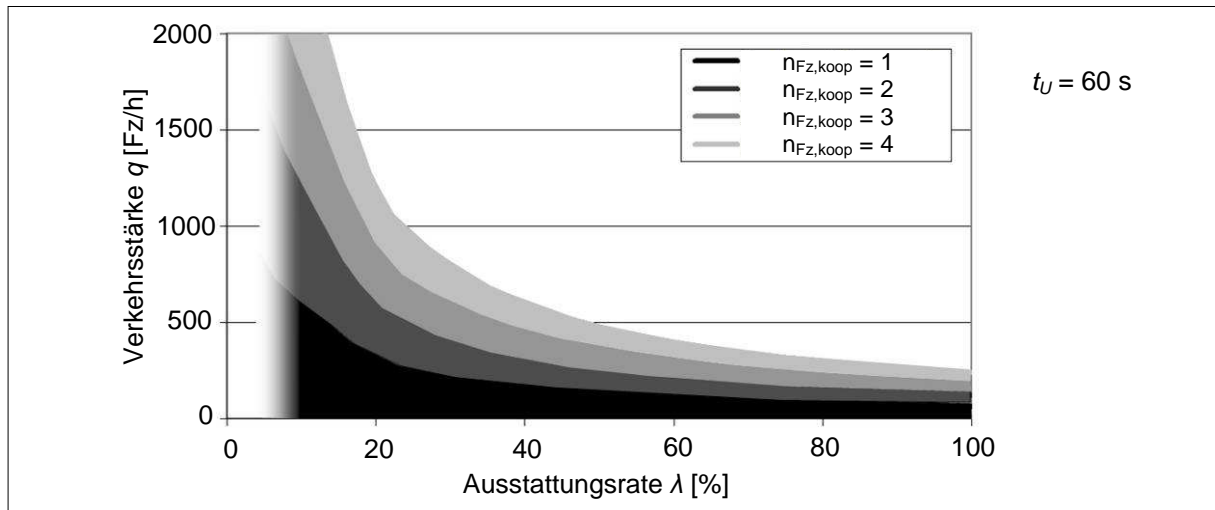


Abbildung 5-14: Gegenüberstellung – Verkehrsstärke und Ausstattungsrate

Ferner zeigt Tabelle 5-3 die Gegenüberstellung von Ausstattungsrate  $\lambda$ , Anzahl der ausgestatteten Fahrzeuge je Umlauf  $n_{Fz,koop}$  und die notwendige Verkehrsstärke  $q$  in der Zufahrt für Umlaufzeiten  $t_U$  von 60 s und 100 s.

Tabelle 5-3: Zusammenfassung – Einfluss der Ausstattungsraten

Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge je Umlauf	Notwendige Verkehrsstärke [Fz/h] bei gegebener Ausstattungsrate ( $\lambda$ )				
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
<b>Umlaufzeit <math>t_U = 60</math> s</b>					
<b>1</b>	600	300	200	150	120
<b>4</b>	2.400	1.200	800	600	480
<b>Umlaufzeit <math>t_U = 100</math> s</b>					
<b>1</b>	72	90	120	90	72
<b>4</b>	1.440	720	480	360	288

Da in dieser Arbeit kein Algorithmus zur Steuerung von kooperativen Lichtsignalanlagen aufgestellt wurde, sind keine Aussagen über die notwendigen Ausstattungsraten verallgemeinerbar. Letztlich hängen die erzielbaren verkehrlichen Verbesserungen auch von der Güte der Vergleichssteuerungen ab, welche derzeit in den Straßenzügen, in denen die kooperativen Steuerungen zum Einsatz kommen sollen, realisiert sind.

Ein ähnlicher Verlauf der funktionalen Zusammenhänge konnte bereits bei der Darstellung der verkehrlichen Wirksamkeit der Beeinflussung des Fahrverhaltens nachgewiesen werden. Mit Hilfe von Informationen über aktuelle und zukünftige Steuerungsentscheidungen kann, wie im Kapitel 4 beschrieben, die Fahrgeschwindigkeit an die LSA-Signalisierung angepasst werden. Somit haben sowohl die Beeinflussung der Fahrgeschwindigkeit im Streckenabschnitt als auch die Anpassung der Lichtsignalsteuerung bereits bei geringen Ausstattungsraten verhältnismäßig große verkehrliche Effekte.

Unter der Annahme, dass immer nur einer der Parameter als variabel angenommen wird, lassen sich aus (5-20) folgende Aussagen ableiten:

$q \sim n_{Fz,koop.}$  Je größer die Verkehrsstärke ist, desto größer ist die Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge im Fahrzeugstrom.

$q \sim \frac{1}{\lambda}$  Je größer die Verkehrsstärke ist, desto kleiner kann die Ausstattungsrate sein, um für die Abbildung der Verkehrssituation eine identische Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge verfügbar zu haben.

$q \sim \frac{1}{t_U}$  Je größer die Verkehrsstärke ist, desto kleiner kann die Umlaufzeit sein, um identisch viele kooperationsfähige Fahrzeuge im Umlauf für die Abbildung der Verkehrssituation verfügbar zu haben.

$t_U \sim n_{Fz,koop.}$  Je größer die Umlaufzeit ist, desto größer ist die Anzahl der ausgestatteten Fahrzeuge im Umlauf.

Im Hinblick auf die Qualität des Verkehrsablaufs im realen Verkehrsnetz lassen sich die meisten der vorangestellten Zusammenhänge gut nachvollziehen. Im Widerspruch zur üblichen Praxis steht jedoch, dass bei geringen Verkehrsstärken hohe Umlaufzeiten angeboten werden müssten, um eine notwendige Mindestanzahl an ausgestatteten Fahrzeugen für ein brauchbares Abbild der aktuellen Verkehrssituation zu erhalten. Dies steht dem Anspruch einer guten Qualität des Verkehrsablaufs entgegen, da es sich gerade bei geringen Verkehrsstärken anbietet, kleine Umlaufzeiten zu schalten.

Mit Fokus auf den tageszeitlichen Einsatz der kooperativen Lichtsignalanlage wird deutlich, dass kooperative Steuerungen ihre Vorzüge gegenüber herkömmlichen Steuerungen erst bei größeren Verkehrsstärken im Hauptstrom entfalten. Dies ist vor allem während der Einführungsphase solcher Systeme zu berücksichtigen. Verdeutlicht werden soll dies in Abbildung 5-15 mit dem Beispiel einer Tagesganglinie der Verkehrsstärke in einer signalisierten Zufahrt der Teststrecke 1.

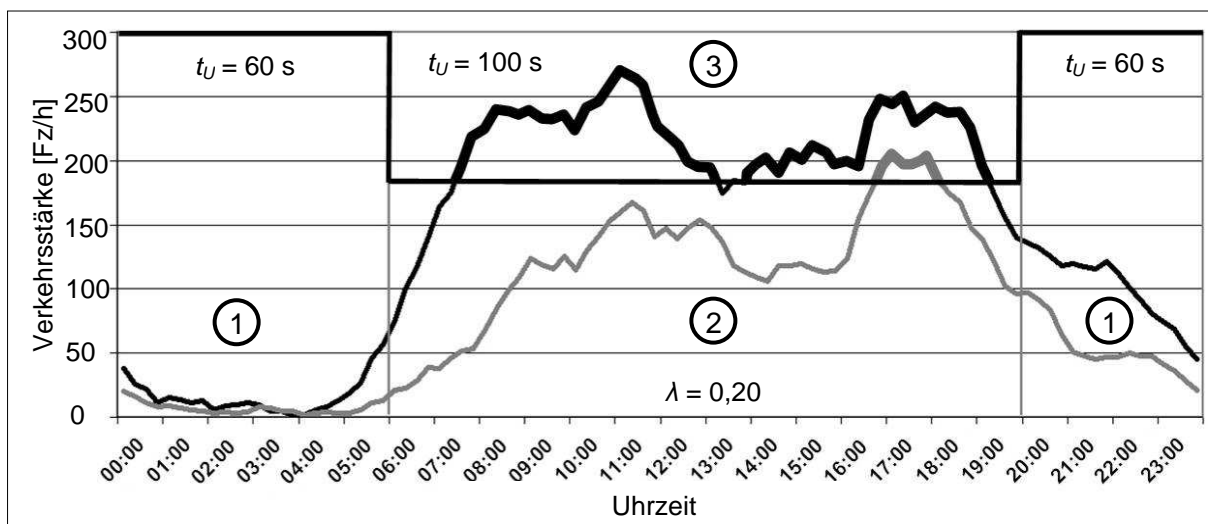


Abbildung 5-15: Einsatzbereiche der kooperativen LSA

Aufgezeigt sind die Verkehrsstärkeganglinie der Hauptrichtung als schwarz gekennzeichneter Graph und die einer abbiegenden Fahrrelation als grau dargestellter Graph. Die

Signalisierung des Knotenpunkts erfolgt im Beispiel von 06:00 Uhr bis 20:00 Uhr mit einer Umlaufzeit von 100 s sowie im restlichen Verlauf des Tages mit 60 s.

Für eine Modellrechnung wird eine Ausstattungsrate von 20 % festgelegt. Weiterhin wird unterstellt, dass mindestens ein ausgestattetes Fahrzeug je Umlauf nötig ist, um den Knotenpunkt ohne stationäre Erfassungseinrichtung in gleicher oder besserer Qualität gegenüber der herkömmlichen Steuerung regeln zu können. Auf der Basis dieser Randbedingungen ergeben sich die über Gleichung (5-20) berechneten und im Diagramm gekennzeichneten Bereiche, in denen auf stationäre Erfassungseinrichtungen ohne Verschlechterung der Qualität der Steuerung verzichtet werden kann, und Bereiche, in denen dies nicht möglich ist. Die Grenzen werden durch schwarze waagerechte Linien in Abbildung 5-15 gekennzeichnet. Im Bereich ① sind sowohl die Umlaufzeit als auch die Verkehrsstärke zu gering, um die Verkehrslage über die vorhandene Anzahl an ausgestatteten Fahrzeugen abbilden zu können. In den Zeiten zwischen 20:00 Uhr und 06:00 Uhr würde sich die Qualität der kooperativen Steuerung für nicht ausgestattete Fahrzeuge beider Fahrrelationen verschlechtern. Selbiges ist zwischen 06:00 Uhr und 20:00 Uhr im Bereich ② der Fall. Lediglich in Bereich ③ kann die kooperative Lichtsignalsteuerung qualitativ gleich oder besser arbeiten als die herkömmliche Steuerung. Dies ist für die Hauptrichtung (schwarze Linie) fast über die gesamte Zeit zwischen 07:30 Uhr und 19:00 Uhr und für die abbiegende Fahrrelation (graue Linie) in der Nachmittagsspitze möglich.

Bei der Einführung und Installation des Gesamtsystems zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung ohne weitere stationäre Erfassungseinrichtungen ist abzuwägen, ob während der Einführungsphase bei zunächst geringen Ausstattungsraten eine Verschlechterung der Steuerung aus Gesamtsicht in Kauf genommen werden kann. Kooperationsfähig ausgestattete Fahrzeuge werden innerhalb der Einführungsphase durch die verfälschte Abbildung der aktuellen Verkehrssituation gegenüber nicht ausgestatteten Fahrzeugen in den Bereichen ① und ② leicht bevorzugt. Die Gewährleistung einer Basisqualität des Verkehrsablaufs muss über die Bedienung jeder Phase innerhalb eines Maximalablaufs sichergestellt werden, wenn gänzlich auf stationäre Erfassungseinrichtungen verzichtet werden soll. Eine Alles-Rot-/Sofort-Grün-Schaltung oder Hauptrichtung-Dauergrün-Schaltung kann ohne stationäre Erfassungseinrichtung bei nicht vorhandener Vollaussstattung der Fahrzeugflotte nicht realisiert werden, da hier nicht alle Phasen im Maximalablauf bedient werden. Beide Steuerungsarten wurden für eine zeitnahe Realisierung von stationären Anforderungen im Steuerungsprogramm konzipiert und bieten die Möglichkeit, schneller als herkömmliche Verfahren auf Anforderungen zu reagieren. Da die mobile Anforderung aufgrund der verhältnismäßig großen Kommunikationsreichweiten, welche für den WLAN-Standard bereits in Unterkapitel 3.4 erörtert wurden, frühzeitig erfolgen kann, können die Vorteile der genannten Steuerungen auch über „normale“ Ablauflogik in der kooperativen Steuerung realisiert werden.

## 5.4 Zusammenfassung

Schwerpunkte bei der Untersuchung und Erforschung des Systems zur kooperativen Verkehrssteuerung lagen auf der Ermittlung der funktionalen Zusammenhänge der mobil

erfassten Parameter und auf der Ermittlung der Einsatzbereiche der kooperativen Lichtsignalsteuerung. Im Zuge der Gegenüberstellung der mobil erfassten Kenngrößen wurden die folgenden Parameter des Verkehrsablaufs als Indikatoren für die Abbildung der aktuellen Verkehrssituation ermittelt:

1. Wartezeit bzw. Verlustzeit
2. Rückstaulänge
3. Anzahl der Halte

Die Kenngrößen Wartezeit und Verlustzeit stehen dabei in einem engen linearen Zusammenhang. Daher kann sich in der Praxis auf die Erfassung des einfacher erfassbaren Parameters Wartezeit konzentriert werden. Für das Abbilden der aktuellen Verkehrssituation im Umfeld der kooperativen Lichtsignalanlage müssen unter Berücksichtigung des Grades der Auslastung der Freigabezeit drei Bereiche unterschieden werden.

Der erste Bereich weist einen Verkehrszustand mit einem maximalen Auslastungsgrad der Freigabezeit von 85 % auf. Dies ist der typische Einsatzbereich der Grünen Welle. In diesem Bereich sollten für ein exaktes Abbild des momentanen Verkehrszustands und eine darauf aufbauende Anpassung der Steuerung die mobil erfassten Parameter Wartezeit, Rückstaulänge und Anzahl der Halte erhoben werden.

Der zweite Bereich umfasst einen Auslastungsgrad der Freigabezeit von 85 % bis unter 100 %. Da in diesem Bereich keine Koordinierung von Lichtsignalanlagen mehr möglich ist, entfällt der Parameter Anzahl der Halte als Steuerungs- und Qualitätskriterium für Grüne Wellen. Es kann sich auf die Erfassung der Rückstaulänge und Wartezeit beschränkt werden.

Der dritte Bereich wird durch gesättigte und übersättigte Zufahrten mit Auslastungen der Freigabezeiten größer oder gleich 100 % charakterisiert. Aufgrund des Verhaltens der Wartezeit in diesem Bereich genügt es, allein diesen mobil erfassten Parameter auszuwerten, um die Verkehrssituation der Zufahrt abbilden zu können. Forschungshypothese H 5-1 auf Seite 85 konnte mit dem Nachweis der funktionalen Zusammenhänge zwischen den mobil erfassten Verkehrskenngrößen belegt werden.

Bei der Betrachtung der Einsatzbereiche der kooperativen Lichtsignalsteuerungen gegenüber den herkömmlichen verkehrsabhängigen Steuerungen mittels stationärer Erfassungseinrichtungen sind der erweiterte räumliche Erfassungshorizont und somit auch der zeitlich größere Reaktionsraum erhebliche Vorteile. Die direkte Erfassung der Parameter zur Beschreibung der Qualität des Verkehrsablaufs ermöglicht ein detaillierteres Abbild der aktuellen Verkehrszustände in der Zufahrt. Bei genügend hohen Ausstattungsraten ist es möglich, auf einen Teil der stationären Erfassungseinrichtungen zu verzichten. Somit wird auch die vorangestellte Forschungshypothese H 5-2 bestätigt. Wesentlicher Bestandteil der kooperativen Verkehrsbeeinflussung ist die Kommunikation zwischen dem im Fahrzeug befindlichen Endgerät und der Lichtsignalanlage. Dieser Datenaustausch ist nicht im gesamten Bereich der Zufahrt möglich. Aus diesem Grund ergeben sich Bereiche innerhalb der Kommunikationsreichweite, in denen die aktuelle Verkehrssituation direkt abgebildet werden kann und Bereiche, in denen kein Datenaustausch zwischen den

Kommunikationspartnern möglich ist. Im Fall einer nicht gesättigten Zufahrt genügt die Prognose der Fahrzeugposition im Bereich ohne Kommunikationsmöglichkeit, um die Verkehrssituation abbilden zu können. Im Fall einer gesättigten Zufahrt und Stau bis in den Bereich ohne Kommunikationsmöglichkeit muss die Verkehrssituation in diesem Bereich mit Hilfe von Prognosemodellen geschätzt werden.

Weiterhin besteht die Möglichkeit einer permanenten und in Echtzeit stattfindenden Qualitätssicherung durch die direkte Überwachung der Steuerungsentscheidung über die linienhafte Erfassung der mobilen Verkehrskenngrößen. Gegenüber stationären Erfassungseinrichtungen bieten mobil erfasste Kenngrößen den Vorteil, dass sie die Qualitätskenngrößen des Verkehrsablaufs, wenngleich nur als Stichprobe, aber dennoch direkt erfassen. Der Schritt des Ableitens der Qualitätskenngrößen aus den Daten der stationären Erfassungseinrichtungen ist nicht notwendig. Durch die Integration der mobil erfassten Daten in regelbasierte bzw. modellbasierte verkehrsabhängige Steuerungen kann die Qualität des Verkehrsablaufs gegenüber der herkömmlichen Steuerung bei entsprechender Ausstattungsrate verbessert werden. Eine Anpassung der Steuerungsentscheidungen an ein exaktes Abbild der Verkehrssituation ermöglicht die Reaktion auf sich kurzfristig aber auch langfristig ändernde Verkehrszustände.

Die größten Potenziale entfaltet die Funktion der kooperativen Verkehrsbeeinflussung vermutlich beim Zusammenspiel mit der Verkehrssteuerung. Um diese in den Forschungshypothesen H 4-4 und H 5-3 aufgestellten Aussagen belegen zu können, soll dies mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse im folgenden Kapitel 6 weiterführend diskutiert werden.



## 6 Kooperatives Gesamtsystem

### 6.1 Problemstellung

Das Gesamtsystem zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung resultiert aus dem Zusammenspiel des kooperationsfähig ausgerüsteten Fahrzeugs, vorgestellt in Kapitel 4, mit der in Kapitel 5 dargestellten kooperativen Lichtsignalanlage. Ziel ist eine Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs. Erst infolge der besseren Anpassung der Lichtsignalsteuerung über ein genaueres Abbild der Verkehrssituation einerseits und die Beeinflussung des Fahrverhaltens durch Informationen über aktuelle und bevorstehende Steuerungsentscheidungen der Lichtsignalanlage andererseits, entfaltet das telematische Gesamtsystem seine volle Wirkung.

Im Zuge der Kooperation beider Komponenten sollen die Vorzüge der Einzelfunktionalitäten so genutzt werden, dass die Einsatzgrenzen möglichst durch den Einsatzbereich der jeweilig anderen Funktion kompensiert werden. Dabei ist zu beachten, dass es im Zusammenspiel nicht zur Aufhebung der positiven Effekte kommt. Die zu definierenden Einsatzgrenzen und Einsatzgebiete des telematischen Gesamtsystems zur Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung müssen spezifiziert werden. In Abhängigkeit bestimmter verkehrlicher Ereignisse und Randbedingungen sollen die Anwendungsbereiche und die zu erwartenden verkehrlichen Effekte dargestellt werden.

Hinsichtlich der Kooperation der Verkehrssteuerung und Verkehrsbeeinflussung ergeben sich einige Fragestellungen. Generell steht einer flexiblen Steuerung der kooperativen Lichtsignalanlage die konsistente Information mit großem Prognosehorizont zukünftiger Steuerungsentscheidungen entgegen. Wie geht das System damit um? Wann ist es eher sinnvoll die Signalisierung anzupassen und den Verkehr zu steuern, oder wann lohnt sich vielmehr die Anpassung des Fahrverhaltens der informierten Fahrer über Signalisierungsinformationen? Die aufgeworfenen Fragen sollen in diesem Kapitel diskutiert werden.

In den voranstehenden Kapiteln wurde die Forschungshypothese aufgestellt, dass die untersuchte telematische Gesamtlösung erst im Zusammenspiel ihren vollen Nutzen entfaltet und ungenutzte Potenziale der derzeit oft voneinander unabhängigen Verkehrssteuerung und Verkehrsbeeinflussung erschlossen werden können. Auch diese Hypothesen gilt es im Laufe der Erörterungen dieses Kapitels zu belegen.

### 6.2 Einsatzgebiete und Einsatzgrenzen

#### 6.2.1 Einzelknotenpunkt und Streckenzug

Beim Zusammenspiel zwischen der telematischen Gesamtlösung am Einzelknoten stehen zunächst zwei Interessen bzw. Optimierungsziele im Konflikt.

Die *kooperative Lichtsignalanlage* als maßgebender Bestandteil der Funktion der Verkehrssteuerung ist prinzipiell bestrebt, ihre Steuerungsentscheidungen möglichst flexibel an die ermittelte Verkehrssituation anzupassen. Es bestehen die Möglichkeiten der

Freigabezeitanpassung, des Phasentauschs, der Phasen Anforderung, der Versatzzeitanpassung und der Signalprogrammbildung (RILSA-2010). Alle diese Eingriffe in die Signalisierung können hoch flexibel sein. Je flexibler die Lichtsignalsteuerung auf die Verkehrslage reagiert, desto kleiner wird der Prognosehorizont für zukünftige Steuerungsentscheidungen, und desto geringer ist die Vorhersagewahrscheinlichkeit für die Anzeige der Steuerungszustände im ausgestatteten Fahrzeug. Lediglich bei modellbasierten verkehrsabhängigen Steuerungen muss dies nicht zwingend der Fall sein.

Der *informierte Fahrer im ausgerüsteten Fahrzeug* ist vor dem Hintergrund einer zweckmäßigen Verkehrsbeeinflussung auf konsistente Informationen bezüglich der Signalisierung am stromabwärtigen Knotenpunkt angewiesen. Je geringer die Vorhersagewahrscheinlichkeit zukünftiger Schaltvorgänge ist, desto geringer wird die Akzeptanz der Fahrzeugführer sein, diese Informationen zu befolgen. Für die Beeinflussung des Fahrverhaltens ist ein in der Lichtsignalanlage versorgtes Festzeitprogramm anzustreben bzw. sinnvoll. Es bietet ideale Voraussetzungen für die Vorhersage von Steuerungsentscheidungen, kann jedoch bei großen stochastischen Schwankungen der Verkehrsstärkeverhältnisse im Knotenpunkt nicht reagieren.

Im Zusammenspiel der Anforderungen und Randbedingungen des informierten Fahrers im ausgestatteten Fahrzeug und der kooperativen Lichtsignalanlage lässt sich der Konflikt zwischen einer hoch flexiblen Steuerung und der stetigen und zuverlässigen Vorhersage der zukünftigen Steuerungsentscheidungen klar erkennen. Um sich dieser kontroversen Ansprüche anzunehmen und sie beherrschbar zu machen, müssen die jeweiligen Vorzüge der kooperativen Funktionalitäten zumindest qualifiziert werden. Abbildung 6-1 zeigt unterschiedliche Bereiche, in denen je nach Auslastungsgrad der Freigabezeit die Verkehrsbeeinflussung oder die Verkehrssteuerung jeweils größere verkehrliche Wirksamkeit aufweist und somit für den Einsatz empfohlen werden kann. Die Art der Signalsteuerung, die Verkehrssituation und die Auslastung der Freigabezeit der definierten Bereiche wird nachfolgend erörtert.

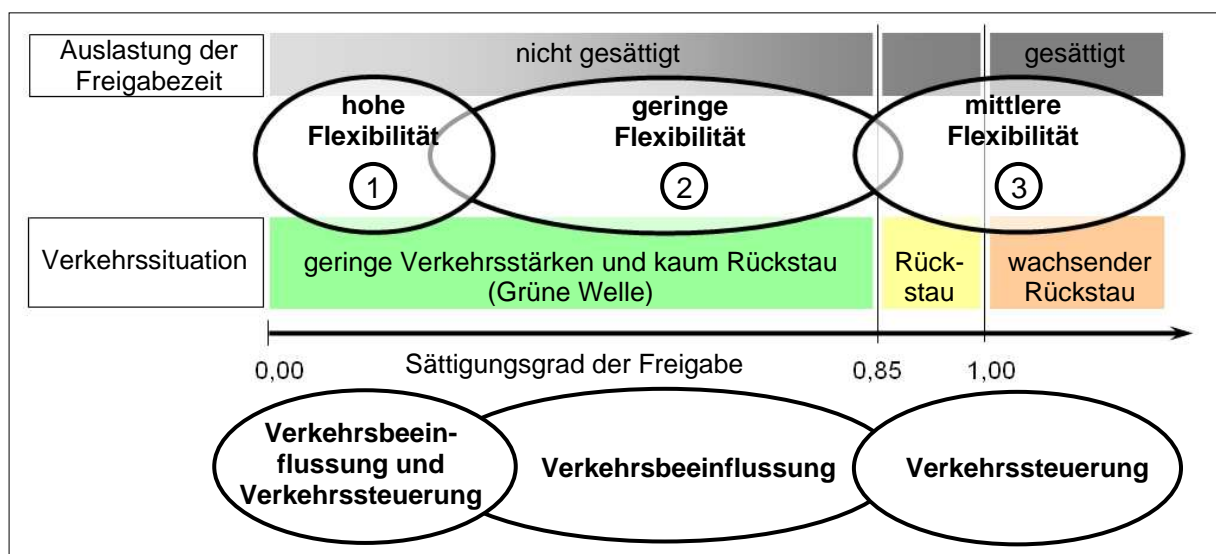


Abbildung 6-1: Einsatzpräferenzen der Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung

Bereich ① ist durch ein sehr geringes Verkehrsaufkommen geprägt. Die Auslastungsgrade der Freigabezeiten am Knotenpunkt sind niedrig. In diesem Bereich, welcher typischerweise die Nachtstunden des Verkehrsablaufs repräsentiert, bieten sich hoch flexible Steuerungen der Knotenpunkte an. Alle Möglichkeiten der Anpassung verkehrsabhängiger Steuerungen an die aktuelle Verkehrssituation wie die Freigabezeitanpassung, der Phasentausch, die Phasenanforderung, die Versatzzeitanpassung oder die Signalprogrammbildung können für die Optimierung des Verkehrsablaufs genutzt werden. Über die mobile Anmeldung des ausgestatteten Fahrzeugs ist eine frühzeitige Reaktion möglich, so dass bis zur Ankunft des Fahrzeugs alle Zwischenzeiten der feindlichen Phasen realisiert werden können und eine Freigabe erfolgen kann. Der Fahrer bekommt im Bereich ① lediglich dann Signalisierungs-informationen übermittelt, wenn zur theoretischen Ankunft schon ein anderer Verkehrsstrom bzw. ein anderes Fahrzeug abgefertigt wird. Ansonsten sollte auf die Übermittlung von Geschwindigkeitsinformationen weitgehend verzichtet werden, da infolge der hohen Flexibilität die Wahrscheinlichkeit für die Vorhersage von Steuerungsentscheidungen gemindert ist. Eine Vorhersage mit einer Eintreffenswahrscheinlichkeit von 100 % ist nur innerhalb der Phasenübergänge möglich.

Bereich ② verkörpert den typischen Einsatzbereich der Grünen Welle. Der Auslastungsgrad der Freigabezeit ist kleiner oder gleich 85 %. Die Qualität des Verkehrsablaufs wird in diesem Bereich vor allem durch eine gute Koordinierung der Lichtsignalanlagen untereinander bestimmt. Als Qualitätskriterium dienen die Anzahl der Halte sowie die Wartezeiten im Streckenabschnitt. Großteils liegt der Fokus auf der Übermittlung von konsistenten und somit langfristig vorhersagbaren Informationen bezüglich der kooperativen Lichtsignalsteuerung. Im Bereich ② sollte die Anpassung der Signalisierung an die Verkehrssituation nur langsam erfolgen, um größere Unstetigkeiten in der Prognose der Signalzustände zu vermeiden. Bleiben die Verkehrsaufkommen über längere Zeiträume nahezu konstant, können sogar Festzeitsteuerungen die Verkehrsströme in einer guten bis sehr guten Qualität abfertigen. Voraussetzung ist die Integration der Belange aller Verkehrsteilnehmer in die entsprechenden Festzeitpläne, was als Problem in Unterkapitel 2.4 thematisiert wurde. Im Fahrzeug kann sowohl die sichere Anzeige der aktuellen Lage des Fahrzeugs in der Grünen Welle als auch die Anzeige der Restzeiten vor der Lichtsignalanlage erfolgen. Es kommt innerhalb der Zufahrten zur Bildung von kompakten Fahrzeugpulks. Eine flexible Anpassung der Steuerung und dadurch ein eher kurzer Vorhersagehorizont der Prognose sollten sich lediglich auf die Beschleunigung des öffentlichen Verkehrs, die Priorisierung von Einsatzfahrzeugen oder auf sich stark und zufällig ändernde Verkehrsstärkeverhältnisse beschränken.

Im Bereich ③ sind die Auslastungen der Freigabezeiten der kooperativen Lichtsignalanlage größer als 85 %. Die Verkehrsverhältnisse liegen außerhalb der Einsatzgrenzen der Grünen Welle. Die Verkehrssituation ist durch einen konstanten bzw. ständig wachsenden Rückstau geprägt. Die Wartezeiten sind groß und somit ist die Qualität des Verkehrsablaufs entsprechend schlecht. Zu Zeiten derartiger Verkehrszustände arbeiten auch herkömmliche verkehrsabhängige Steuerungen wenig flexibel. Die permanente Belegung beinahe aller stationären Erfassungseinrichtungen lässt kein exaktes Abbild der vorhandenen

Verkehrssituation zu. Durch die kooperative Technologie kann die Verkehrssituation realistischer eingeschätzt und die Freigabezeit entsprechend der Lösung der Optimierungsfunktion bei modellbasierten Steuerungen bzw. durch Abarbeiten der bestehenden Regeln bei regelbasierten Steuerungen angepasst werden. Fahrer können über die noch verbleibenden Wartezeiten bzw. über den Fahrzeitverlust gegenüber freier Fahrt informiert werden. Die Anpassung der Signalsteuerung an die aktuelle Verkehrslage sollte, wie in allen anderen Bereichen auch, die netzweiten Wirkungen der Steuerungsentscheidungen berücksichtigen.

### **6.2.2 Verkehrsnetz**

Der Schwerpunkt des Systems zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung liegt nicht allein auf der Ermittlung und Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs am Einzelknotenpunkt bzw. des Streckenzugs. Gerade im innerstädtischen Bereich steht die Abwägung der netzweiten Belange im Vordergrund. In der vorliegenden Arbeit wurden die technische Umsetzung sowie die vertiefende Untersuchung des verkehrlichen Nutzens für Einzelknotenpunkte und Straßenzüge durchgeführt. Die Erörterung der verkehrlichen Belange im Netz muss als weiterer Forschungsbedarf benannt werden, dennoch soll der Einsatz des kooperativen Systems im Netz für eine vollständige Betrachtung in den nächsten Absätzen zumindest thematisiert und diskutiert werden.

Aus der gewonnenen Erkenntnis des Konflikts zwischen einer flexiblen Steuerung einerseits und der Sicherheit der Prognose von Steuerungsentscheidungen andererseits wird für eine netzweite Verkehrssteuerung bzw. Verkehrsbeeinflussung eine stufenweise Vorgehensweise vorgeschlagen. Auf der Basis eines Bottom-up-Prinzips werden zunächst die Lösungsräume der einzelnen Knotenpunktarme untersucht. Ziel der Analyse ist eine Entscheidung, inwieweit die kooperative Lichtsignalsteuerung flexibel reagieren soll bzw. inwieweit sich die Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs mittels der Beeinflussung des Fahrverhaltens über eine konsistente Information realisieren lässt. Aufbauend auf die kleinteilige Lösungsfindung erfolgt die Überprüfung dieser Fragestellung für den Einzelknotenpunkt, für den Streckenabschnitt und letztlich für die Netzmasche und das Netz. Diese Vorgehensweise gewährleistet eine Rückkopplung und Prüfung der Entscheidungen und ermöglicht so eine netzweite Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs.

Die verkehrlichen Gegebenheiten in den verschiedenen Teilnetzen fordern unterschiedliche Lösungen. So kann es sein, dass in einem Teil des Netzes das Fahrverhalten durch Geschwindigkeitsempfehlungen beeinflusst wird, in einem anderem Teilnetz hingegen reagiert die Lichtsignalanlage flexibel durch die Anpassung der Freigabezeiten auf die anzutreffende Verkehrssituation.

Die vorgestellte kooperative Gesamtlösung erlaubt die Lokalisierung von Engpässen und die sukzessive Behebung der Schwachstellen im Netz. Mittels einer permanenten Rückkopplung und Kontrolle der verkehrlichen Effekte durch das System sowie durch die Prognose der verkehrlichen Wirkung der Entscheidungsalternativen kann es stufenweise zu einer Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs kommen. Defizite im Netz werden daher nicht verlagert, sondern ihre Ursache wirksam behoben. Ein Aufschwingen des Systems

muss zwingend durch Dämpfungsparameter, wie sie bspw. in den Randbedingungen festgelegt werden können, verhindert werden. Ein entsprechendes Verfahren zur Steuerung von signalisierten Straßennetzen mit Hilfe von Dämpfungsparametern wurde von LÄMMER-2007 vorgestellt und im Abschnitt 2.3.1 erwähnt. Eine flexible Umlaufzeit zur Anpassung der kooperativen Lichtsignalsteuerung an die aktuelle Verkehrssituation, wie sie in WAGNER ET AL.-2009 beschrieben wurde, ist nur an Einzelknoten sinnvoll und führt bei der Netzbetrachtung eher zu dem Effekt des Aufschwingens. So ist aus heutigen Netzsteuerungen bekannt, dass schnelle Änderung von Umlaufzeiten, die andauernde Änderung von Freigabezeitrahmen oder von Versatzzeiten mit starken Sprüngen das beschriebene Aufschwingen begünstigen.

Oft unterliegt die Steuerung des Verkehrs im innerstädtischen Netz politisch motivierten, aber auch verkehrlich gegebenen Randbedingungen. Diese unterscheiden sich wegen verschiedener Netztypen stark und sind mit den jeweiligen Städten abzustimmen. Einige Beispiele dieser Rahmenbedingungen sollen folgend aufgelistet werden:

- Minimierung der Gesamtreisezeit im Netz
- Grüne Welle in den einzelnen Streckenzügen des Verkehrsnetzes
- einheitliche Umlaufzeit im Netz
- Priorisierung des öffentlichen Verkehrs
- Optimierung mit dem Aspekt der Verbesserung des Verkehrsablaufs des Fuß- und Radverkehrs
- Optimierung bezüglich übergeordneter Ziele der Verkehrsplanung wie etwa die Verkehrsaufteilung oder die Verkehrsumlegung

Die jeweiligen Ziele, die ein System zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung verfolgt, sind individuell sehr verschieden. Sie basieren letztlich auf den durch die Auftraggeber festgelegten und den Verkehrsingenieur implementierten Randbedingungen. Auch sind die verkehrlichen Effekte, die durch das kooperative Gesamtsystem erzielt werden können, wesentlich komplexer als die einer alleinigen Anpassung der Lichtsignalsteuerung oder einer ausschließlichen Beeinflussung des Fahrverhaltens.

Auf der Netzebene können kooperative telematische Gesamtlösungen durch die Übermittlung von Routinginformationen Einfluss auf die Umlegung des Verkehrs nehmen. Auf der Grundlage des Erfassens von Engpässen und deren Übermittlung an die Fahrer kann es zur Optimierung der Routenwahl kommen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, die Gesamtkapazität des Verkehrsnetzes besser auszunutzen. Entsprechende Online-Umlegungen müssen mit Hilfe abgeschätzter Ausstattungsraten die Effekte der Verkehrsverlagerung im Prognosemodell erfassen und die Steuerungsentscheidungen des kooperativen Gesamtsystems entsprechend adaptieren. Neben kurzfristigen Änderungen im Verkehrsablauf können sich auch langfristig Anpassungen über Verhaltensadaptionen infolge des telematischen Systems einstellen. Dies betrifft netzweite Effekte hinsichtlich der Verkehrsaufteilung und der Umlegung. Daher sollten diese Aspekte bei der Installation des Systems beachtet werden.

Je nach Netztyp und Stadt sowie zuvor definierten Randbedingungen variieren die Ziele der Verkehrssteuerung und Verkehrsbeeinflussung. Deutlich wird hierbei, dass es nicht die „eine

kooperative Gesamtlösung“ geben wird. Unterschiedliche räumliche und zeitliche Gegebenheiten fordern auf den Einsatzfall abgestimmte differenzierte Logiken der Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung.

### 6.3 Empfehlungen für den Einsatz

Aus den vorangestellten Untersuchungen lassen sich ganz konkrete Empfehlungen für das telematische Gesamtsystem zur kooperativen Verkehrssteuerung mit Hilfe der Lichtsignalanlagen und zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung über informierte Fahrer ableiten. Über die Definition verkehrlicher Situationen in Abhängigkeit des Auslastungsgrades der Freigabezeit können die Anwendungsfälle des Gesamtsystems bezüglich der Anpassung der Lichtsignalsteuerung und hinsichtlich der Beeinflussung des Fahrverhaltens klar abgesteckt werden.

Trotz der widersprüchlichen Anforderungen zwischen Flexibilität der Steuerung und Stetigkeit der Prognose ergeben sich im Zusammenspiel große Potenziale, welche für die Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs nutzbar gemacht werden können. Auf der Basis des Auslastungsgrades der Freigabezeit und der Charakteristik des Verkehrsablaufs kann ermittelt werden, ob es auf der Grundlage der vorherrschenden Verkehrssituation sinnvoller ist, die Signalisierung hoch flexibel zu steuern oder stetige Informationen auf dem Endgerät im Fahrzeug zu erhalten. Auch die gleichzeitige flexible Anpassung der Steuerung mit der Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens kann sich als sinnvoll erweisen. Folglich können die Forschungshypothesen H 4-4 und H 5-3 positiv beantwortet werden.

Wie schon ausführlich diskutiert, kann das telematische Gesamtsystem erhebliche positive Wirkungen auf die Qualität des Verkehrsablaufs haben. Durch eine Harmonisierung der Geschwindigkeiten im Streckenabschnitt kann eine Erhöhung der räumlichen Homogenität erzielt werden. Über die Prognose und Berücksichtigung der netzweiten Effekte der aktuellen Steuerungsentscheidungen können stochastische Schwankungen des Verkehrsaufkommens innerhalb der Netzmaschen berücksichtigt werden. Dadurch erhöht sich die zeitliche Stationarität innerhalb der Netzmaschen. So kann das telematische System nicht nur durch Übermittlung von Warnhinweisen zu Gefahren- und Konfliktsituationen die Verkehrssicherheit verbessern, sondern die Erhöhung der Verkehrssicherheit resultiert auch aus einer Steigerung der zeitlichen Stationarität und der räumlichen Homogenität. Unvorhersehbare Fahrmanöver vorausfahrender ausgestatteter Fahrzeuge können dank der Übermittlung von zukünftigen Steuerungsinformationen minimiert werden.

Für die optimale Funktionsfähigkeit des kooperativen Gesamtsystems in städtischen Bereichen ist die Einbeziehung aller im Streckenabschnitt befindlichen signalisierten Knotenpunkte zwingend notwendig. Die von der Praxis oft geforderte Typisierung von Knotenpunkten oder gesamten Straßennetzen und die daraus abgeleiteten standardisierten Aussagen zum Einsatz des telematischen Gesamtsystems sind kaum möglich. Angesichts der genauen Erfassung der Verkehrssituation ist eine Typisierung der Straßennetze auch nicht notwendig, da sich das Gesamtsystem selbstständig an die Verkehrssituation anpassen kann. Lediglich die Randbedingungen müssen zuvor vom Ingenieur in Zusammenarbeit mit den Städten definiert und in das System eingepflegt werden.

## 7 Fazit und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Die Wirkung des Gesamtsystems zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung ergibt sich im Zusammenspiel des informierten Fahrers mit der Lichtsignalanlage. Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Systemen zur Verkehrssteuerung und Verkehrsbeeinflussung ist der wechselseitige Austausch aktueller Informationen. Im ausgestatteten Fahrzeug werden mobil erfasste Kenngrößen zur aktuellen Verkehrslage ermittelt, welche der Lichtsignalanlage zur Abbildung der Verkehrssituation und Anpassung der Signalisierung dienen. Andererseits übermittelt die Lichtsignalanlage Informationen zu prognostizierten Steuerungsentscheidungen, auf deren Basis das Fahrverhalten beeinflusst werden kann. Der wechselseitige Datenaustausch führt zu einer Kooperation mit beidseitigem Nutzen, einer sogenannten Win-Win-Situation.

Als erster Bestandteil der Gesamtlösung dient das *mobile Endgerät im Fahrzeug* sowohl als Lieferant der mobil erfassten Daten für die kooperative Lichtsignalanlage als auch als Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Anzeige der aktuellen und zukünftigen Steuerungsentscheidungen. Die Anzeige der Restzeitinformation hat ihren Nutzen vorwiegend in einer Reduktion der negativen Umweltwirkungen des Verkehrs über ein sinnvolles Motorenmanagement. Obendrein können positive verkehrliche Effekte durch die Beeinflussung des Fahrverhaltens mit Hilfe von Geschwindigkeitsempfehlungen erreicht werden. Gerade in historisch gewachsenen Netzen, in denen es aufgrund unterschiedlicher Knotenpunktabstände oftmals zu geringen Differenzzeiten zwischen theoretischer Ankunft an der Lichtsignalanlage und Beginn der Freigabezeit kommt, kann die Beeinflussung des Fahrverhaltens ihre Potenziale entfalten. Die verkehrliche Wirksamkeit ist abhängig von der Ausstattungsrate, dem Koordinierungsgrad, der Anzahl der durchgehenden Richtungsfahrstreifen, der minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung und der Fahrrelation der Fahrzeuge im Streckenabschnitt. Wegen der Vielfalt der Einflussfaktoren lassen sich die Aussagen nicht ohne weiteres generalisieren und die Empfehlungen zum Einsatz kaum standardisieren.

Der zweite Bestandteil des Gesamtsystems ist die *kooperative Lichtsignalanlage*. Gegenüber derzeitig verbreiteten verkehrsabhängigen Steuerungen, welche die aktuelle Verkehrssituation über die Eingangsdaten stationärer Erfassungseinrichtungen abbilden, bietet die Integration mobil erfasster Kenngrößen in die Steuerungsverfahren wesentliche Vorteile. Stationäre Erfassungseinrichtungen ermöglichen zwar das Erfassen von kollektiven Verkehrskenngrößen, jedoch ist eine repräsentative Aussage zu Verkehrszuständen aufgrund von Instationaritäten und Instabilitäten im Verkehrsfluss nur im direkten Umfeld der Detektoren möglich. Mobil erfasste Verkehrskenngrößen wie Rückstaulänge, Wartezeit, Anzahl der Halte, Reisezeit sowie die individuellen Fahrprofile der ausgestatteten Fahrzeuge ermöglichen eine linienhafte Aufnahme der Verkehrszustände und die Ableitung der Verkehrssituation im gesamten Bereich der Zufahrt. Unter Berücksichtigung der Ausstattungsrate lassen sich Aussagen zur Qualität des Verkehrsablaufs in der Zufahrt ableiten. Die detaillierte Kenntnis der aktuellen Verkehrssituation ermöglicht ein genaues Abbild des

Verkehrsgeschehens infolge der weiträumigeren Erfassung. Für die Steuerungsentscheidungen stehen größere Reaktionszeiten zur Verfügung. Viele heute angewendete Verkehrsflussmodelle leiten die Qualitätskenngrößen aus den Daten der stationären Erfassungseinrichtungen ab. Über die FCD-Technologie können diese Qualitätsparameter direkt erfasst und in die Steuerungsmodelle eingebunden werden. Bei hinreichend großer Ausstattungsrate kann ggf. auf einen Teil der stationären Erfassungseinrichtungen verzichtet werden, ohne dass bei der Qualität der Lichtsignalsteuerung Einbußen in Kauf genommen werden müssen.

Die Schwierigkeit des Zusammenspiels der Bestandteile im *Gesamtsystem zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung* lässt sich einfach beschreiben. Während der informierte Fahrer im ausgestatteten Fahrzeug stetige und langfristig sicher prognostizierte Steuerungsinformationen benötigt, ist aus Sicht der Lichtsignalsteuerung oftmals eine flexible und damit wenig vorhersagbare Steuerung sinnvoll, welche sich auf die Dynamik des Verkehrsablaufs anpassen kann. Aus dem Bestreben die Vorteile beider Funktionen optimal zu nutzen, ergeben sich abhängig von den momentanen Verkehrszuständen im Straßenzug bzw. Streckennetz ganz konkrete Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen, welche im Kapitel 6 umfassend beschrieben wurden. Die Einsatzgrenze der Einzelfunktionalität kann fast immer durch den Einsatzbereich der jeweils anderen Funktionalität kompensiert werden.

## 7.2 Grenzen und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnten viele Aspekte des vorgestellten telematischen Gesamtsystems beleuchtet werden. Naturgemäß gibt es noch etliche weitere Kriterien, die z. B. durch die Simulationsuntersuchungen nicht abgedeckt werden konnten. Wegen des geringen Stichprobenumfangs der Messfahrten können die simulativ gewonnenen Ergebnisse bei den Untersuchungen im Testfeld nur in ihren Tendenzen nachgewiesen werden. Die Nachbildung des kompletten Spektrums der ermittelten Einsatzgrenzen und -gebiete war im realen Testfeld nur eingeschränkt möglich.

Aus dem typischen Verhalten der Kraftfahrzeugfahrer wurden Szenarien für die simulativen Untersuchungen der verkehrlichen Wirksamkeit der *kooperativen Verkehrsbeeinflussung* definiert. Aufgrund der Vielfalt an Fahrertypen können prinzipiell nicht alle Verhalten nachgebildet werden und somit kann es im realen Umfeld zu Abweichungen von den simulativ ermittelten Erkenntnissen kommen. Leider ergab sich nicht die Möglichkeit, Langzeitversuche im realen Verkehrsfluss durchzuführen. Eventuell negative als auch positive Verhaltensadaptionen und deren Wirkungen auf die Qualität und Sicherheit des Verkehrsablaufs konnten so nicht analysiert werden. Aus den Ergebnissen der Simulation können ferner nur die direkten Beeinflussungen anderer Fahrer ermittelt werden. Bei umfassender Kenntnis dieser Applikation unter allen Verkehrsteilnehmern könnte bspw. eine indirekte Beeinflussung dazu führen, dass bei einem zweistreifigen Richtungsquerschnitt ein nicht ausgestattetes Fahrzeug einem ausgestatteten Fahrzeug folgt, obwohl es theoretisch überholen könnte. Inwieweit Fahrzeugführer Unstetigkeiten in der Prognose der Steuerungszustände durch verkehrsabhängige Anpassungen der Signalisierung akzeptieren, wurde in dieser Arbeit nicht nachgewiesen. Dieser Punkt sollte durch Befragungen und Tests



untersucht werden. Auch Begründungen, die Fahrern für veränderte prognostizierte Restrotzeiten akzeptieren würden, wären für Akzeptanzbetrachtung kooperativer Systeme von Interesse. Da keine energetische Betrachtung stattgefunden hat, können auch keine Aussagen getroffen werden, ab welcher Geschwindigkeit und Streckenlänge es sich eher lohnt schnell an die Lichtsignalanlage zu fahren und den Motor auszuschalten, anstatt sich langsam der Anlage zu nähern und so eventuell Mehrverbräuche im Streckenabschnitt zu erzeugen.

Aus Sicht der *kooperativen Verkehrssteuerung* resultiert der weitere Forschungsbedarf vorwiegend aus dem Sachverhalt, dass diese Arbeit lediglich die funktionalen Zusammenhänge zwischen den mobil erfassten Daten zur Abbildung der Verkehrssituation untersucht. Es wurde kein Steuerungsverfahren entwickelt. Die Übertragung der Ergebnisse der Gegenüberstellung der mobil erfassten Kenngrößen auf verkehrsabhängige Steuerungen wird zwar vermutet, eine Untersuchung mit bestehenden verkehrsabhängigen Steuerungen müsste jedoch noch erfolgen. Hinsichtlich der Implementierung der kooperativen Anwendung in die bestehenden Steuerungsverfahren besteht weiterer Untersuchungsbedarf. Aussagen zu den notwendigen Ausstattungsraten als auch die daraus abgeleiteten Angaben zur Einsparung herkömmlicher stationärer Erfassungseinrichtungen wurden mit Hilfe theoretischer Betrachtungen diskutiert und sind nach der Entwicklung eines kooperativen Steuerungsverfahrens weiter zu präzisieren.

Das *Gesamtsystem zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung* im Zusammenspiel zwischen informiertem Fahrer und Lichtsignalanlage wurde real getestet, jedoch waren nur wenige ausgestattete Versuchsfahrzeuge verfügbar. Die entstehenden Wechselwirkungen konnten so nur abgeschätzt werden. Zur Präzisierung der Ergebnisse wurden Simulationsuntersuchungen durchgeführt. Weitere Untersuchungen der verkehrlichen Wirksamkeit im realen Testfeld müssten sich mit einer flächenhaften Umsetzung des Konzeptes befassen. Die Mindestanforderung an eine solche Untersuchung sollte eine ausgestattete Netzmasche im städtischen Straßennetz sein. Um den verkehrlichen Einfluss der Ausstattungsrate nachweisen zu können, sollten Testfahrten mit variablen Ausstattungsraten durchgeführt werden. Über die Auswertung der so gesammelten Ergebnisse und Erfahrungen können die Einsatzbereiche und -grenzen des Gesamtsystems weiterführend untersucht werden.

Im innerstädtischen Verkehrsablauf spielen unter dem Aspekt der integrativen Betrachtung aller Verkehrsteilnehmer nicht nur die vorgestellten Belange des motorisierten individuellen Verkehrs eine Rolle. Grundsätzlich ist das kooperative Gesamtsystem in der Lage, die Bedürfnisse aller Verkehrsarten integrativ zu berücksichtigen. Neben den dargestellten positiven verkehrlichen Effekten für den motorisierten Individualverkehr, kann der Fuß- und Radverkehr vor allem über die Anpassung der Geschwindigkeitswahl positiv beeinflusst werden. Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs und Einsatzfahrzeuge hingegen werden innerhalb der Lichtsignalsteuerung direkt berücksichtigt. Um das Vertrauen der Verkehrsteilnehmer in die Prognose nicht zu mindern und somit die Akzeptanz des Systems zu schmälern, sollten bei Unstetigkeiten innerhalb des Prognosehorizontes, welche bspw. durch Eingriffe des öffentlichen Verkehrs hervorgerufen werden, Erklärungen an den Fahrer

bezüglich des Grundes der geänderten Prognose übermittelt werden. Die integrative Betrachtung aller Verkehrsteilnehmer fand im Rahmen dieser Arbeit nicht statt.

### **7.3 Fazit**

Signalisierte Knotenpunkte beeinflussen als unerlässliche Bestandteile des innerstädtischen Straßennetzes die Qualität des Verkehrsablaufs maßgeblich. Die umfassenden technischen Entwicklungen der Vergangenheit ermöglichen heute eine schnelle und verhältnismäßig kostengünstige Verbreitung von kooperativen Telematiklösungen. In dieser Arbeit wurde das Gesamtkonzept zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung über Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation zwischen einem mobilen Endgerät im Fahrzeug und der Lichtsignalanlage vorgestellt.

Der wechselseitige Austausch aktueller Informationen zur Verkehrslage einerseits und zu prognostizierten Steuerungsentscheidungen von Lichtsignalanlagen andererseits kann zu einer Erhöhung der Qualität des Verkehrsablaufs und zu einer Verbesserung der Verkehrssicherheit führen. Die kooperative Verkehrssteuerung kann mit Hilfe der mobil erfassten Daten ihren Erfassungshorizont erweitern. Die Lichtsignalanlage ist so in der Lage, die aktuelle Verkehrssituation detaillierter abzubilden und ihre Steuerungsentscheidungen frühzeitiger anzupassen. Dies ermöglicht die Reduktion von Wartezeiten und Rückstaulängen in den Zufahrten der Lichtsignalanlage sowie einen Rückgang der Anzahl der Halte in koordinierten Straßenzügen. Das Fahrverhalten des informierten Fahrers kann durch die Übermittlung von individuellen Geschwindigkeitsempfehlungen zum Erreichen der stromabwärtigen Lichtsignalanlage bei Grün beeinflusst werden.

Im Gesamtsystem zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung ergeben sich für die Einzelfunktionen spezifische Einsatzgebiete und -grenzen. Im Zusammenspiel können die Vorzüge beider Funktionen so genutzt werden, dass die Nachteile der jeweilig anderen Funktion eliminiert werden. Die Beeinflussung des Fahrverhaltens führt zu einer Erhöhung der räumlichen Homogenität im Verkehrsablauf.

In dieser Arbeit konnten die verkehrlichen Nutzen beim flächendeckenden Einsatz des kooperativen Gesamtsystems unter Beachtung von Mindestausstattungsdaten im Verkehrstrom umfassend nachgewiesen werden. Zudem konnte die technische Realisierbarkeit aufgezeigt werden. Die vorgestellte telematische Gesamtlösung zur kooperativen Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung ist in der Lage, ungenutzte Potenziale zu erschließen und durch deren gezielte Nutzung die Qualität des Verkehrsablaufs zu verbessern.



## Literaturverzeichnis

### Bücher, Zeitschriften und Tagungsbände:

ALMASRI-2006	ALMASRI, E.: <i>A New Offset Optimization Method for Signalized Road Networks.</i> Universität Hannover, Dissertation, 2006.
BAIER-2003	BAIER, M.: <i>Verkehrsqualität auf Streckenabschnitten von Hauptverkehrsstraßen.</i> In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V108, Bergisch Gladbach, 2003.
BAUER-1994	BAUER, M.: <i>Vermessung und Ortung mit Satelliten – NAVSTAR-GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme.</i> 3. Auflage, Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag GmbH, 1994.
BERGMANN ET AL.-2003	BERGMANN, F.; GERHARDT, H.-J.; FROHBERG, W.: <i>Taschenbuch der Telekommunikation.</i> 2. Auflage, Leipzig, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003.
BERNHARD & GRAHL-2008	BERNHARD, J.; GRAHL, S.: <i>Praktischer Leitfaden zur Beurteilung der Qualität an Lichtsignalanlagen.</i> In: Straßenverkehrstechnik 08/2008, S. 477-481.
BERNHARD & GRAHL-2009	BERNHARD, J.; GRAHL, S.: <i>Praktischer Leitfaden zur Beurteilung der Qualität an Lichtsignalanlagen – Checklisten und normierte Kenngrößenbewertung.</i> In: Straßenverkehrstechnik 08/2009, S. 517-525.
BÖKE ET AL.-2008	BÖKE, C.; KLESS, A.; GOßNER, M.: <i>Effizienter Zugriff auf den FlexRay-Bus.</i> In: Elektronik automotive 5/2008, S. 58-60.
BOSSERHOFF-2006	BOSSERHOFF, D.: <i>Qualitätssicherung an Lichtsignalanlagen der Hessischen Straßen- und Verkehrsverwaltung.</i> In: Straßenverkehrstechnik 04/2006, S. 205-213.
BRAUN ET AL.-2009	BRAUN, R.; KEMPER, C.; MENIG, C.; BUSCH, F.; HILDEBRANDT, R.; PAULUS, I.; PRESSLEIN-LEHLE, R.; WEICHENMEIER, F.: <i>TRAVOLUTION - Netzweite Optimierung der Lichtsignalsteuerung und LSA-Fahrzeug-Kommunikation.</i> In: Straßenverkehrstechnik 6/2009, S. 365-374.
BRAUN & WEICHENMEIER-2005	BRAUN, R.; WEICHENMEIER, F.: <i>Automatische Offline-Optimierung der lichtsignaltechnischen Koordinierung des MIV im städtischen Netz unter Verwendung genetische Algorithmen.</i> In: HEUREKA '05, Optimierung in Verkehr und Transport, München, 2005, S. 313-330.
BREITENBERGER ET AL.-2004	BREITENBERGER, S.; GRÜBER, B.; NEUHERZ, H.: <i>Extended Floating Car Data – Potenziale für die Verkehrsinformation und notwendige Durchdringungsraten.</i> In: Straßenverkehrstechnik 10/2004, S. 522-531.
BRILON ET AL.-2009	BRILON, W.; WIETHOLD, T.; POTT, A.; ZELKE, U.: <i>Adaptive koordinierte Signalsteuerung in Münster.</i> In: Straßenverkehrstechnik 09/2009, S. 565-573.
BRILON & SCHNABEL -2003	BRILON, W.; SCHNABEL, W.: <i>Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen.</i> In: Straßenverkehrstechnik 01/2003, S. 21-26.

BRILON & WIETHOLD-2008	BRILON, W.; WIETHOLD, T: <i>Festzeitgesteuerte und verkehrsabhängige Koordinierungen.</i> In: Straßenverkehrstechnik 09/2008, S. 537-543.
BUSCH & KRUSE-1993	BUSCH, F.; KRUSE, G.: <i>MOTION – Ein neues Verfahren für die städtische Lichtsignalsteuerung und seine Erprobung im Rahmen des EG-Programms ATT.</i> In: HEUREKA '93, Optimierung in Verkehr und Transport, München, 1993, S.79-93.
CELIKKAN ET AL. 2009	CELIKKAN, Y.; HOFFMANN, A.; SCHLABBACH, K.: <i>Restzeitanzeige für Autofahrer.</i> In: Straßenverkehrstechnik 02/2009, S. 91-96.
CELIKKAN ET AL. 2008	CELIKKAN, Y.; HOFFMANN, A.; SCHLABBACH, K.: <i>Restzeitanzeige für Fußgänger.</i> In: Straßenverkehrstechnik 01/2008, S. 20-24.
DIN1-2002	DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: <i>DIN VDE 0832-100: Straßenverkehrssignalanlagen.</i> Berlin, 2002.
DÜRR-2002	DÜRR, P.: <i>Evolution adaptiver Steuerungsverfahren für den städtischen Mischverkehr.</i> In: HEUREKA '02, Optimierung in Verkehr und Transport, München, 2002, S. 351-368.
FGSV-1991A	FGSV – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN: <i>Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr.</i> Köln, 1991.
FGSV-1991B	FGSV – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN: <i>Empfehlungen für Verkehrserhebungen.</i> Köln, 1991.
FGSV-2000	FGSV – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN: <i>Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb.</i> Köln, 2000.
FGSV-2006A	FOLKERTS, G.; KIRSCHFINK, H.; WEBER, R.: <i>Hinweise zur Qualitätsanforderung und Qualitätssicherung der lokalen Verkehrsdatenerfassung für Verkehrsbeeinflussungsanlagen.</i> Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Köln, 2006.
FGSV-2006B	FGSV – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN: <i>Hinweise zur Qualitätsanforderung und Qualitätssicherung der lokalen Verkehrsdatenerfassung für Verkehrsbeeinflussungsanlagen.</i> Köln, 2006.
FGSV-2008	FGSV – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN: <i>Hinweise zu Planung und Betrieb von betreiberübergreifenden Netzsteuerungen in der Verkehrsbeeinflussung.</i> Köln, 2008.
FRIEDRICH- 1999	FRIEDRICH, B.: <i>Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen</i> Technische Universität München, Dissertation, 1999.
FRIEDRICH- 2000	FRIEDRICH, B.: <i>Steuerung von Lichtsignalanlagen: BALANCE – ein neuer Ansatz.</i> In: Straßenverkehrstechnik 07/2000, S. 321-328.
FRIEDRICH ET AL.-2009	FRIEDRICH, B; HOFFMANN, S.; KUTZNER, R.; POHLMANN, T.: <i>Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen – Ein Leitfaden für die Praxis.</i> In: Straßenverkehrstechnik 12/2009, S. 778-788.
GARTNER-1990	GARTNER, N.: <i>OPAC.</i> In: Control, Computers, Communications in Transportation: selected papers from the IFAC Symposium. Pergamon Press, 1990, S. 241-244.

HBS-2001	FGSV – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN: <i>HBS – Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen.</i> Köln, 2005.
HENRY & FARGES-1989	HENRY, J.; FARGES, J.: <i>PRODYN.</i> Proceedings of the 6th IFAC-IFIP-FORS Symposium on Transportation, 505-507, 1989.
HERKT-1994	HERKT, S.: <i>Abstimmung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage und knotenfreien Strecken an innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen</i> Universität Stuttgart, Dissertation, 1994.
HERWIG & STERN-1990	HERWIG, R., STERN, K.: <i>Das rechnergesteuerte Betriebsleitsystem bei den Stadtwerken München-Verkehrsbetriebe.</i> In: Verkehr und Technik 1990 Heft 1, S. 417-424.
HOFFMANN ET AL.-1986	HOFFMANN, G.; LEICHTER, K.; RICHTER, M.; SCHÖBER, W.: <i>Verkehrstechnische Untersuchung zum Informationssystem „Wolfsburger Welle“.</i> Untersuchung der TU Berlin, Berlin, 1986.
HOYER ET AL.-2010	HOYER, R.; LEITZKE, C.; OTTO, T.: <i>Hybride Entwicklungs- und Testumgebung für verteilte Fahrzeug-Infrastruktur-Anwendungen am Beispiel kooperativer Lichtsignalanlage.</i> In: 11. Braunschweiger Symposium AAET 2010. Braunschweig, Deutschland, 10.-11. Februar 2010, Tagungsband, S. 436-444.
HUBER-2001	HUBER, W.: <i>Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von Verkehrsinformationen.</i> Technische Universität München, Dissertation, 2001.
HUNT ET AL.-1981	HUNT, P.; ROBERTSON, D.; BRETHERTON, R.; WINTON, R.: <i>SCOOT: A tra_c responsive Method of coordinating Signals.</i> In: Transport and Road Research. Crowthorne, 1981.
KELLER ET AL.-2002	KELLER, H.; FRIEDRICH, B.; WULFFIUS, H.; WOLTERS, W. MERTZ, J., SCHÜLER, T.: <i>Verkehrsadaptive Netzsteuerung von Lichtsignalanlagen.</i> In: Straßenverkehrstechnik 07/2002, S. 333-338.
KEPING-1997	KEPING, L.: <i>Mikroskopische Simulation des Verkehrsablaufs aller Verkehrsteilnehmergruppen an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten.</i> Universität Darmstadt, Dissertation, 1997.
KLEIN ET AL.-2008	KLEIN, S.; WINKLER, T.; LISTL, G.; WILBERSCHIEDT, M.: <i>Nutzerpotentiale der Priorisierung von Einsatzfahrzeugen an Lichtsignalanlagen.</i> In: Straßenverkehrstechnik 09/2008, S. 564-568.
KNOTE ET AL.-1999	KNOTE, T.; KORN, J.; LÄTZSCH, L.; RINGEL, R. SCHNABEL, W.: <i>Bewertung des Verkehrsablaufs auf städtischen Hauptverkehrsstraßen – gezeigt am Beispiel der Reisezeitmessungen in der Stadt Dresden.</i> 1. Auflage, Dresden, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, 1999.
KÜLZER-1997	KÜLZER, B.: <i>Untersuchungen zum Alterungsprozeß von Lichtsignalprogrammen.</i> Universität Darmstadt, Dissertation, 1996.
LÄMMER-2007	LÄMMER, S.: <i>Reglerentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken.</i> Technische Universität Dresden, Dissertation, 2007.

LÄMMER ET AL.- 2009	LÄMMER, S., KRIMMLING, J., HOPPE, A.: <i>Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen - Regelungstechnischer Ansatz und Simulation.</i> In: Straßenverkehrstechnik 11/2009, S. 714-721.
LEHNHOFF-2005	LEHNHOFF, N.: <i>Überprüfung und Verbesserung der Qualität von automatisch erhobenen Daten an Lichtsignalanlagen.</i> Universität Hannover, Dissertation, 2005.
LI & MATHIAS- 2008	LI, Y.; MATHIAS, P.: <i>Network-Wide Traffic Signal Control with Recurrent Neural Networks.</i> In: ITS 15th World Congress 2008, New York, 2008.
LISTL-2003	LISTL, G.: <i>Anwendung neuer Technologien zur Erfassung des Verkehrsablaufs.</i> Universität Kassel, Dissertation, 2003.
LOWRIE-1982	LOWRIE, P.: <i>SCATS Principles, Methodologies, and Algorithms.</i> In: IEE Conference on Road Traffic Signals. IEE Publications, 1982, S. 67-70.
MANSFELD- 1994	MANSFELD, W.: <i>Funkortungs- und Funknavigationsanlagen.</i> 1. Auflage, Heidelberg, Hüthig Buch Verlag GmbH, 1994.
MAIER ET AL.- 2008	MAIER, F.; BRAUN, R.; BUSCH, F.; MATHIAS, P.: <i>Musterbasierte Kurzfristprognose der innerörtlichen Störungsausbreitung und automatische Maßnahmenempfehlung.</i> In: Straßenverkehrstechnik 09/2008, S. 556-563.
MAURO & DITARANO-1990	MAURO, V.; DITARANO, C.: <i>UTOPIA.</i> In: Control, Computers, Communications in Transportation: selected papers from the IFAC Symposium. Pergamon Press, 1990, S. 245-252.
MENIG ET AL.- 2005	MENIG, C; HILDEBRAND, R.; BRAUN, R.: <i>Der informierte Fahrer – Optimierung des Verkehrsablaufs durch LSA-Fahrzeug-Kommunikation.</i> In: HEUREKA '08, Optimierung in Verkehr und Transport, Stuttgart, 2008, S. 144-163.
MERTZ-2001	MERTZ, J.: <i>Ein mikroskopisches Verfahren zur verkehrsadaptiven Knotenpunktsteuerung mit Vorrang des öffentlichen Verkehrs.</i> Technische Universität München, Dissertation, 2001.
MERTZ & WEICHENMEIER- 2002	MERTZ, J.; WEICHENMEIER, F.: <i>Modellbasierte multimodale LSA-Steuerung in Echtzeit.</i> In: Straßenverkehrstechnik 05/2002, S. 245-250.
MEYER-2008	MEYER J.; LANGNER F.; ALSMANN, U.: <i>Fahrversuch versus HiL-Test.</i> In: Elektronik automotive 4/2008, S. 67-71.
MÜCK-2002	MÜCK, J.: <i>Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren.</i> In: HEUREKA '02, Optimierung in Verkehr und Transport, 2002, München, S. 385-402.
OTTO & HOYER- 2009A	OTTO, T.; HOYER, R.: <i>Devices-in-the-Loop Approach - Traffic Simulation meets real Devices of distributed V2I Applications.</i> In: mobil.TUM 2009 – International Scientific Conference on Mobility and Transport. Munich, Germany, May 12-13, 2009, Proceedings.
OTTO & HOYER- 2009B	OTTO, T.; HOYER, R.: <i>Geocoding Approach to V2I Communication assisted Traffic Lights using Nomadic Devices.</i> In: 16th World Congress on Intelligent Transport Systems - Stockholm, Sweden, September 21-25, 2009, Proceedings.

- 
- |                          |   |
|--------------------------|---|
| OTTO & HOYER-2010A       | OTTO, T.; HOYER, R.:<br><i>Operating Conditions of on-board displayed dynamic Green Wave Speeds via V2I-Communication.</i> In: 5th International Symposium Networks on Mobility - Stuttgart, Germany, September 30 - October 01, 2010, Proceedings.       |
| OTTO & HOYER-2010B       | OTTO, T.; HOYER, R.:<br><i>Probe Vehicle Estimation of Parameters for Adapting Traffic Signal Control at single Intersections.</i> In: 17th World Congress on Intelligent Transport Systems - Busan, Republic of Korea, October 25-29, 2010, Proceedings. |
| POSCHMANN ET AL.-2007    | POSCHMANN, M.; PÖGEL, E.; BALTZER, W.; ZUMBROICH, M.:<br><i>Zukünftige Kommunikationstechniken und Integration von Straßentunneln im Bereich der TLS.</i> In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 955, Bonn, 2007.                      |
| PRIEMER & FRIEDRICH-2008 | PRIEMER C., FRIEDRICH, B.:<br><i>A Method for Tailback Approximation via C2I-Data Based on Partial Penetration.</i> In: ITS 15th World Congress 2008, New York, 2008.   |
| REUßWIG-2005             | REUßWIG, A.:<br><i>Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen.</i> Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2005.  |
| RICHTER-2005             | RICHTER, A.:<br><i>Geschwindigkeitsvorgabe an Lichtsignalanlagen – Technische Aspekte und volkswirtschaftlicher Nutzen.</i> Universität der Bundeswehr Hamburg, Dissertation, 2005.   |
| RIEGELHUTH-2010          | RIEGELHUTH, G.:<br><i>Kooperative Systeme – Sicher und staufrei in die Zukunft.</i> In: Straßenverkehrstechnik 04/2010, S. 224-238.   |
| RILSA-2010               | FGSV – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN:<br><i>RiLSA - Richtlinien für Lichtsignalanlagen.</i> Köln, 2010.   |
| ROBERTSON-1997           | ROBERTSON, D.I.:<br>The TRANSYT method of co-ordination traffic signals. In: Traffic Engineering and Control 38, S. 76-78, 1997.  |
| SCHNABEL ET AL.-1998     | SCHNABEL, W.; RINGEL, R.; LÄTZSCH, L.; KNOTE, T.:<br><i>Die Qualität des Verkehrsablaufs auf städtischen Hauptverkehrsstraßen.</i> In: Straßenverkehrstechnik 12/1998, S. 635-643.  |
| SCHNABEL-2006            | SCHNABEL, W.:<br><i>Probleme, Effizienz und Erfahrungen beim Betrieb von Grünen Wellen.</i> In: Straßenverkehrstechnik 04/2006, S. 192-199.   |
| SCHNABEL & LOHSE-1997A   | SCHNABEL, W.; LOHSE, D.:<br><i>Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung – Band 1 Verkehrstechnik.</i> 2. Auflage, Berlin, Verlag für Bauwesen, 1997, ISBN: 3-345-00566-2.  |
| SCHNABEL & LOHSE-1997B   | SCHNABEL, W.; LOHSE, D.:<br><i>Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung – Band 2 Verkehrsplanung.</i> 2. Auflage, Berlin, Verlag für Bauwesen, 1997, ISBN: 3-345-00567-0.  |
| STEINAUER ET AL.-2006    | STEINAUER, B.; BRAKE, M.; BAIER, M.; KATHMANN, T.:<br><i>Integration mobil erfasster Verkehrsdaten (FCD) in die Steuerungsverfahren der kollektiven Verkehrsbeeinflussung.</i> Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn, 2006.               |
-



WAGNER ET AL.- 2009	WAGNER, P.; AMME, F.; ERNST, H.; FORSBALD, C.; MICHAEL, M.; POPPE, H.; RING, D.: <i>Wirksamkeit einer kooperativen Verkehrssteuerung.</i> In: Straßenverkehrstechnik 07/2009, S. 434-441.
WIEDEMANN- 1986	WIEDEMANN, R.: <i>Verkehrsablauf hinter Lichtsignalanlagen.</i> Universität (TH) Karlsruhe, Dissertation, 1968.
WIEDEMANN ET AL.-1991	WIEDEMANN, R.; QUEREJETA-IRAOLA, A; SCHNEIDER, R; SCHMIDT, J.: <i>Genauigkeitsvergleich unterschiedlicher Sensoren zur Geschwindigkeitsmessung auf Bundesautobahnen sowie für die Fahrzeußerfassung.</i> In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 601, Bonn, 1991.
WU-1999	WU, N.: <i>Optimierung von Signalzeitenplänen nach dem Gleichgewichtsprinzip.</i> Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 1999.
ZIMDAHL-1983	ZIMDAHL, W.: <i>Wolfsburger Welle.</i> VW Forschung, Wolfsburg, 1983.

#### Internetquellen:

AKTIV-2011	AKTIV-VM – TEILPROJEKT „KOOOPERATIVE LICHTSIGNALANLAGE“: Aktive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr – Verkehrsmanagement – Verbundprojekt gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) <a href="http://www.aktiv-online.org/">http://www.aktiv-online.org/</a> (letzter Zugriff 02.02.2011)
BILD-WWW1	Bildquelle: <a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/b/b3/Geschwindigkeitssignal.jpg">http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/b/b3/Geschwindigkeitssignal.jpg</a> (letzter Zugriff 12.09.2010)
BILD-WWW2	Bildquelle: <a href="http://www.travolution-ingolstadt.de/fileadmin/user_upload/AUDI_Der_informierte_Fahrer_PRINT.jpg">http://www.travolution-ingolstadt.de/fileadmin/user_upload/ AUDI_Der_informierte_Fahrer_PRINT.jpg</a> (letzter Zugriff 12.09.2010)
BOHLINGER- 2006	BOHLINGER, M.: <i>Koordinierte Lichtsignalsteuerung.</i> <a href="http://www.ivh.uni-hannover.de/optiv/Fallbsp/08-lsa/08-lsa/08-lsa.pdf">http://www.ivh.uni-hannover.de/ optiv/Fallbsp/08-lsa/08-lsa/08-lsa.pdf</a> (letzter Zugriff 02.03.2009)
BOILLOT & VINANTI-2004	BOILLOT, F.; VINANTI, P.: <i>Priorité aux feux des transports collectifs de surface (bus et tramway)</i> <a href="https://pfi-itgur.inrets.fr/evenement/seminaire0412/PFI-ITG-Priorite%20au%20feux%20TC.ppt">https://pfi-itgur.inrets.fr/evenement/seminaire0412/PFI-ITG- Priorite%20au%20feux%20TC.ppt</a> (letzter Zugriff 02.03.2009)
NOW-2007	NETWORK ON WHEELS - NOW: <a href="http://www.network-on-wheels.de">http://www.network-on-wheels.de</a> (letzter Zugriff 08.10.2008)
SCHLOTHAUER & WAUER- 2009	SCHLOTHAUER & WAUER: <i>Wirkungsweise der übergeordneten Verkehrssteuerung.</i> <a href="http://www.vimos.org/downloads/Vortraege-Nov-2008/Schlothauer.pdf">http://www.vimos.org/downloads/Vortraege-Nov-2008/Schlothauer.pdf</a> (letzter Zugriff 02.03.2009)

## Abkürzungsverzeichnis

AKTIV-VM	Adaptive und Kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr - Verkehrsmanagement
C2C	Car to Car Communication
C2I	Car to Infrastructure Communication
DGPS	Differential Global Positioning System
DiL	Devices-in-the-Loop
FCD	Floating Car Data
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FS	Fahrstreifen
Fz	Fahrzeug
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HiL	Hardware in the Loop
HMI	Human Machine Interface
I2I	Infrastructure to Infrastructure Communication
IP	Internetprotokoll
ISDN	Integrated Services Digital Networks
LAN	Local Area Network
LC	Liquid Crystal
LSA	Lichtsignalanlage
MAN	Metropolitan Area Network
MOST	Media Oriented Systems Transport
NAVSTAR	Navigation System with Time and Ranging
NMEA	National Marine Electronics Association
NOW	Network on Wheels
OCIT	Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PDA	Personal Digital Assistant
PDOP	Positional Dilution of Precision
QSV	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs
RiLSA	Richtlinien für Lichtsignalanlagen
RSU	Road Side Unit
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunication Systems
VDOP	Vertical Dilution of Precision
VW	Volkswagen
WAN	Wide Area Network
WGS	World Geodetic System
WLAN	Wireless Local Area Network
X-FCD	Extended Floating Car Data

## Abbildungsverzeichnis und Tabellenverzeichnis

### Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 2-1: Problematik der Ausstattungsrate.....	7
Abbildung 2-2: Funktionsweise satellitengestützter Ortungssysteme .....	9
Abbildung 2-3: I2I-Kommunikation .....	11
Abbildung 2-4: C2C-Kommunikation.....	11
Abbildung 2-5: C2I-Kommunikation .....	11
Abbildung 2-6: Ortsfeste Restzeitanzeige.....	12
Abbildung 2-7: Ortsfeste dynamische Grüne Welle Anzeige .....	13
Abbildung 2-8: Mobile dynamische Grüne Welle Anzeige – Fahrzeug .....	14
Abbildung 2-9: Mobile dynamische Grüne Welle Anzeige – Anzeigmodi .....	15
Abbildung 2-10: Fahrprofile im Zufluss einer kooperativen LSA – Bsp. 1.....	17
Abbildung 2-11: Fahrprofile im Zufluss einer kooperativen LSA – Bsp. 2.....	17
Abbildung 2-12: Mobile dynamische Grüne Welle Anzeige – TRAVOLUTION.....	19
Abbildung 2-13: Regelbasierte und modellbasierte Verfahren – Sequenzdiagramm .....	21
Abbildung 3-1: Kooperative Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung.....	33
Abbildung 3-2: Versuchsanordnung zur Ermittlung des GPS-Fehlers .....	35
Abbildung 3-3: Darstellung des GPS-Fehler – Häufigkeitsdiagramme .....	36
Abbildung 3-4: Darstellung des GPS-Fehler – Beispielbetrachtung .....	37
Abbildung 3-5: Darstellung des GPS-Fehler – Satellitenwahl .....	38
Abbildung 3-6: Ergebnis der Georeferenzierung .....	40
Abbildung 3-7: Kooperation zwischen LSA und Fahrzeug – Sequenzdiagramm .....	41
Abbildung 3-8: Darstellung der mittleren Kommunikationsreichweiten WLAN 802.11b/g.....	43
Abbildung 3-9: DiL-Testsystem – Sequenzdiagramm.....	46
Abbildung 3-10: DiL-Testsystem – Aufbau .....	46
Abbildung 4-1: Restzeitinformation auf mobilem Endgerät.....	50
Abbildung 4-2: Geschwindigkeitsinformation auf mobilem Endgerät.....	51
Abbildung 4-3: Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung – Sequenzdiagramm .....	52
Abbildung 4-4: Fahrlinien der Berechnungsmethode 1.....	55
Abbildung 4-5: Fahrlinien der Berechnungsmethode 2.....	56
Abbildung 4-6: Anpassung Fahrgeschwindigkeit an die Geschwindigkeitsempfehlung.....	56
Abbildung 4-7: Testrouten der Messfahrten auf Strecke 1 .....	59
Abbildung 4-8: Verkehrsbeeinflussung unter verschiedenen Ausstattungsraten.....	60
Abbildung 4-9: Einflussfaktor Koordinierungsgrad – qualitativ.....	61
Abbildung 4-10: Einflussfaktor Koordinierungsgrad – quantitativ .....	61
Abbildung 4-11: Einflussfaktor Anzahl der Fahrstreifen– qualitativ.....	62
Abbildung 4-12: Einflussfaktor Anzahl der Fahrstreifen – quantitativ .....	63
Abbildung 4-13: Einflussfaktor akzeptierte Geschwindigkeit – qualitativ .....	63
Abbildung 4-14: Einflussfaktor akzeptierte Geschwindigkeit – quantitativ .....	64
Abbildung 4-15: Einflussfaktor akzeptierte Geschwindigkeit – Beispiel.....	65
Abbildung 4-16: Einflussfaktor akzeptierte Geschwindigkeit – mittlerer Wirkungsgrad .....	66
Abbildung 4-17: Einflussfaktor Fahrrelationen – Prinzipskizze .....	67
Abbildung 4-18: Einflussfaktor Fahrrelation – qualitativ.....	68
Abbildung 4-19: Einflussfaktor Fahrrelation – quantitativ.....	69
Abbildung 4-20: Einflussfaktor Pulkbildung – Prinzipskizze.....	69
Abbildung 4-21: Einflussfaktor Reisezeit – qualitativ .....	70
Abbildung 4-22: Fahrlinien bei variablen Ausstattungsraten.....	75

Abbildung 4-23: Fahrlinien bei variablen akzeptierten Geschwindigkeiten.....	75
Abbildung 4-24: Fahrlinien unter Betrachtung negativer Auswirkungen.....	76
Abbildung 4-25: Fahrlinien der Testfahrten auf Route 2.....	77
Abbildung 4-26: Fahrlinien der Testfahrten auf Route 1.....	77
Abbildung 4-27: Mittlere Beschleunigung mit/ohne Verkehrsbeeinflussung.....	79
Abbildung 4-28: Einfluss Streckengeometrie auf die Verkehrsbeeinflussung – Darstellung .	81
Abbildung 4-29: Einfluss der Streckengeometrie Verkehrsbeeinflussung – Beispiel .....	81
Abbildung 4-30: Einfluss Routenwahl auf Verkehrsbeeinflussung .....	83
Abbildung 5-1: Simulationsmodell Signalgruppenezufahrt .....	87
Abbildung 5-2: Gegenüberstellung von Verlustzeit und Wartezeit .....	89
Abbildung 5-3: Gegenüberstellung von Wartezeit und Rückstaulänge – nicht gesättigt .....	91
Abbildung 5-4: Simulationsmodell Streckenzug .....	93
Abbildung 5-5: Gegenüberstellung von Wartezeit und Rückstaulänge – Beispiel.....	94
Abbildung 5-6: Gegenüberstellung von Wartezeit und Rückstaulänge – gesättigt.....	95
Abbildung 5-7: Gegenüberstellung von Wartezeit und Rückstaulänge – Detailansicht.....	96
Abbildung 5-8: Gegenüberstellung von Wartezeit und freizugebende Umläufe .....	97
Abbildung 5-9: Herleitung der erforderlichen Freigabezeit .....	98
Abbildung 5-10: Gegenüberstellung – Anzahl der Halte und Wartezeit/Rückstaulänge.....	100
Abbildung 5-11: Zusammenstellung mobil erfasster Parameter.....	102
Abbildung 5-12: Prinzipdarstellung der Bereiche und Zeitpunkte der Datenübertragung....	103
Abbildung 5-13: Kommunikations- und Prognosebereich zwischen kooperativen LSA .....	104
Abbildung 5-14: Gegenüberstellung – Verkehrsstärke und Ausstattungsrate .....	107
Abbildung 5-15: Einsatzbereiche der kooperativen LSA .....	108
Abbildung 6-1: Einsatzpräferenzen der Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung ...	113

### **Tabellenverzeichnis:**

Tabelle 2-1: Stationäre Erfassungseinrichtungen (FGSV-1991A).....	5
Tabelle 2-2: Modellbasierte Steuerungsverfahren (ALMASRI-2006 bzw.FRIEDRICH-1999) .....	22
Tabelle 2-3: Qualitätsstufenkonzept für Lichtsignalanlagen (HBS-2001) .....	26
Tabelle 2-4: Qualitätsstufenkonzept für das Straßennetz (BRILON & SCHNABEL-2003) .....	26
Tabelle 3-1: Kommunikationsverhalten – räumliche Abstände.....	43
Tabelle 3-2: Kommunikationsverhalten – zeitliche Dauer.....	44
Tabelle 4-1: Zusammenfassung der Simulationsparameter für die Verkehrsbeeinflussung .	58
Tabelle 4-2: Zusammenhänge der Kenngrößen und Einflussfaktoren .....	71
Tabelle 4-3: Ausstattungsraten bei Verkehrsbeeinflussung (einstreifiger Querschnitt) .....	73
Tabelle 4-4: Ausstattungsraten bei Verkehrsbeeinflussung (zweistreifiger Querschnitt).....	73
Tabelle 4-5: Reisegeschwindigkeit mit/ohne Verkehrsbeeinflussung.....	79
Tabelle 5-1: Parameter des Simulationsmodells der Signalgruppenezufahrt.....	88
Tabelle 5-2: Zusammenfassung – Lücken der Punktwolken der Wartezeiten.....	90
Tabelle 5-3: Zusammenfassung – Einfluss der Ausstattungsraten .....	107

## Anhangverzeichnis

Anhang A: Grundlagen der Lichtsignalsteuerung .....	A 1
Anhang B: Statistische Tests und Stichprobenumfang .....	A 2
Anhang C: Ortung und Kommunikation .....	A 3
Anhang D: Verkehrsbeeinflussung .....	A 4
Anhang E: Mobil erfasste Parameter .....	A 19
Anhang F: Kooperative Lichtsignalanlage .....	A 27

## Anhang A: Grundlagen der Lichtsignalsteuerung

### Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs an Lichtsignalanlagen

nach HBS-2001

QSV	Verbale Erläuterung
<b>Stufe A:</b>	Die Mehrzahl der Verkehrsteilnehmer kann ungehindert den Knotenpunkt passieren. Die Wartezeiten sind sehr kurz.
<b>Stufe B:</b>	Alle während der Sperrzeit ankommenden Verkehrsteilnehmer können in der nachfolgenden Freigabezeit weiterfahren oder -gehen. Die Wartezeiten sind kurz.
<b>Stufe C:</b>	Nahezu alle während der Sperrzeit ankommenden Verkehrsteilnehmer können in der nachfolgenden Freigabezeit weiterfahren oder -gehen. Die Wartezeiten sind spürbar. Beim Kraftfahrzeugverkehr tritt im Mittel nur geringer Stau am Ende der Freigabezeit auf.
<b>Stufe D:</b>	Im Kraftfahrzeugverkehr ist ständiger Rückstau vorhanden. Die Wartezeiten für alle Verkehrsteilnehmer sind beträchtlich. Der Verkehrszustand ist noch stabil.
<b>Stufe E:</b>	Die Verkehrsteilnehmer stehen in erheblicher Konkurrenz zueinander. Im Kraftfahrzeugverkehr stellt sich ein allmählich wachsender Stau ein. Die Wartezeiten sind sehr lang. Die Kapazität wird nicht erreicht.
<b>Stufe F:</b>	Die Nachfrage ist größer als die Kapazität. Die Fahrzeuge müssen bis zu ihrer Abfertigung mehrfach vorrücken. Der Stau wächst stetig an. Die Wartezeiten sind extrem lang. Die Anlage ist überlastet.

### Randbedingungen der Linienkoordinierung von Lichtsignalanlagen

nach HBS-2001

Knotenpunktabstand	≤ 750 m (max. 1.000m) günstig 500 m
Umlaufzeit	70 s bis 120 s
Progressionsgeschwindigkeit	0,85 $v_{zul}$ bis $v_{zul}$
Sättigungsgrad zu koordinierten Verkehrsströmen übrigen Verkehre	≤ 0,85 (0,90) ≤ 0,90 (0,95)
Vorlaufzeit	≥ 4 s
für Einbieger vom stromaufwärts liegenden Knotenpunkt und/oder für abgehängte Pulkfahrzeuge	bei starkem Einbiegeverkehr generell Band- breitenvergrößerung notwendig
bauliche Bedingungen	nach Möglichkeit je Richtung mehr als einen Fahrstreifen für den durchgehenden Verkehr Abbiegestreifen für Linksabbieger ruhenden Verkehr im Fahrbahnbereich weit- gehend einschränken

## Anhang B: Statistische Tests und Stichprobenumfang

### Formelgrundlage der Regressionsanalyse

#### Streuungs Momente:

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \quad S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 \quad S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - x_m) \cdot (y_i - y_m)$$

**Bestimmtheitsmaß:**  $B = r^2 = \frac{S_{xy}^2}{S_{xx} \cdot S_{yy}}$       **t-Test:**  $t_{ber.} = |r| \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$        $t_{prüf.} = t_{n-2, 1-\frac{\alpha}{2}}$

**Lineare Regression:**  $y = a + b \cdot x$        $b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$        $a = y_m - b \cdot x_m$

**Exponentielle Regression:**  $y = a \cdot e^{bx}$  logarithmieren zu  $\ln y = \ln a + bx \cdot \ln e = \ln a + bx$   
→ mit  $y_D = \ln y$  und  $a_D = \ln a$  resultiert  $y_D = a_D + b \cdot x$

**Potenzielle Regression:**  $y = a \cdot x^b$  logarithmieren zu  $\ln y = \ln a + b \cdot \ln x$   
→ mit  $\hat{y} = \ln y$ ,  $x_D = \ln x$  und  $\hat{a} = \ln a$  resultiert  $y_D = a_D + b \cdot x_D$

#### Bestimmung des Stichprobenumfangs

Die Anzahl der Simulationsläufe hängt von der geforderten Genauigkeit mit gegebener statistischer Sicherheit und von Mittelwert und Streuung der betrachteten Kenngrößen ab.

**Standardabweichung:**  $S_{xx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n-1}$

- $S_{xx}$  Standardabweichung
- $x_i$  betrachtete Variable (Rückstaulänge, Wartezeit, etc.)
- $x_m$  Mittelwert aus den Simulationsläufen
- $n$  Anzahl der Simulationsläufe (zunächst 5 bis 10)

Beim Konfidenzniveau  $\alpha = 0,95$  ist mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % die statistische Aussage richtig. Das Konfidenzintervall  $C$  gibt den Wertebereich an, in dem der Mittelwert der Grundgesamtheit mit der Wahrscheinlichkeit des Konfidenzintervalls liegt.

**Vorläufige Anzahl der Simulationsläufe:**  $n_{vorläufig} \geq \frac{t(\alpha, n-1)^2 \cdot S_{xx}}{C^2}$

Iterative Wiederholung solange bis Anzahl der Simulationsläufe  $n$  größer oder gleich der aus der Student-Verteilung ermittelten vorläufigen Anzahl an Simulationsläufen  $n_{vorläufig}$  ist.

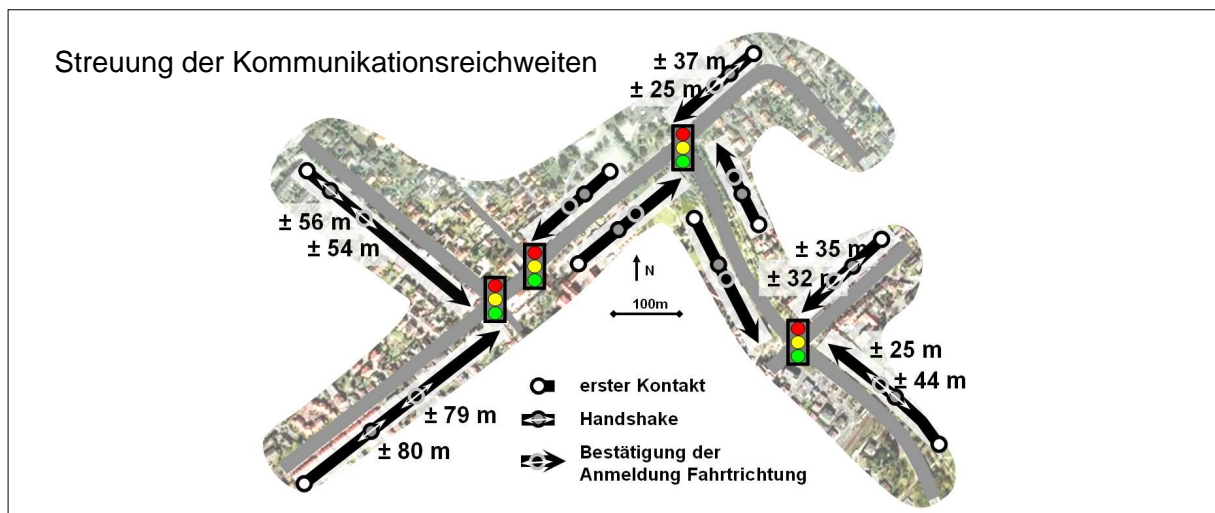
Bedingung:  $n \geq n_{vorläufig}$

## Anhang C: Ortung und Kommunikation

## Nachweis des absoluten GPS-Fehlers

$\varepsilon_y$		$\Delta \varepsilon_y$	
Art des Fehlers	Absolute Fehler	Art des Fehlers	Abweichung des absoluten Fehlers
Art der Regression	exponentiell $y = 1 - e^{-a \cdot x}$	Art der Regression	weibull $y = 1 - e^{-(x/a)^b}$
n	3741	n	3728
$x_m$ [m]	9,39	$x_m$ [m]	0,5458
$S_{xx}$ [m <sup>2</sup> ]	311,69	$S_{xx}$ [m <sup>2</sup> ]	8,0080
$S_x^2$ [m <sup>2</sup> ]	0,083	$S_x^2$ [m <sup>2</sup> ]	2,1E-3
$S_x$ [m]	9,13	$S_x$ [m]	1,4655
$V_x$	0,973	$V_x$	2,695
$k = 1/V_x^2$	1,0569	a	0,0002
$k_{\text{rund}}$	1,0000	b	0,4372
$a = k_{\text{rund}}/x_m$	106,552		

## Darstellung der Kommunikationsreichweiten



## Darstellung der Kommunikationsreichweiten – räumliche Abstände

LSA	Zufahrt	Handshake		Bestätigung der Anmeldung	
		Mittelwert	Streuung	Mittelwert	Streuung
6/7	3	105 m	57 m	97 m	40 m
8	2	60 m	42 m	46 m	32 m
8	3	101 m	49 m	80 m	50 m
10	1	182 m	50 m	158 m	51 m

## Darstellung der Kommunikationsreichweiten – zeitliche Dauer

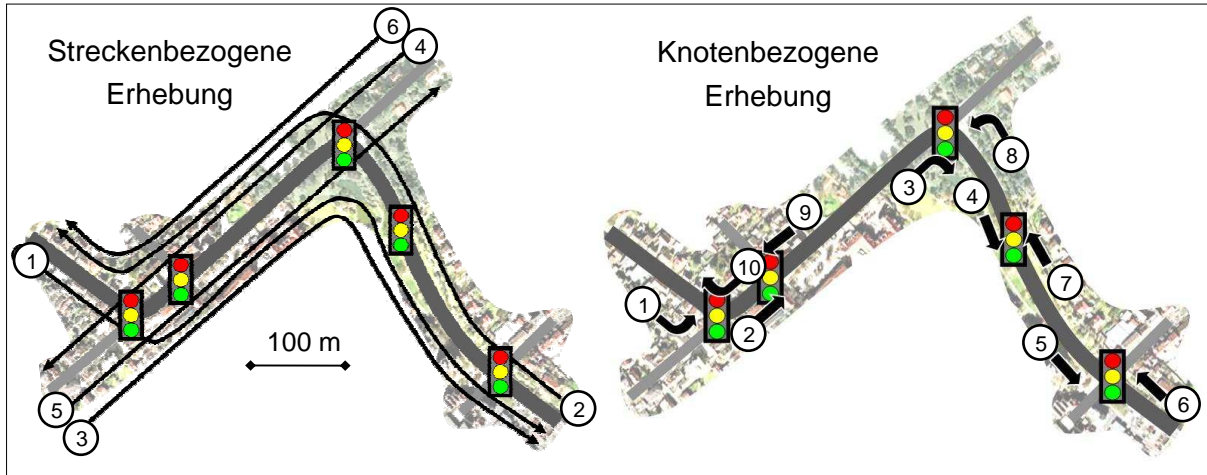
LSA	Zufahrt	Zeit zwischen ersten Kontakt und Handshake		Zeit zwischen Handshake und Bestätigung der Anmeldung	
		Mittelwert	Streuung	Mittelwert	Streuung
6/7	3	4,8 s	2,6 s	2,7 s	1,3 s
8	2	4,7 s	1,9 s	3,3 s	1,6 s
8	3	5,5 s	2,0 s	3,9 s	1,3 s
10	1	2,8 s	1,5 s	2,7 s	1,6 s



## Anhang D: Verkehrsbeeinflussung

### Lagepläne der Untersuchungsstrecken

#### Lageplan der Untersuchungsstrecke 1: einstreifige Verkehrsführung



Anzahl der signalisierten Knotenpunkte: 5

Abstände der signalisierten Knotenpunkte: 80 m – 270 m – 130 m – 210 m

Umlaufzeit: 90 s

Anzahl der Fahrstreifen: 1 durchgehender Fahrstreifen je Richtung

Streckenbezogene Belastungen über alle Simulationsläufe:

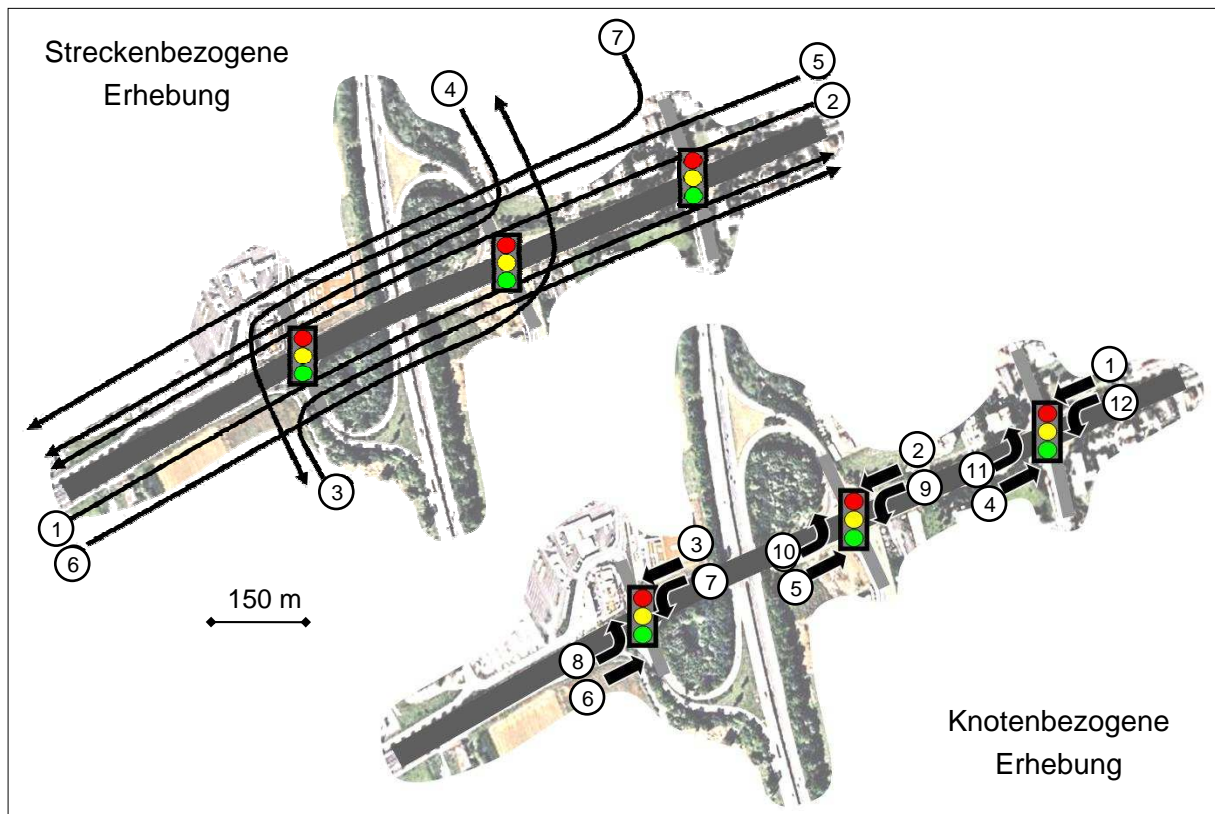
Strecke	1	2	3	4	5	6	Summe
Belastung [Fz]	28.573	30.718	14.545	11.031	2.256	7.687	94.810

Funktionaler Zusammenhang zwischen der Ausstattungsrate und den verkehrlichen

Wirksamkeit:

Kenngröße	Zufahrt/Strecke	Formaler Zusammenhang	Bestimmtheitsmaß B	Typ
Anzahl der Halte	Zufahrt 6	$n_{HALTE} = 188,47 \cdot e^{(-0,0351 \cdot \lambda)}$	0,9993	exponentiell
	Zufahrt 5	$n_{HALTE} = 133,06 \cdot e^{(-0,0230 \cdot \lambda)}$	0,9920	
	Zufahrt 1	$n_{HALTE} = 92,166 \cdot e^{(-0,0322 \cdot \lambda)}$	0,9737	
Rückstaulänge	Zufahrt 6	$x_{STAU} = -0,5497 \cdot \lambda + 72,793$	0,9924	linear
	Zufahrt 5	$x_{STAU} = -0,4427 \cdot \lambda + 60,151$	0,9526	
	Zufahrt 1	$x_{STAU} = -0,3875 \cdot \lambda + 49,923$	0,9542	
Wartezeit	Strecke 4	$t_{WARTE} = -0,0004 \cdot \lambda^2 - 0,3415 \cdot \lambda + 61,205$	0,9974	potenziell (quadratisch)
	Strecke 1	$t_{WARTE} = 0,0017 \cdot \lambda^2 - 0,3971 \cdot \lambda + 24,519$	0,9979	
	Strecke 2	$t_{WARTE} = 0,0018 \cdot \lambda^2 - 0,3939 \cdot \lambda + 22,339$	0,9987	

## Lageplan der Untersuchungsstrecke 2: zweistreifige Verkehrsführung



Anzahl der signalisierten Knotenpunkte: 3

Abstände der signalisierten Knotenpunkte: 295 m – 270 m

Umlaufzeit: 70 s

Anzahl der Fahrstreifen: 2 durchgehende Fahrstreifen je Richtung

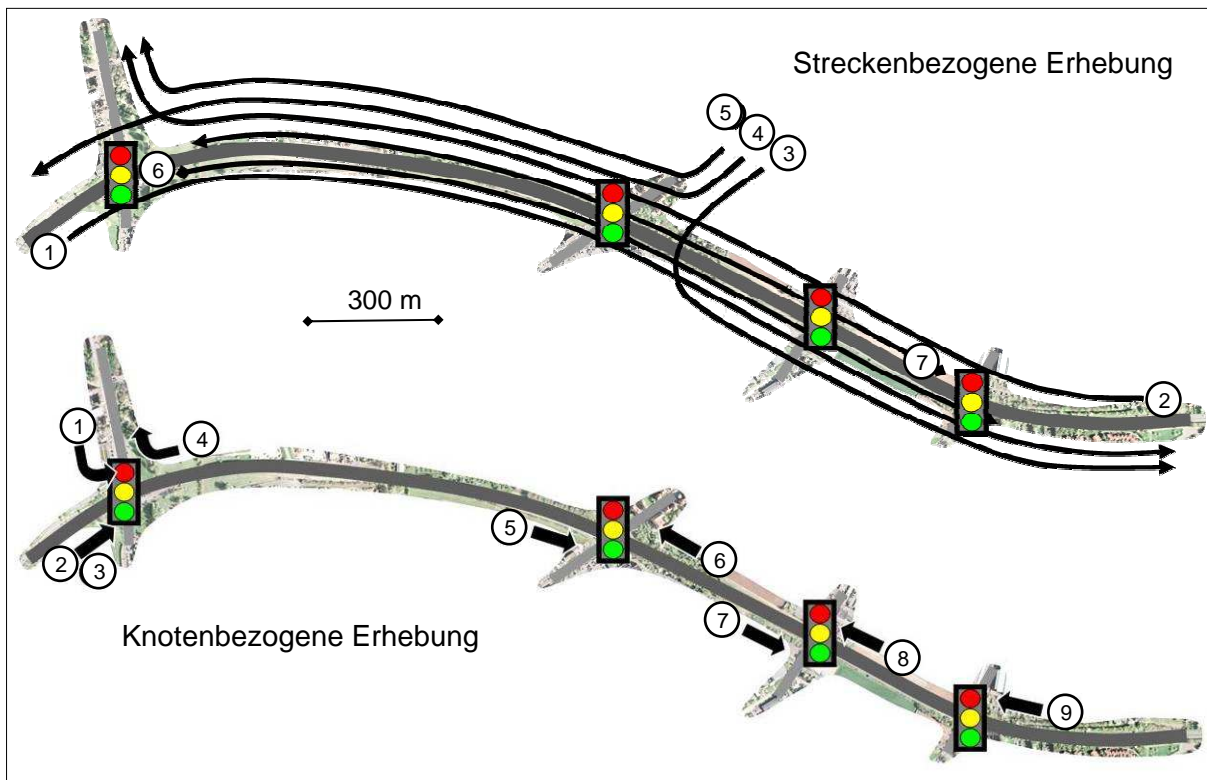
Streckenbezogene Belastungen über alle Simulationsläufe:

Strecke	1	2	3	4	5	6	7	Summe
Belastung [Fz]	69.591	41.948	17.465	8.964	6.885	15.668	16.528	177.049

Funktionaler Zusammenhang zwischen der Ausstattungsrate und den verkehrlichen Wirksamkeit:

Kenngroße	Zufahrt/Strecke	Formaler Zusammenhang	Bestimmtheitsmaß B	Typ
Anzahl der Halte	Zufahrt 1	$n_{HALTE} = 0,0124 \cdot \lambda^2 - 3,896 \cdot \lambda + 313,46$	0,9993	potenziell (quadratisch)
	Zufahrt 12	$n_{HALTE} = 0,0144 \cdot \lambda^2 - 4,0546 \cdot \lambda + 310,25$	0,9995	
	Zufahrt 6	$n_{HALTE} = 0,0214 \cdot \lambda^2 - 4,5723 \cdot \lambda + 244,61$	0,9999	
Rückstaulänge	Zufahrt 1	$x_{STAU} = -0,1931 \cdot \lambda + 45,577$	0,9755	linear
	Zufahrt 12	$x_{STAU} = -0,1921 \cdot \lambda + 45,748$	0,9572	
	Zufahrt 6	$x_{STAU} = -0,3750 \cdot \lambda + 47,248$	0,9867	
Wartezeit	Strecke 7	$t_{WARTE} = -0,2342 \cdot \lambda + 34,758$	0,9883	linear
	Strecke 6	$t_{WARTE} = -0,0970 \cdot \lambda + 14,924$	0,9881	
	Strecke 1	$t_{WARTE} = -0,1104 \cdot \lambda + 13,056$	0,9987	

### Lageplan der Untersuchungsstrecke 3: zweistreifige Verkehrsführung



Anzahl der signalisierten Knotenpunkte: 4

Abstände der signalisierten Knotenpunkte: 1.240 m – 555 m – 435 m

Umlaufzeit: 100 s

Anzahl der Fahrstreifen: 2 durchgehende Fahrstreifen je Richtung

Streckenbezogene Belastungen über alle Simulationsläufe:

Strecke	1	2	3	4	5	6	7	Summe
Belastung [Fz]	41.630	37.124	49.961	9.149	1.345	11.930	145.796	296.935

Funktionaler Zusammenhang zwischen der Ausstattungsrate und den verkehrlichen

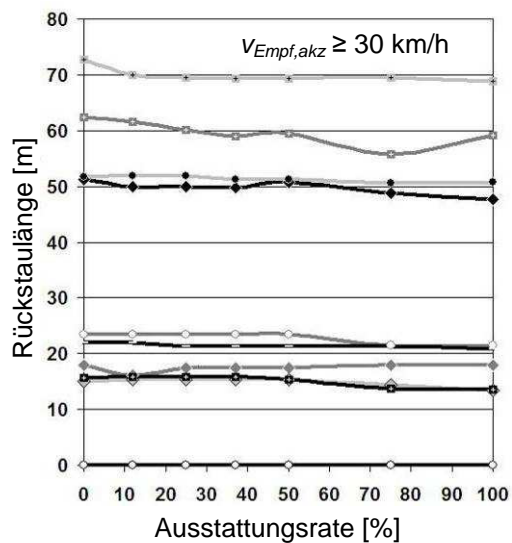
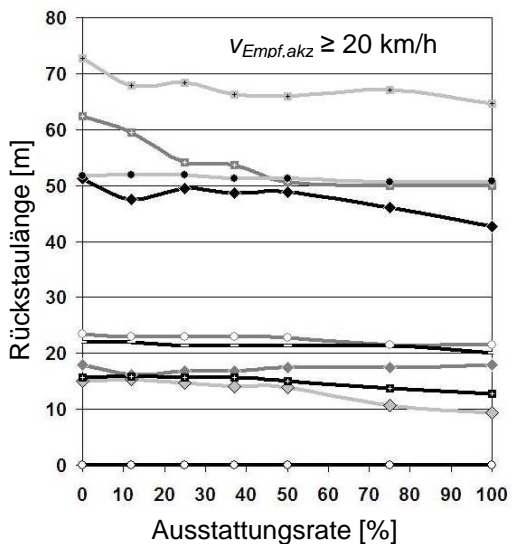
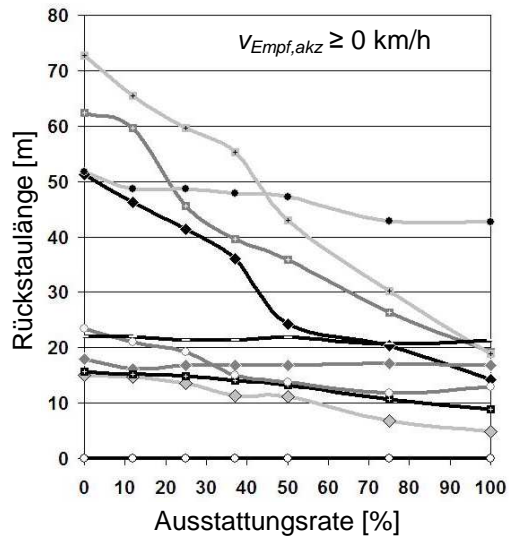
Wirksamkeit:

Kenngroße	Zufahrt/Strecke	Formaler Zusammenhang	Bestimmtheitsmaß B	Typ
Anzahl der Halte	Zufahrt 5	$n_{HALTE} = 0,0119 \cdot \lambda^2 - 3,6772 \cdot \lambda + 247,51$	0,9992	potenziell (quadratisch)
	Zufahrt 6	$n_{HALTE} = 0,0139 \cdot \lambda^2 - 3,4832 \cdot \lambda + 206,73$	0,9968	
	Zufahrt 7	$n_{HALTE} = -0,0008 \cdot \lambda^2 - 0,3595 \cdot \lambda + 42,974$	0,9737	
Rückstaulänge	Zufahrt 5	$x_{STAU} = -0,5228 \cdot \lambda + 60,600$	0,9603	linear
	Zufahrt 6	$x_{STAU} = -0,4345 \cdot \lambda + 47,987$	0,9724	
	Zufahrt 7	$x_{STAU} = -0,1944 \cdot \lambda + 23,174$	0,9154	
Wartezeit	Strecke 1	$t_{WARTE} = -0,5651 \cdot \lambda + 51,433$	0,9517	linear
	Strecke 2	$t_{WARTE} = -0,2403 \cdot \lambda + 22,599$	0,9811	
	Strecke 6	$t_{WARTE} = -0,1802 \cdot \lambda + 18,270$	0,9976	

## Auswertung der Simulationsstrecke 1: einstreifige Verkehrsführung

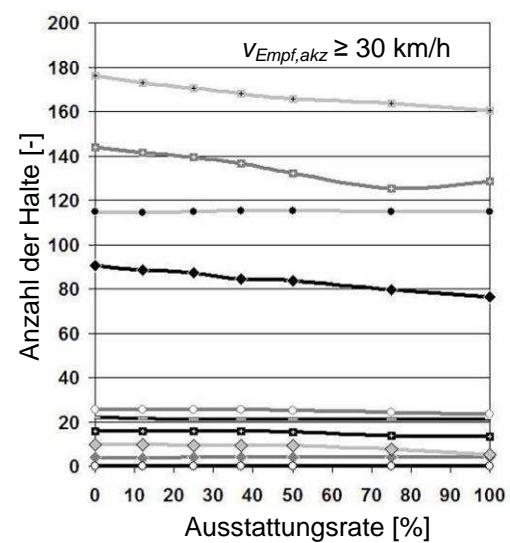
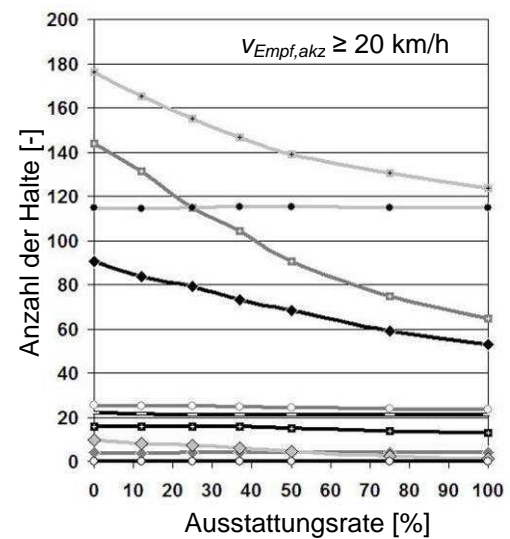
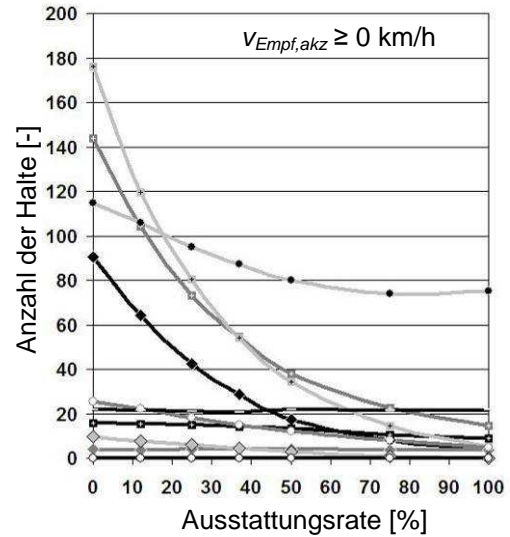
Gegenüberstellung von Rückstaulänge

zur Ausstattungsrate in der Zufahrt:



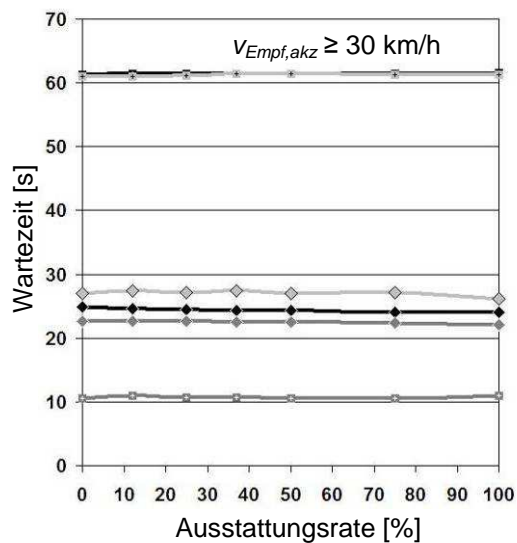
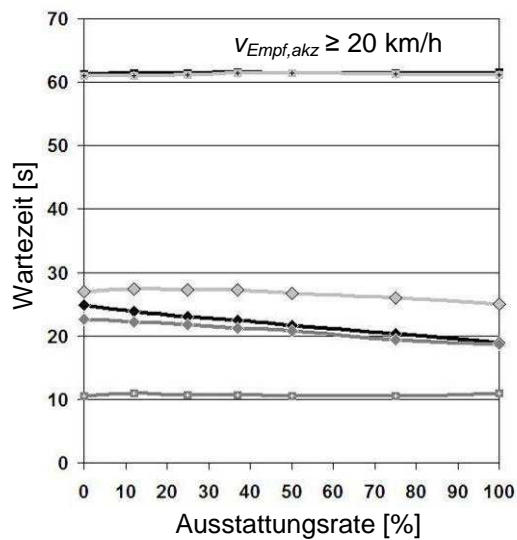
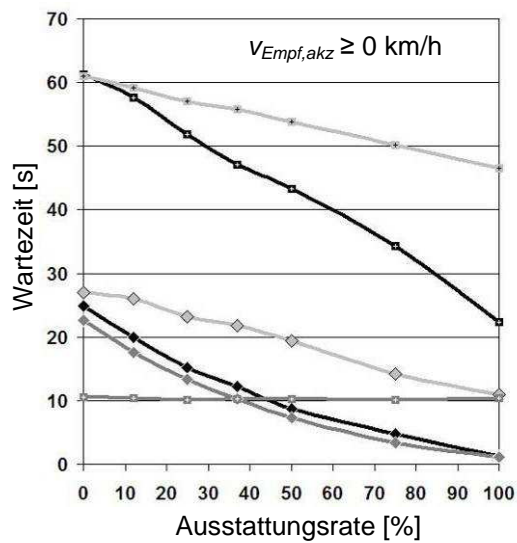
Gegenüberstellung von Anzahl der Halte

zur Ausstattungsrate in der Zufahrt

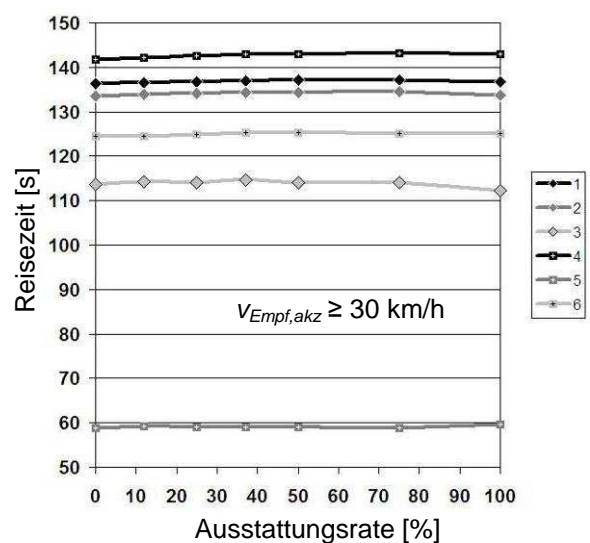
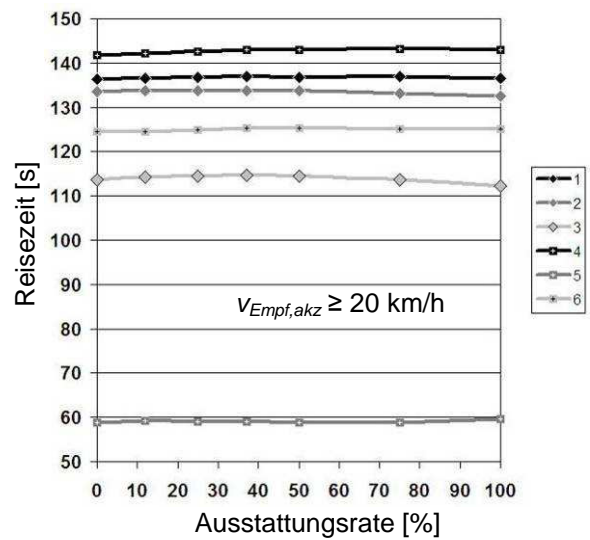
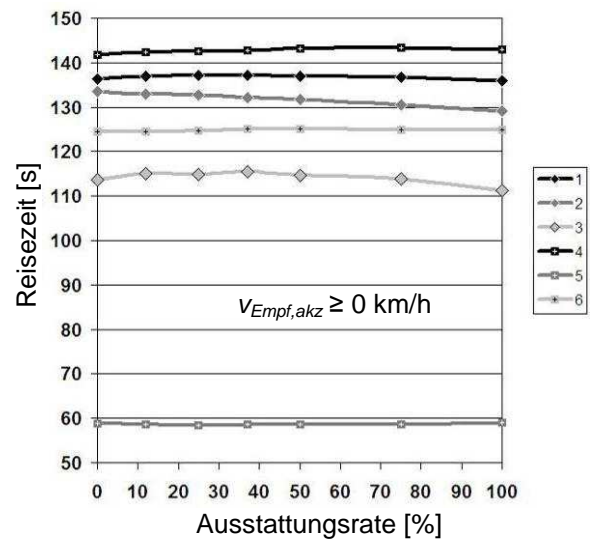




Gegenüberstellung von Wartezeit  
zur Ausstattungsrate auf der Strecke:



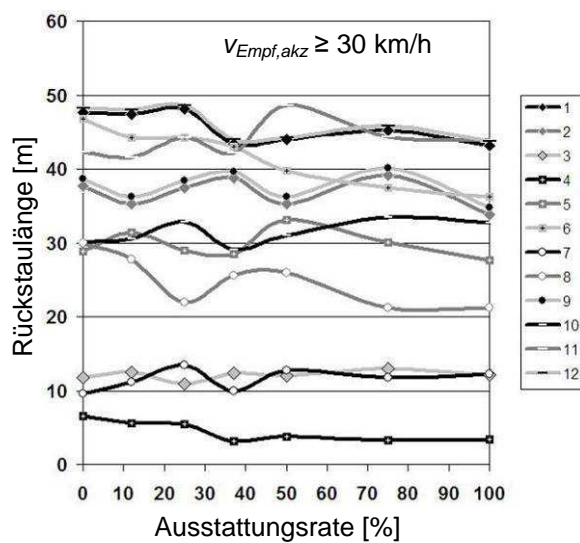
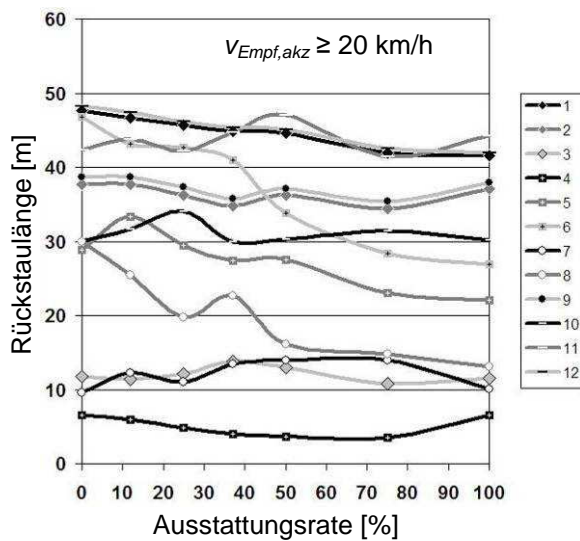
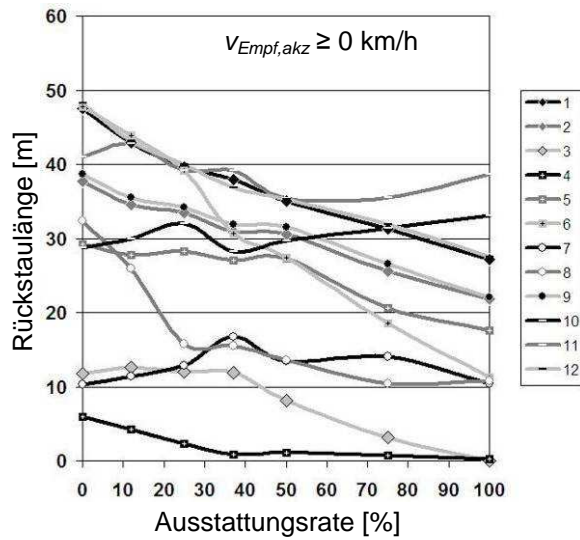
Gegenüberstellung von Reisezeit  
zur Ausstattungsrate auf der Strecke



## Auswertung der Simulationsstrecke 2: zweistreifige Verkehrsführung

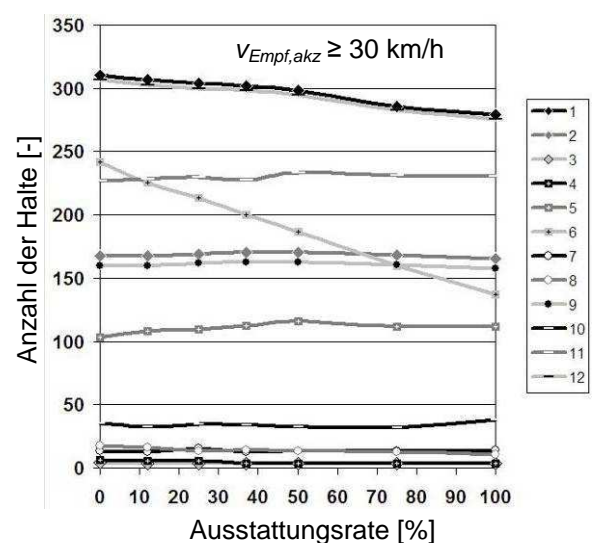
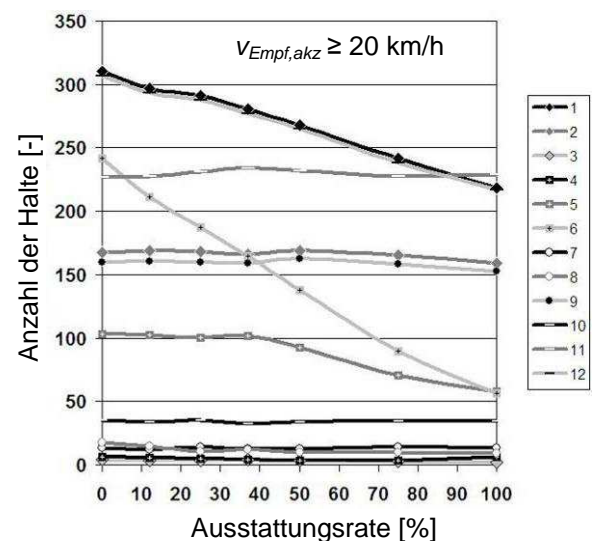
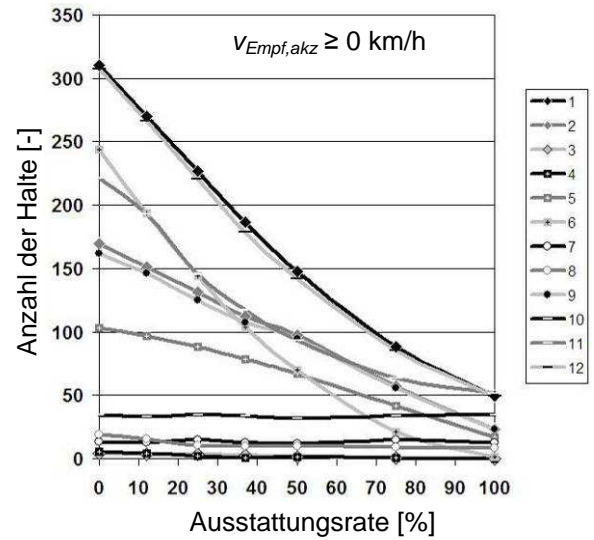
Gegenüberstellung von Rückstaulänge

zur Ausstattungsrate in der Zufahrt:

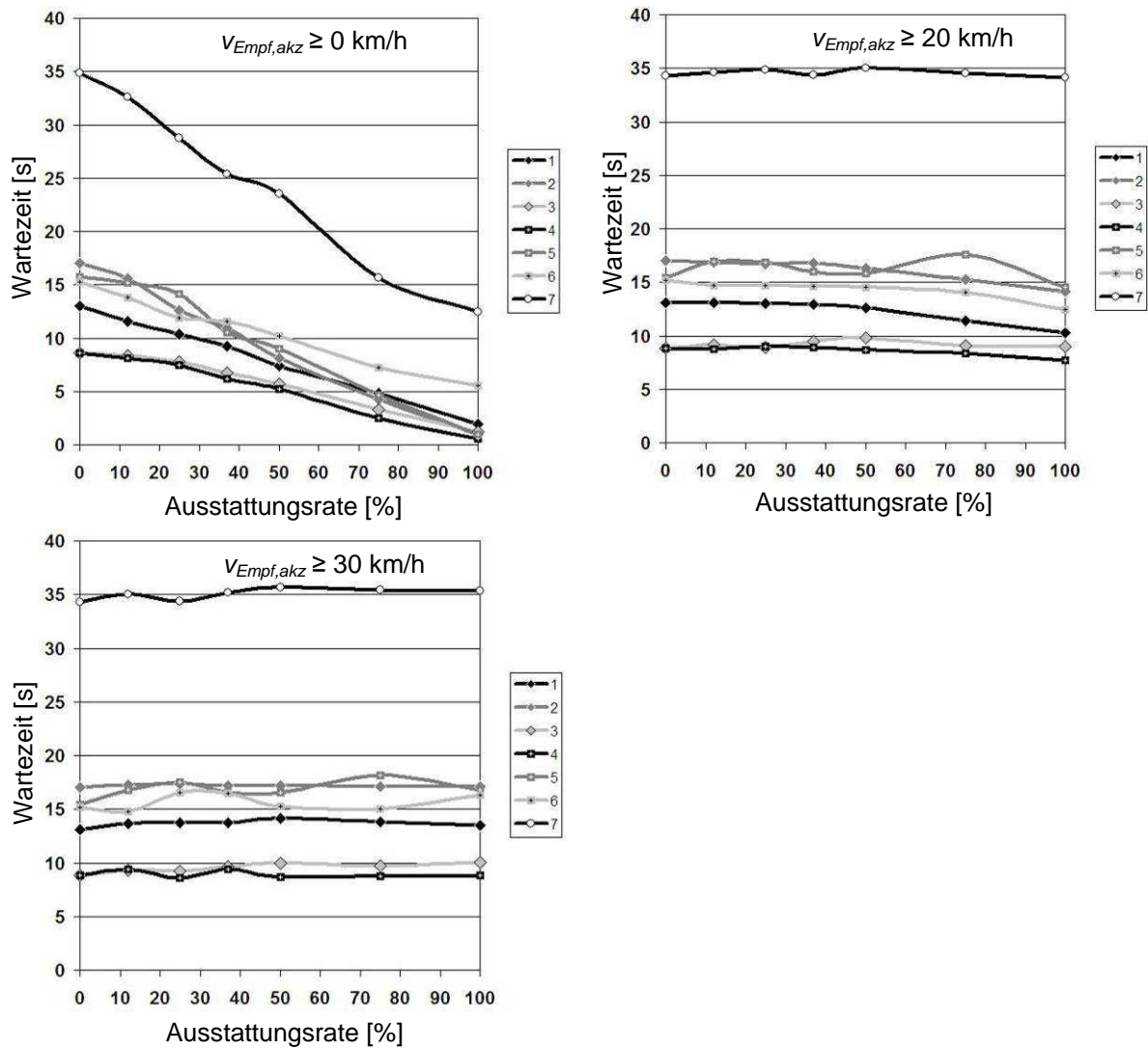


Gegenüberstellung von Anzahl der Halte

zur Ausstattungsrate in der Zufahrt



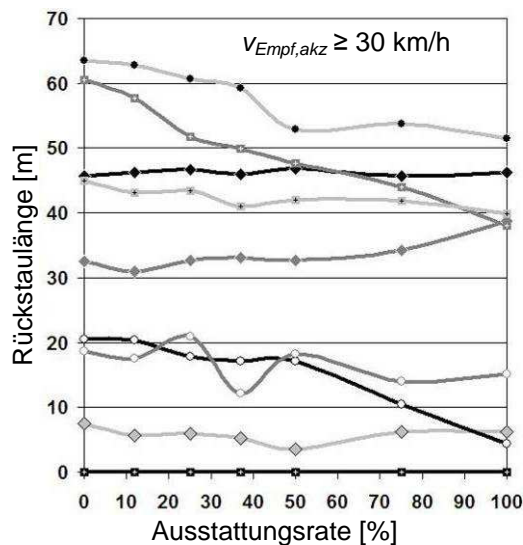
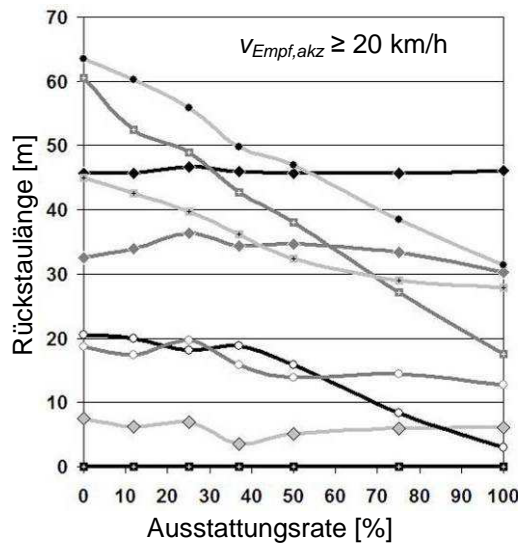
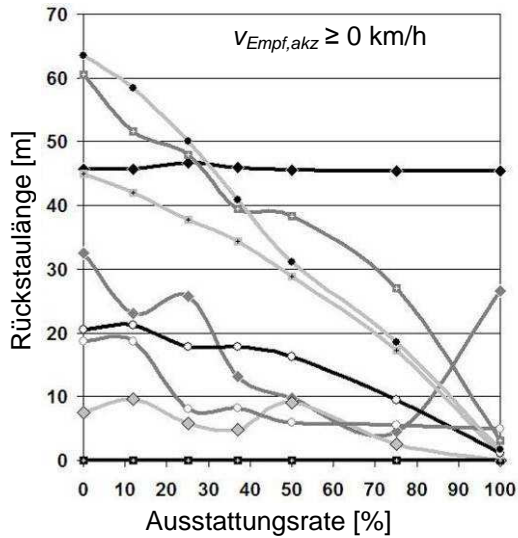
Gegenüberstellung von Wartezeit zur Ausstattungsrate auf der Strecke



### Auswertung der Simulationsstrecke 3: zweistreifige Verkehrsführung

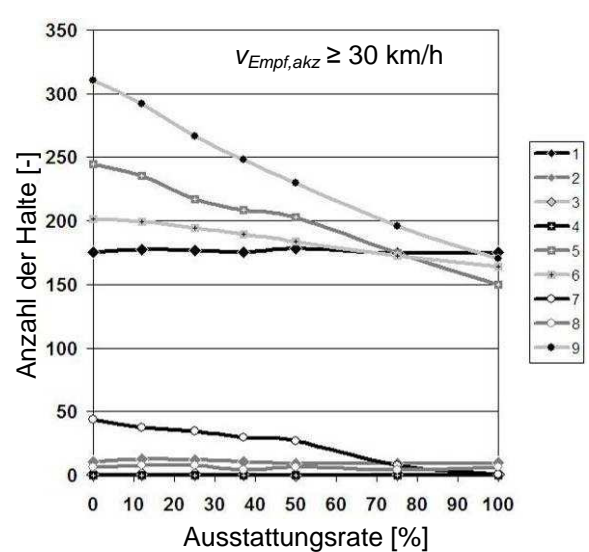
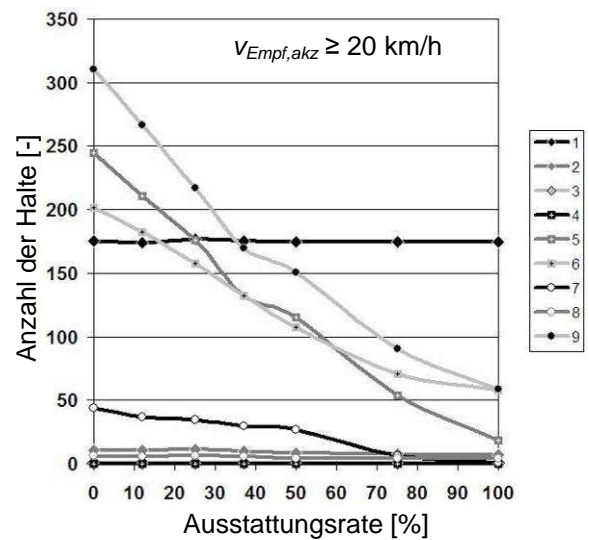
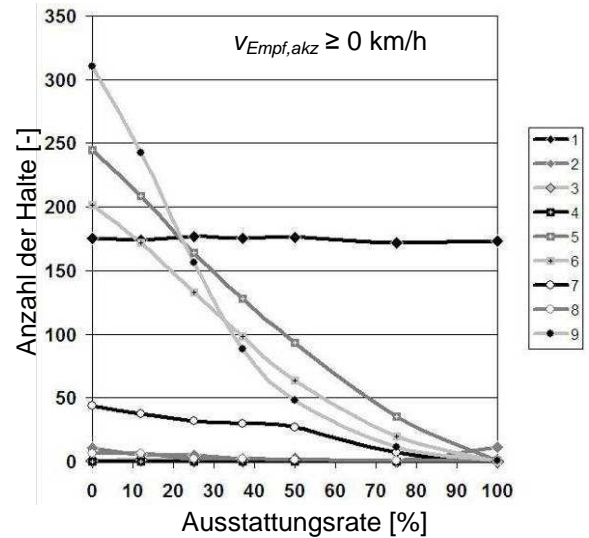
Gegenüberstellung von Rückstaulänge

zur Ausstattungsrate in der Zufahrt:



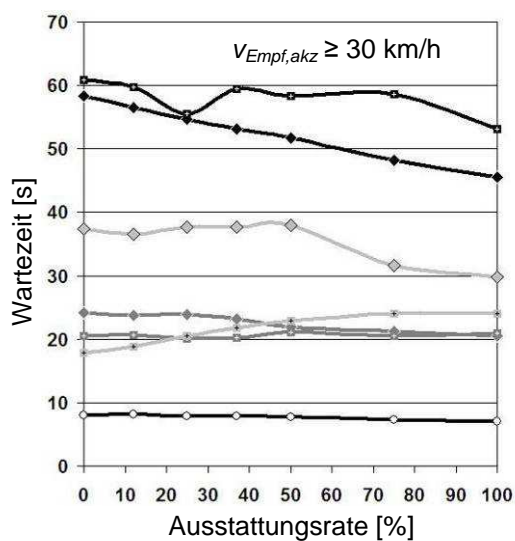
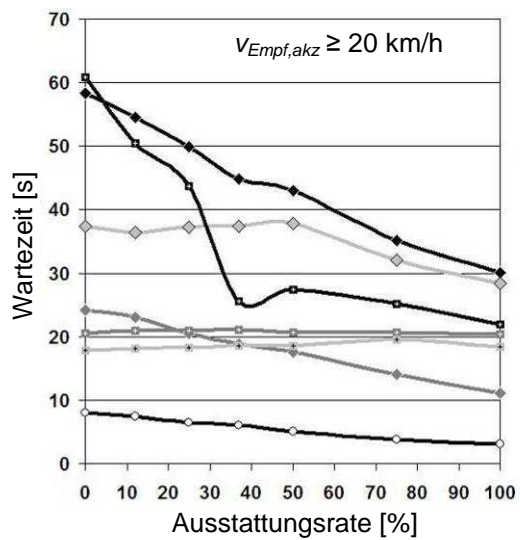
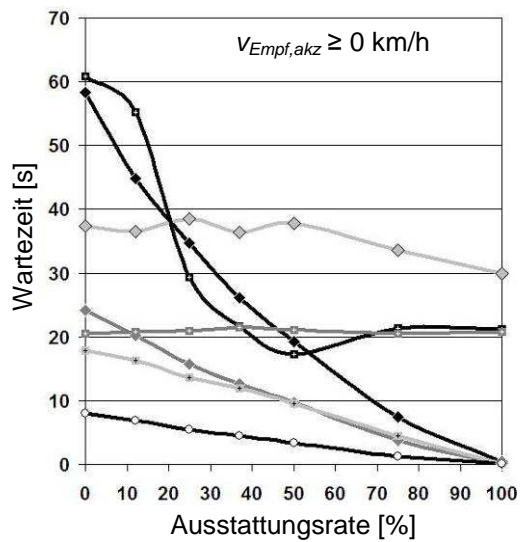
Gegenüberstellung von Anzahl der Halte

zur Ausstattungsrate in der Zufahrt:

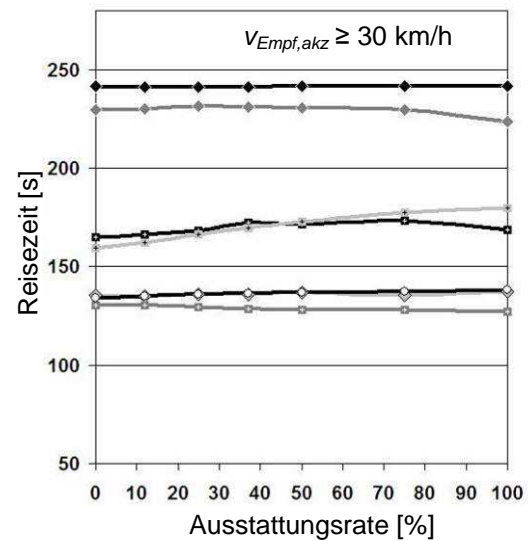
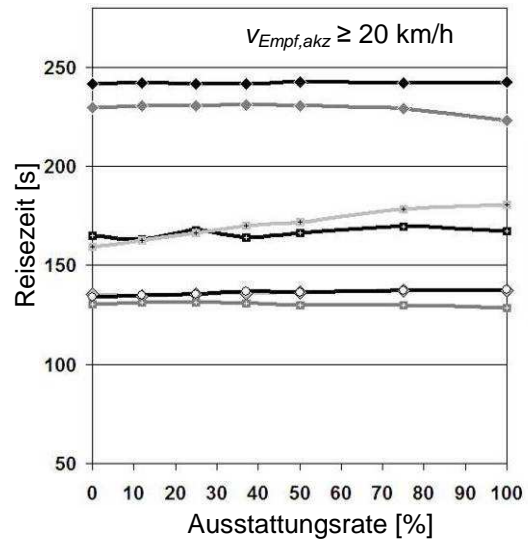
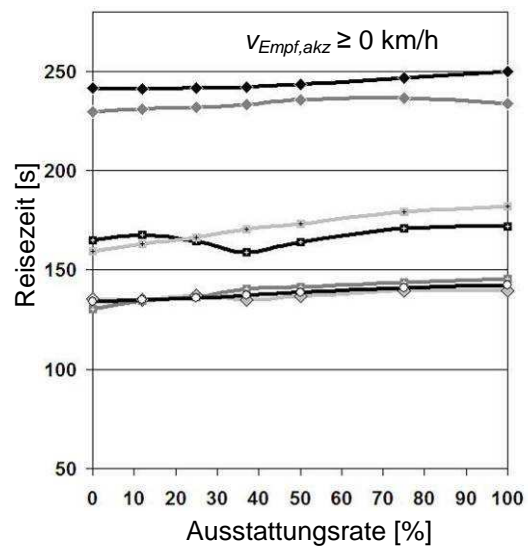




Gegenüberstellung von Wartezeit  
zur Ausstattungsrate auf der Strecke:

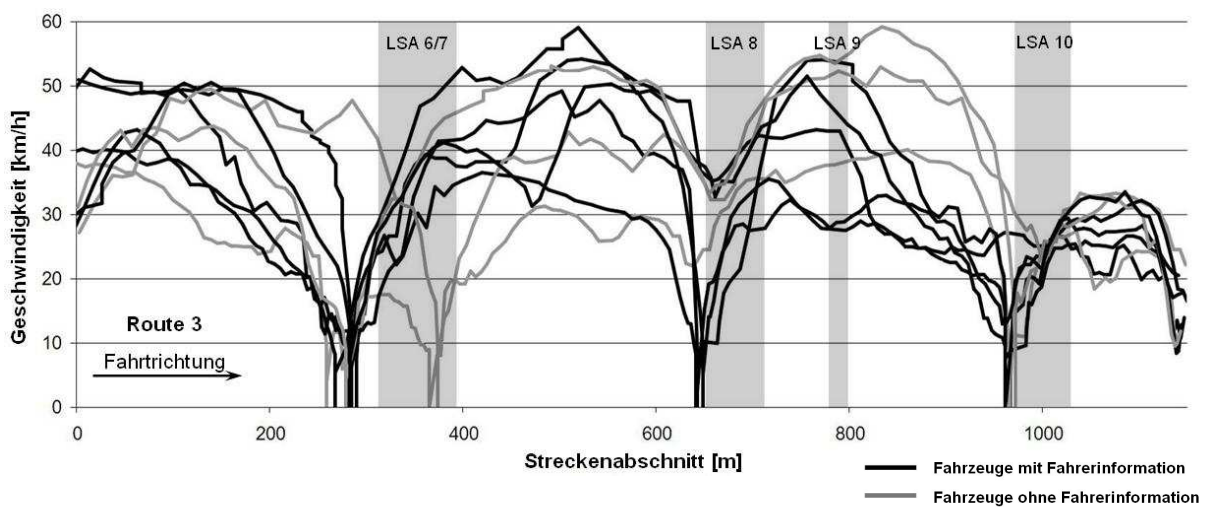
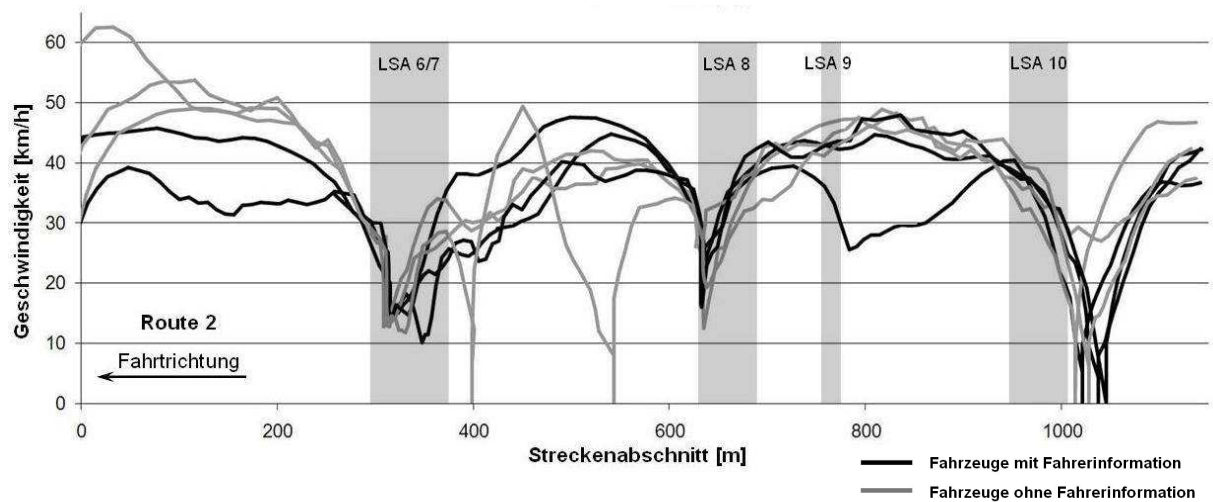
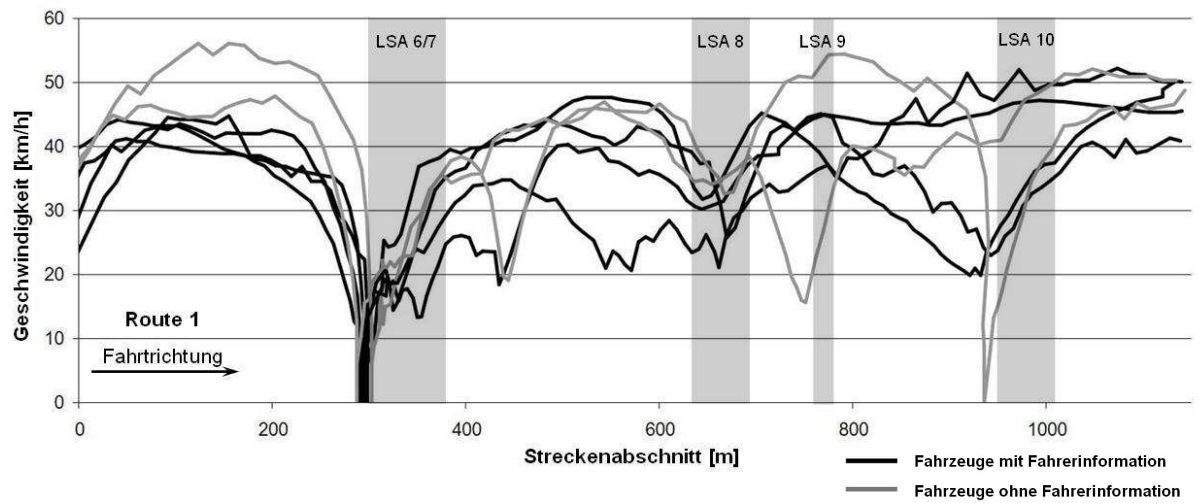


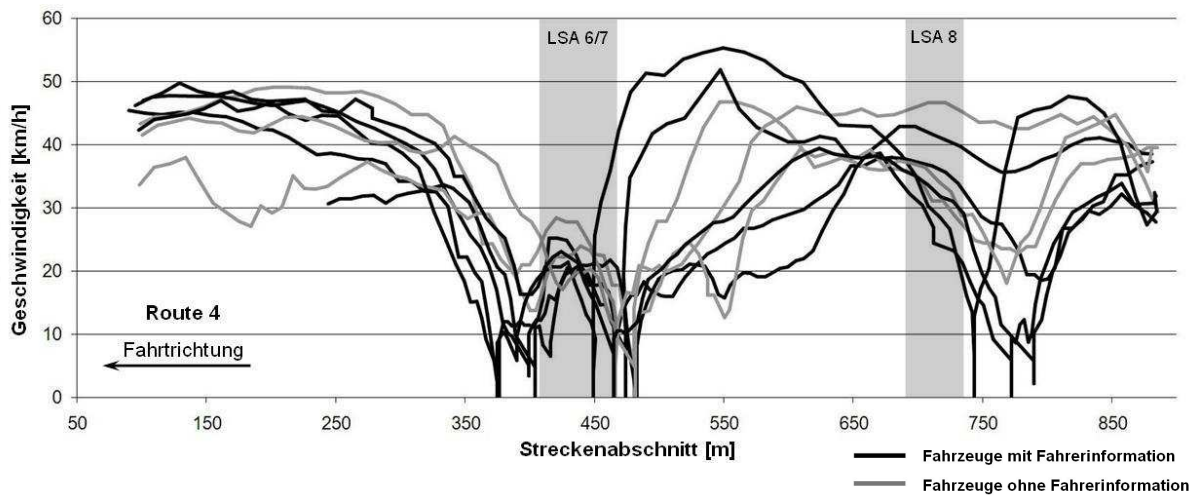
Gegenüberstellung von Reisezeit  
zur Ausstattungsrate auf der Strecke:



## Geschwindigkeitsprofile der Testfahrten

### Teststrecke 1: einstreifige Verkehrsführung

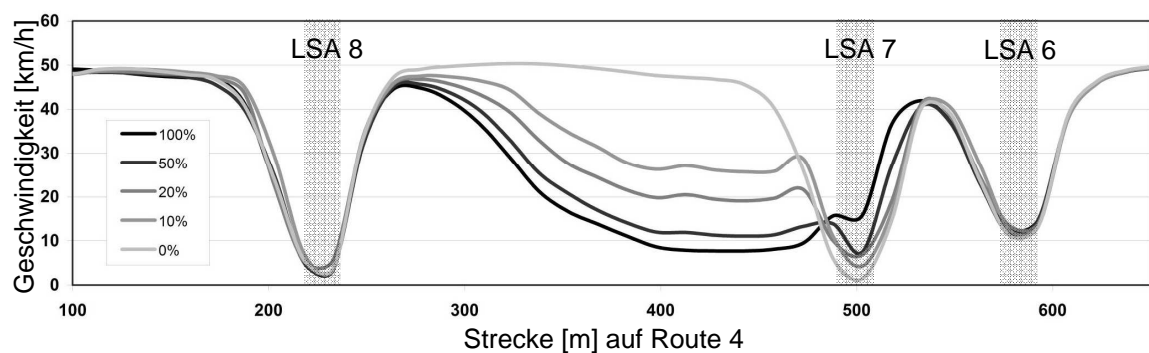
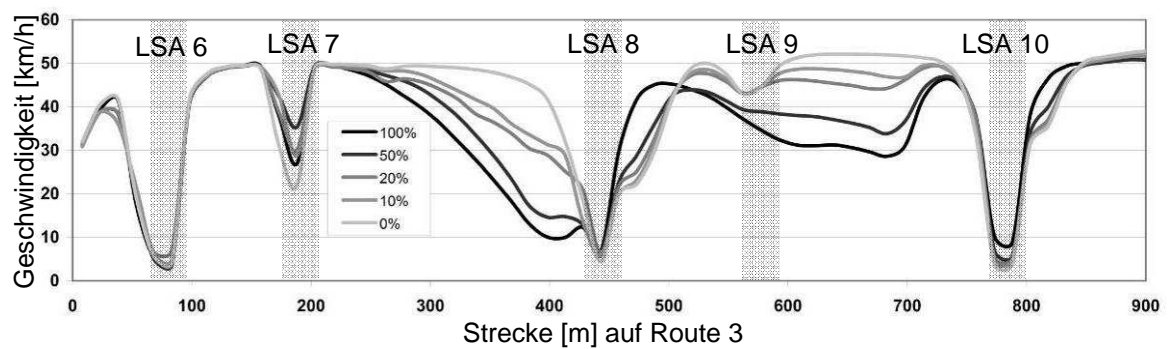
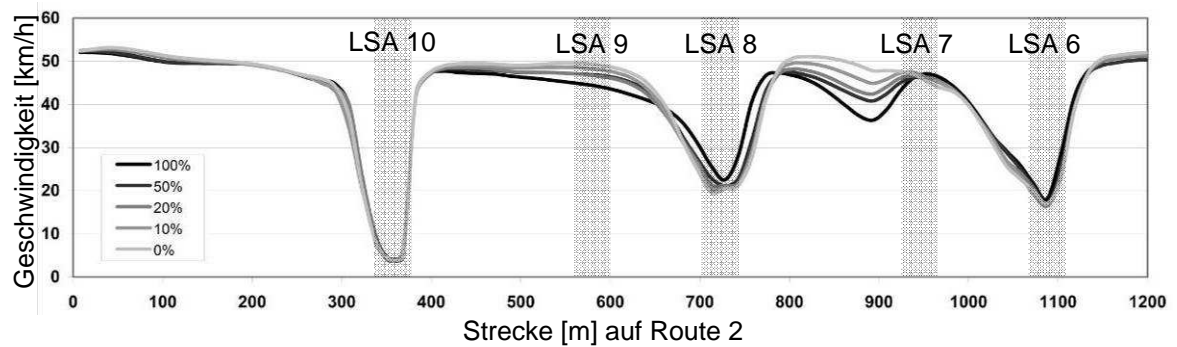
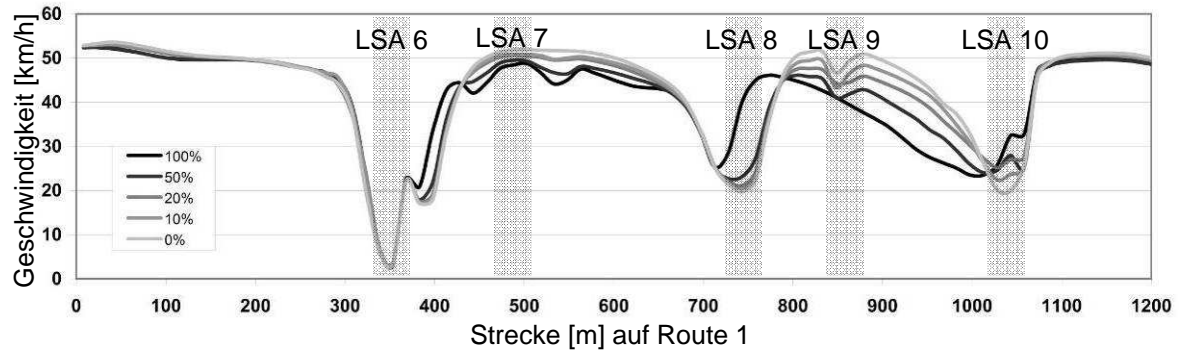




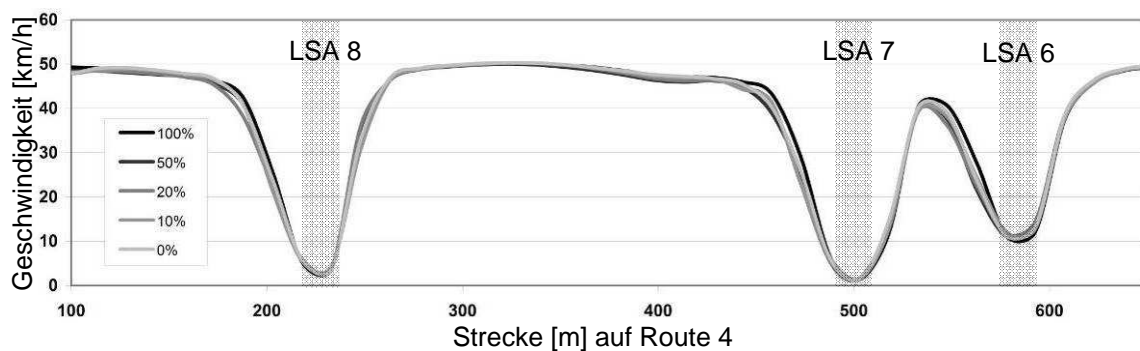
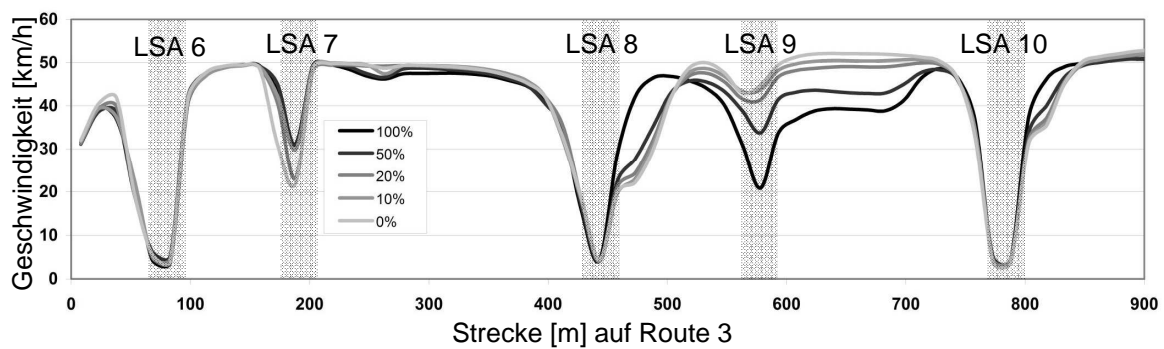
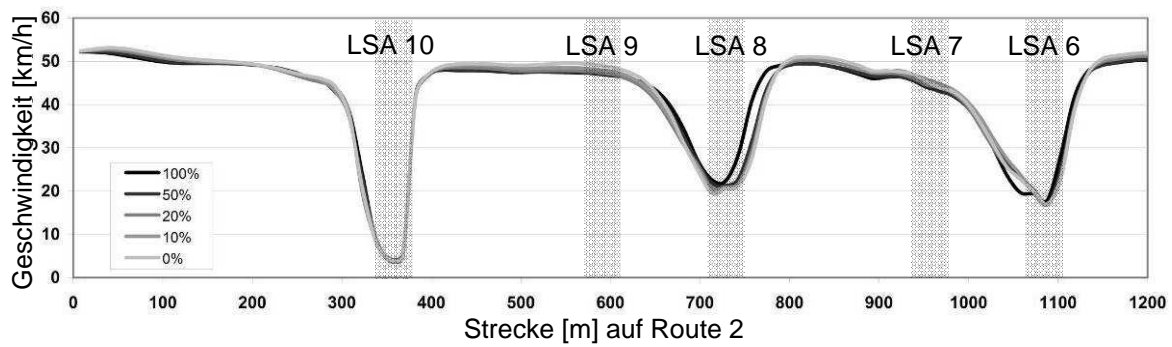
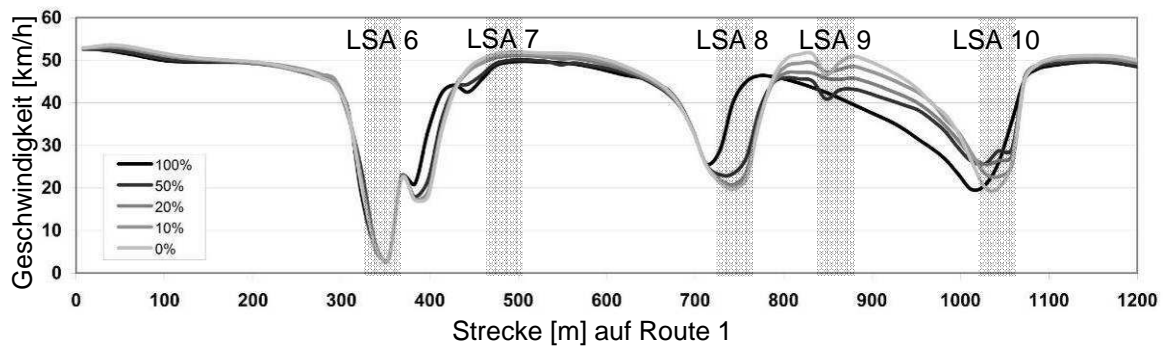
## Geschwindigkeitsprofile der Simulationsuntersuchung

### Teststrecke 1: einstreifige Verkehrsführung

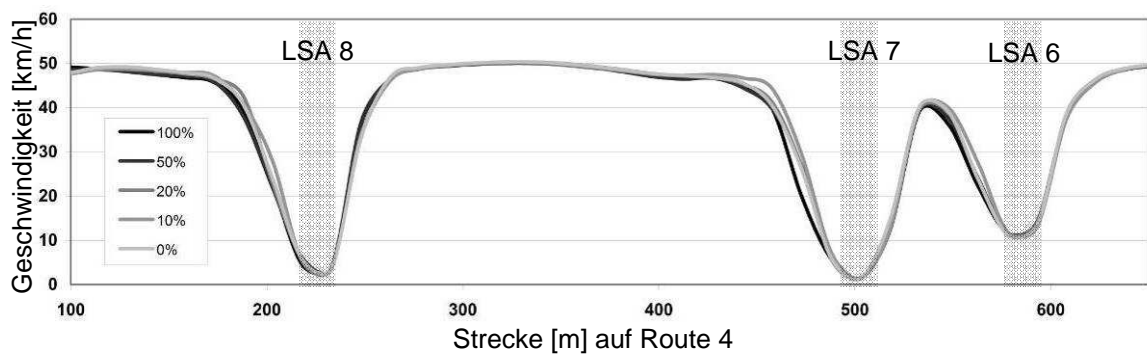
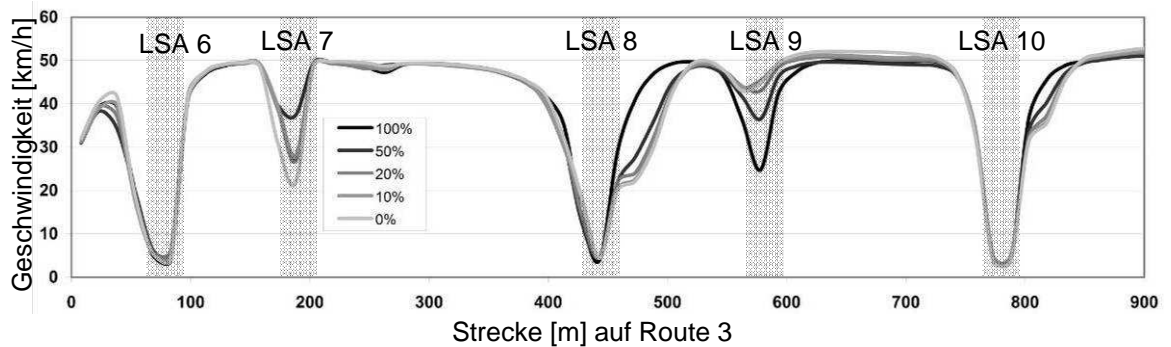
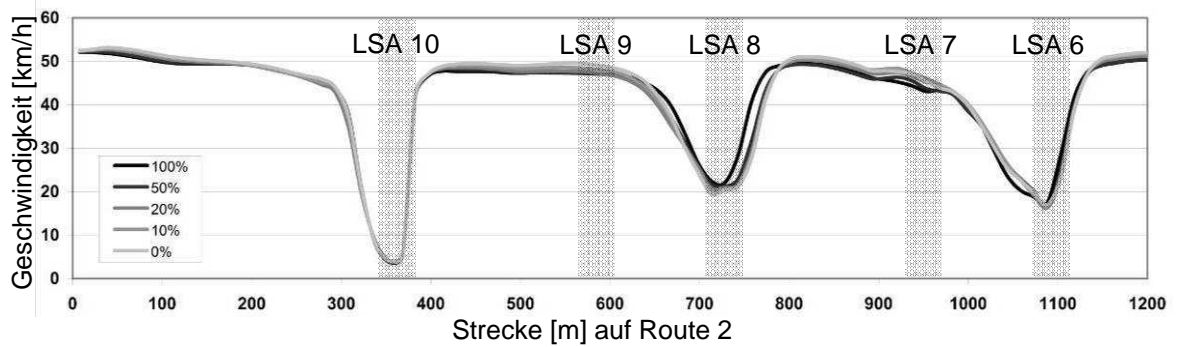
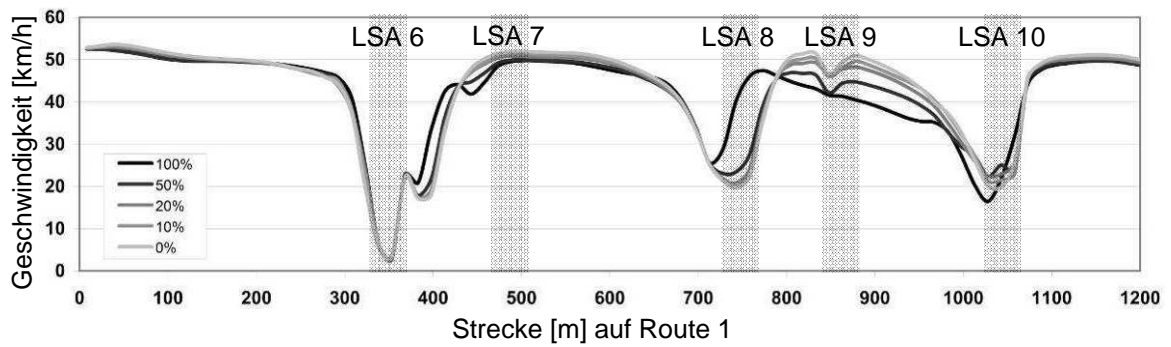
Alle Geschwindigkeitsempfehlungen werden akzeptiert:



Geschwindigkeiten  $\geq 20$  km/h werden akzeptiert:



Geschwindigkeiten  $\geq 30$  km/h werden akzeptiert:



## Wirkungsgrad der kooperativen Verkehrsbeeinflussung

### Beispielrechnung:

Dieser Abschnitt zeigt eine Beispielrechnung zur Bestimmung des Wirkungsgrades der kooperativen Verkehrsbeeinflussung für den Parameter Anzahl der Halte. Grundlage der Rechnung sind die ermittelten Werte der Simulationstrecke 1 für den Stauzähler 1. Diese sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

$v_{Empf,akz}$	mittlere Anzahl der Halte in der Zufahrt		
	Szenario 1 max.	Szenario 2 $\geq 20$ km/h	Szenario 3 $\geq 30$ km/h
$\lambda = 0,00$	90,5 <sub>(1), (3)</sub>	90,6	90,6
$\lambda = 0,25$	42,4 <sub>(4)</sub>	79,1 <sub>(2)</sub>	87,2
$\lambda = 1,00$	3,8	53,1	76,3

Im Beispiel soll der Wirkungsgrad bei einer Ausstattungsrate von 25 % ( $\lambda = 0,25$ ) und einer akzeptierten minimalen Geschwindigkeitsempfehlung von größer oder gleich 20 km/h ( $v_{Empf,akz} \geq 20$  km/h) berechnet werden. Hierfür dient Fromel (4-11):

$$\eta(n_{HALTE}) = \frac{n_{HALTE}(\lambda = 0, v_{Empf,akz} = \max) - n_{HALTE}(\lambda, v_{Empf,akz})}{n_{HALTE}(\lambda = 0, v_{Empf,akz} = \max) - n_{HALTE}(\lambda, v_{Empf,akz} = \max)}$$

$$\eta(n_{HALTE}) = \frac{90,5_{(1)} - 79,1_{(2)}}{90,5_{(3)} - 42,4_{(4)}}$$

$$\underline{\underline{\eta(n_{HALTE}) = 0,2370 \approx 24 \%}}$$

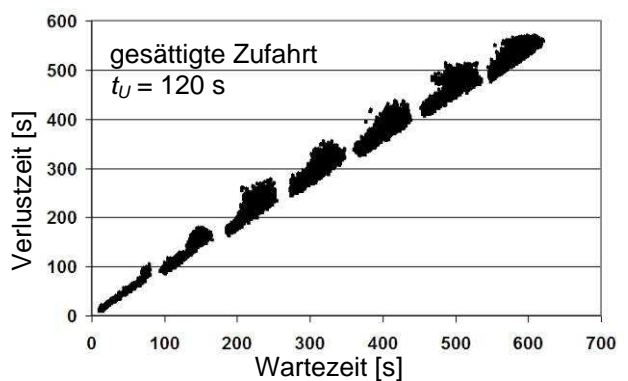
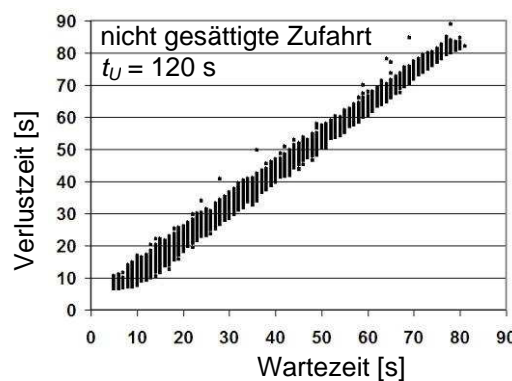
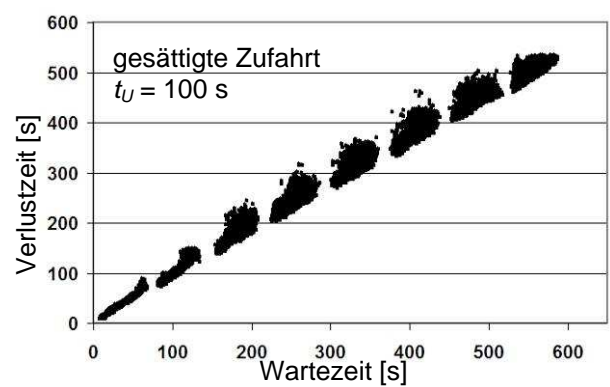
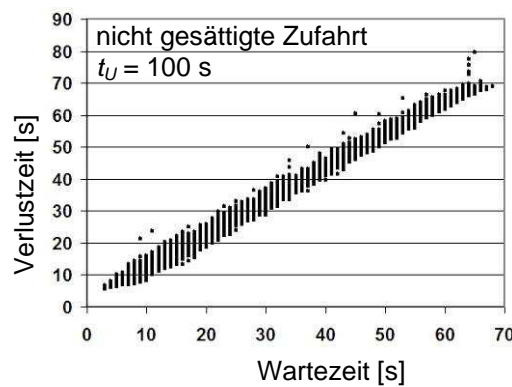
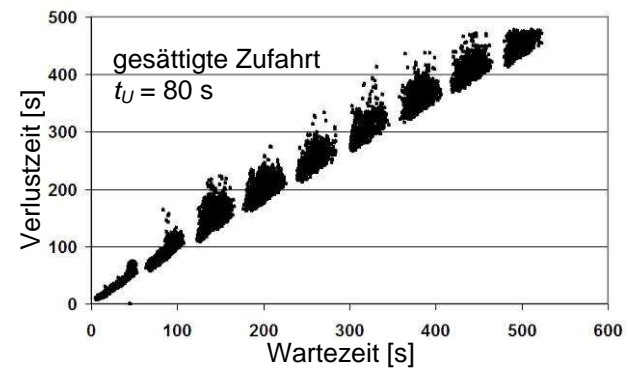
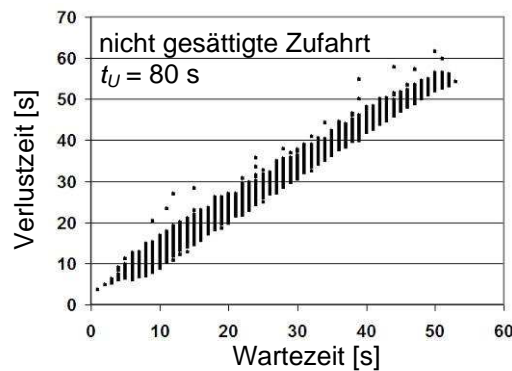
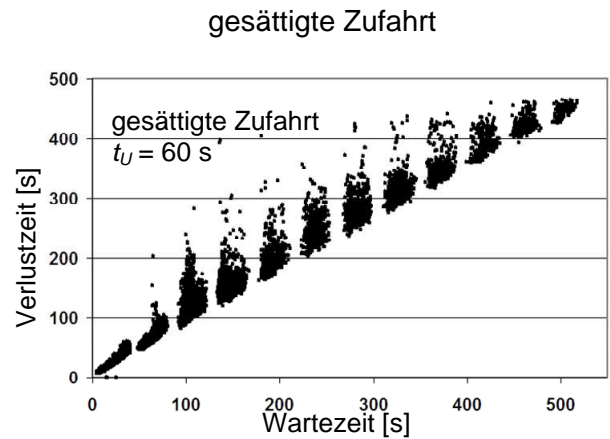
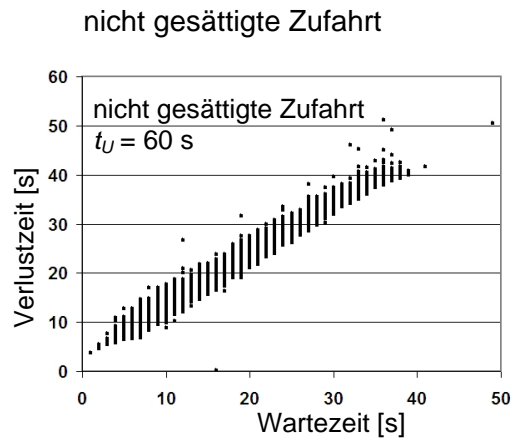
Unter den gegebenen Bedingungen hat die Funktion der kooperativen Verkehrsbeeinflussung einen Wirkungsgrad von 24 %.

### Mittlere Wirkungsgrade:

Die folgende Tabelle stellt die Mittelwerte der Wirkungsgrade  $\eta$  der drei Strecken mit der verkehrlich größten Wirksamkeit der Verkehrsbeeinflussung, welche aus Stauzähler 1, 5 und 6 berechnet wurde, dar. Im Hauptteil der Arbeit sind diese in Abbildung 4-16 graphisch visualisiert.

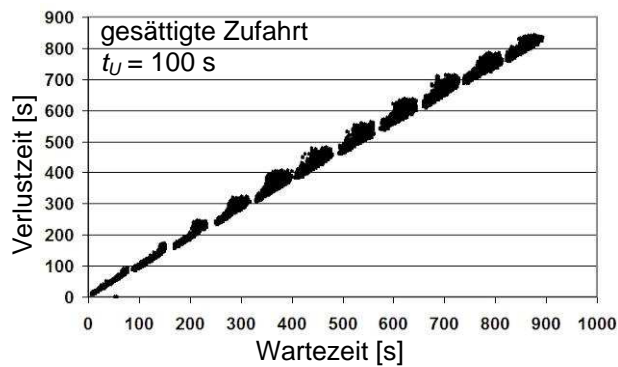
	Rückstaulänge			Anzahl der Halte			Wartezeit		
	min. akzeptiert Geschwindigkeit			min. akzeptiert Geschwindigkeit			min. akzeptiert Geschwindigkeit		
	max	$\geq 20$ km/h	$\geq 30$ km/h	max	$\geq 20$ km/h	$\geq 30$ km/h	max	$\geq 20$ km/h	$\geq 30$ km/h
<b>einstreifig</b>	100 %	33 %	17 %	100 %	29 %	6 %	100 %	9 %	2 %
<b>zweistreifig</b>	100 %	60 %	36 %	100 %	55 %	28 %	100 %	22 %	0 %



**Anhang E: Mobil erfasste Parameter****Gegenüberstellung von Wartezeit und Verlustzeit** $t_U = 60 \text{ s} / 80 \text{ s} / 100 \text{ s} / 120 \text{ s}$  – konstanter Freigabezeitanteil



## Geänderter Freigabezeitanteil



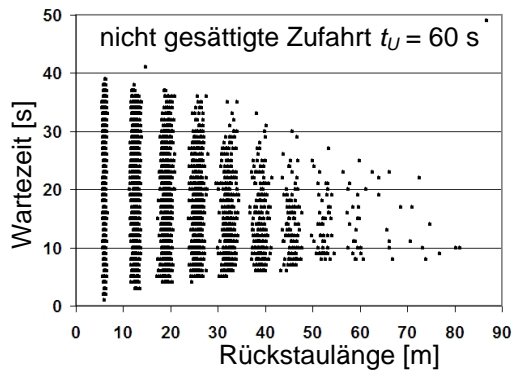
## Nachweis der Korrelation und des Stichprobenumfangs:

Umlaufzeit	60 s		80 s		100 s		120 s		100 s
Art der Regression	linear $y = a + b \cdot x$		linear $y = a + b \cdot x$		linear $y = a + b \cdot x$		linear $y = a + b \cdot x$		linear $y = a + b \cdot x$
Sättigung	< 1.0	> 1.0	< 1.0	> 1.0	< 1.0	> 1.0	< 1.0	> 1.0	> 1.0
<b>r</b>	0,9897	0,9879	0,9947	0,9945	0,9964	0,9961	0,9974	0,9963	0,9988
<b>B</b>	0,9795	0,9760	0,9895	0,9890	0,9929	0,9921	0,9949	0,9927	0,9976
<b>x<sub>m</sub></b>	20,8	120,52	28,2	195,81	35,5	347,47	43,15	418,68	448,55
<b>y<sub>m</sub></b>	24,3	124,32	31,5	191,24	38,5	326,28	45,93	390,42	430,24
<b>S<sub>xx</sub></b>	504564	2512239 08	1046257	4080705 70	1806807	5517803 36	2816459	5586298 35	912152654
<b>S<sub>yy</sub></b>	530909	2193890 03	1109864	3345019 34	1925596	4397552 13	3020283	4487708 54	793968403
<b>S<sub>xy</sub></b>	512242	2319301 34	1071921	3674225 73	1858577	4906505 00	2909081	4988582 31	849985227
<b>a</b>	3,16	13,06	2,58	14,93	2,04	17,31	1,36	16,54	12,26
<b>b</b>	1,02	0,92	1,02	0,90	1,03	0,89	1,03	0,89	0,93
<b>t<sub>berechnet</sub></b>	526,727	909,80	760,29	1365,03	937,35	1623,81	1127,84	1681,25	2485,3
<b>t<sub>prüf</sub></b>	3,107	3,107	3,107	3,107	3,107	3,107	3,107	3,107	3,107
<b>α</b>	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
H <sub>0</sub> , dass keine lineare Regression vorliegt wird abgelehnt → wahrscheinlich lineare Korrelation									
<b>Korrelation ?</b>	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
<b>C</b>	1	10	1	10	1	10	1	10	1
<b>α</b>	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
<b>t(α;n-1)</b>	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86
<b>n<sub>erf.</sub></b>	6,48	8,95	6,57	6,14	7,53	5,72	8,17	5,45	4,43
<b>Simulationsläufe?</b>	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA

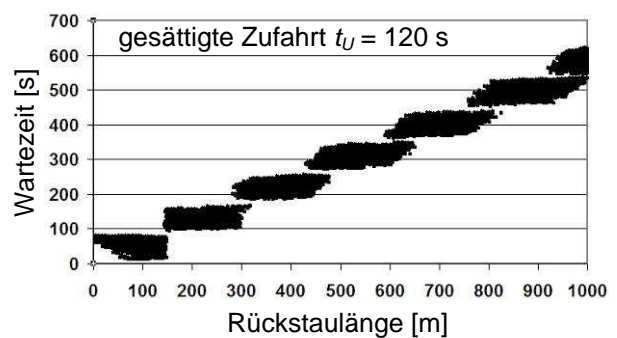
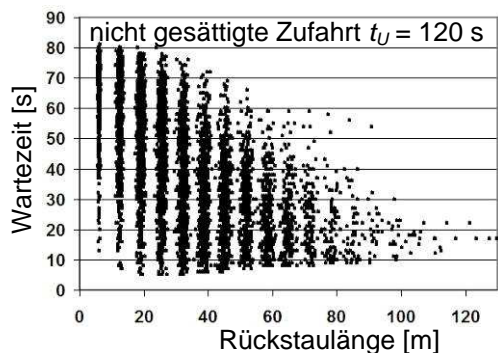
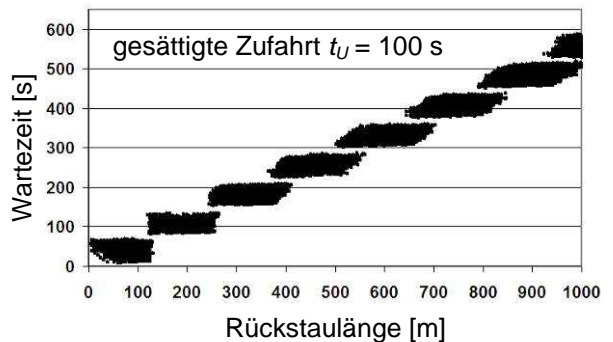
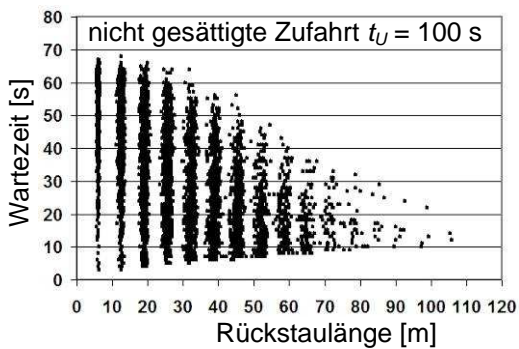
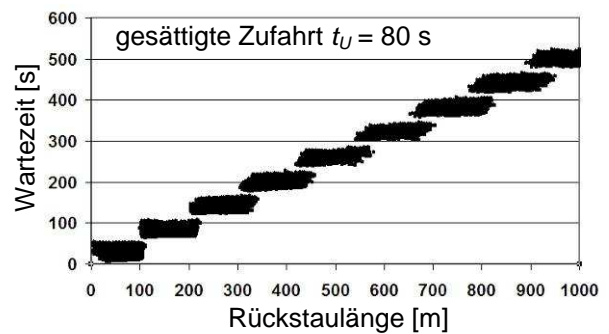
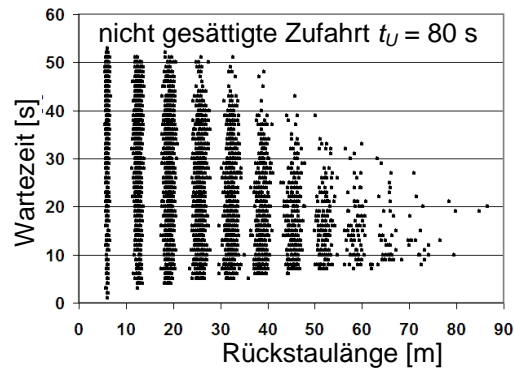
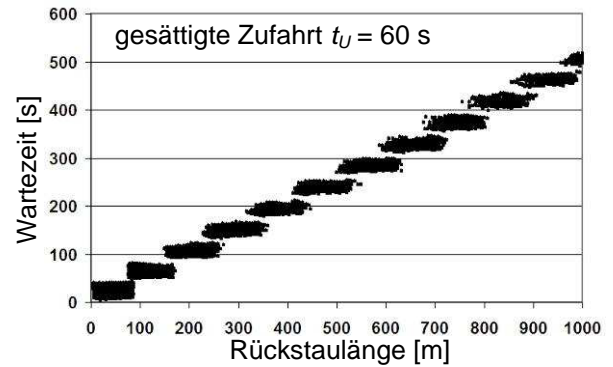
## Gegenüberstellung von Wartezeit und Rückstaulänge

 $t_U = 60 \text{ s} / 80 \text{ s} / 100 \text{ s} / 120 \text{ s}$  – konstanter Freigabezeitanteil

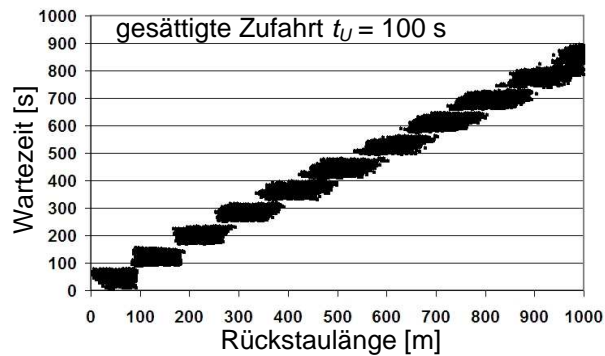
nicht gesättigte Zufahrt



gesättigte Zufahrt



## Geänderter Freigabezeitanteil

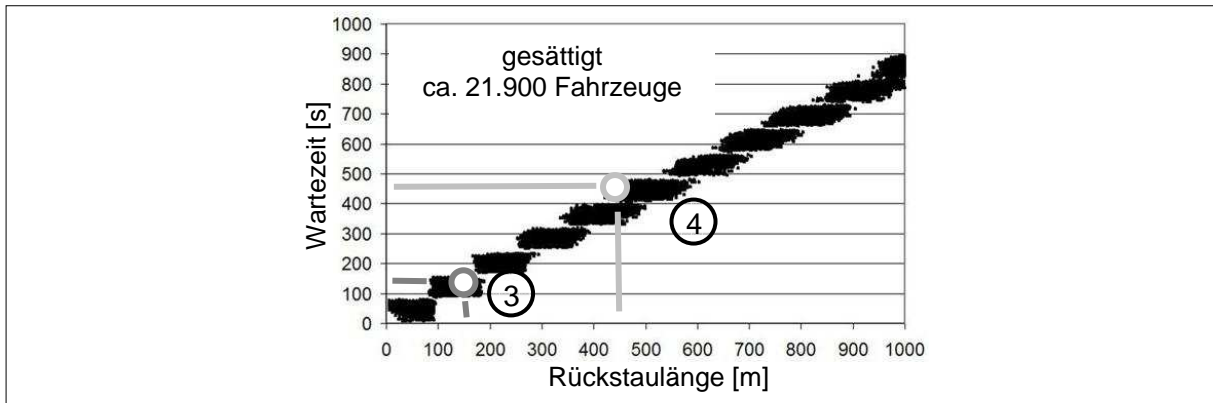


## Nachweis der Korrelation und des Stichprobenumfangs:

Umlaufzeit	60 s	80 s	100 s	120 s	100 s
Art der Regression	Linear $y = a + b \cdot x$	Linear $y = a + b \cdot x$	Linear $y = a + b \cdot x$	Linear $y = a + b \cdot x$	Linear $y = a + b \cdot x$
Sättigung	> 1.0	> 1.0	> 1.0	> 1.0	> 1.0
<b>r</b>	0,9922	0,9916	0,9908	0,9878	0,9943
<b>B</b>	0,9845	0,9833	0,9817	0,9758	0,9887
<b>x<sub>m</sub></b>	232,54	371,97	633,19	731,9	518,24
<b>y<sub>m</sub></b>	120,52	195,81	347,47	418,68	448,55
<b>S<sub>xx</sub></b>	1054260802	1601797807	1922821801	1762607139	1312258920
<b>S<sub>yy</sub></b>	251223908	408070570	551780336	558629835	912152654
<b>S<sub>xy</sub></b>	510648850	801719006	1020552772	980217004	1087878179
<b>a</b>	7,885	9,637	11,3989	11,6547	18,918
<b>b</b>	0,4844	0,5005	0,5308	0,5561	0,829
<b>t<sub>berechnet</sub></b>	1139,32	1105,65	1058,59	917,48	1143,71
<b>t<sub>prüf</sub></b>	3,107	3,107	3,107	3,107	3,107
<b>α</b>	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
H <sub>0</sub> , dass keine lineare Regression vorliegt wird abgelehnt → wahrscheinlich lineare Korrelation					
<b>Korrelation?</b>	JA	JA	JA	JA	JA
<b>C</b>	15	15	15	15	15
<b>α</b>	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
<b>t(α;n-1)</b>	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86
<b>n<sub>erf.</sub></b>	2,93	5,05	7,43	9,96	10,6
<b>Simulationsläufe?</b>	JA	JA	JA	JA	JA

**Beispielrechnung für gesättigte Zufahrten hinsichtlich der Freigabezeit**

Annahmen:  $t_F = 30 \text{ s}$      $t_S = 70 \text{ s}$      $t_U = 100 \text{ s}$      $\Delta x_{Fz} = 6,50 \text{ m}$      $\tau_B = 2,00 \text{ s/Fz}$



Über die Betrachtung der Wartezeit ist es in allen Fällen möglich das Fahrzeug einer bestimmten Anzahl an Umläufen zuzuordnen, die es in der Zufahrt warten musste. Fahrzeug ③ ( $t_{FCD,WARTE} = 150 \text{ s}$ ) bspw. hat zwei Umläufe zu warten, Fahrzeug ④ ( $t_{FCD,WARTE} = 450 \text{ s}$ ) sechs Umläufe. Die Wartezeit genügt als alleiniges Kriterium um die Verkehrszustände im Zulauf der LSA und damit die Dauer der Grünzeit und deren Dringlichkeit zu bestimmen. Staus, deren Ausdehnungen größer als der Kommunikationsbereich sind, lassen sich so detektieren und ihre Länge abschätzen. Über das erstellte Formelwerk kann die Anzahl der freizugebenden Umläufe als auch der notwendige Freigabezeitbedarf ermittelt werden.

$$a_1 = (-0,7083 \cdot 0,3 + 0,9583) \cdot 100 = 74,58 \text{ und } b = 70,00$$

Anzahl der freizugebenden Umläufe mit (5-16)

$$\underline{\underline{n_{U,erf(3)} = \frac{t_{FCD,WARTE} - b}{a_1} = \frac{150 - 70,00}{74,58} = 1,07 \text{ Umläufe}}}$$

$$\underline{\underline{n_{U,erf(4)} = \frac{t_{FCD,WARTE} - b}{a_1} = \frac{450 - 70,00}{74,58} = 5,10 \text{ Umläufe}}}$$

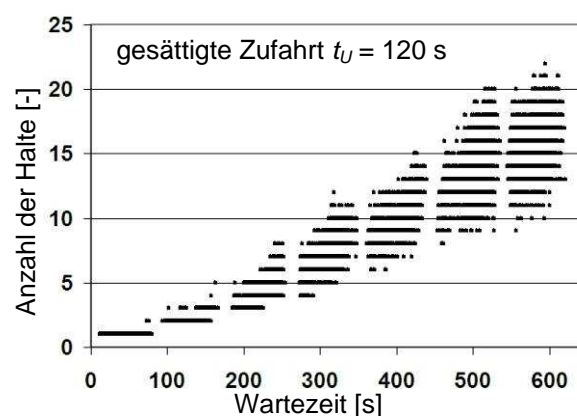
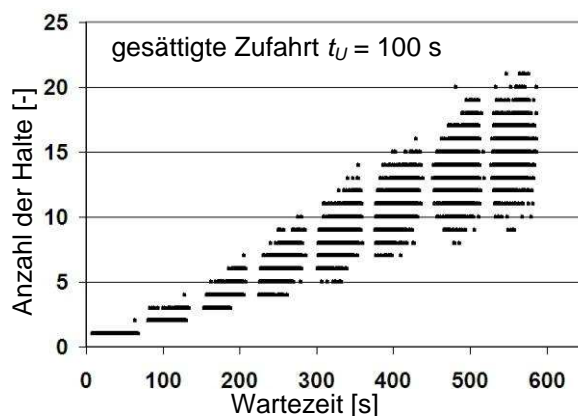
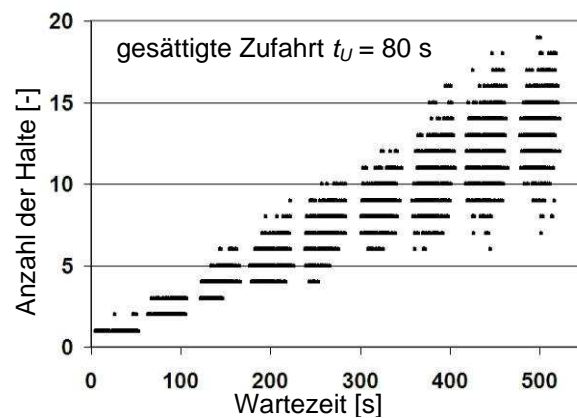
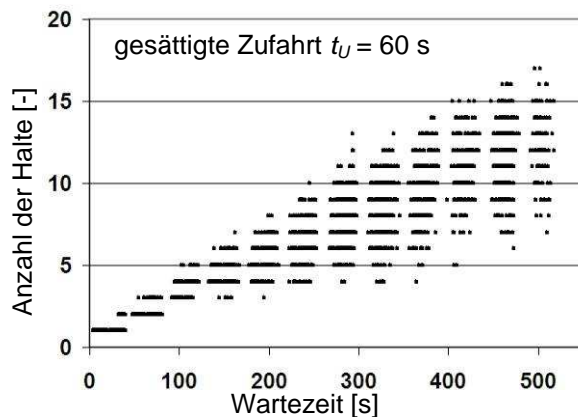
Freigabezeitbedarf mit (5-16)

$$\underline{\underline{t_{F,erf(3)} = \frac{(t_{FCD,WARTE} - t_S) \cdot t_F}{(-0,7083 \cdot f + 0,9583) \cdot t_U} = \frac{(150 - 70,00) \cdot 30}{74,58} = 32,10 \text{ s}}}$$

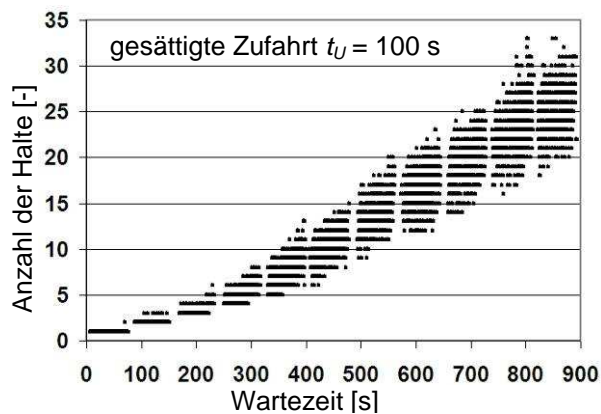
$$\underline{\underline{t_{F,erf(4)} = \frac{(t_{FCD,WARTE} - t_S) \cdot t_F}{(-0,7083 \cdot f + 0,9583) \cdot t_U} = \frac{(450 - 70,00) \cdot 30}{74,58} = 152,86 \text{ s}}}$$

## Gegenüberstellung von Anzahl der Halte und Wartezeit

### Konstanter Freigabezeitanteil

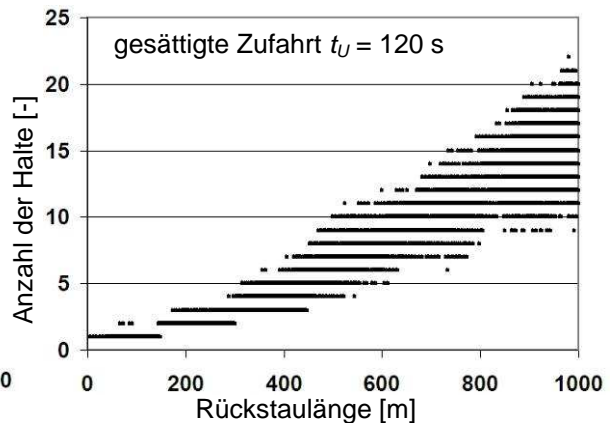
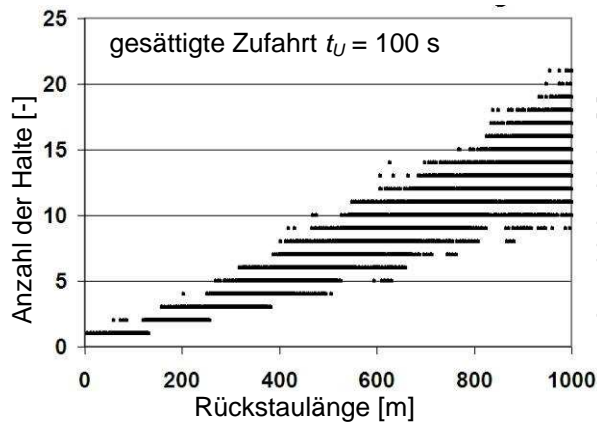
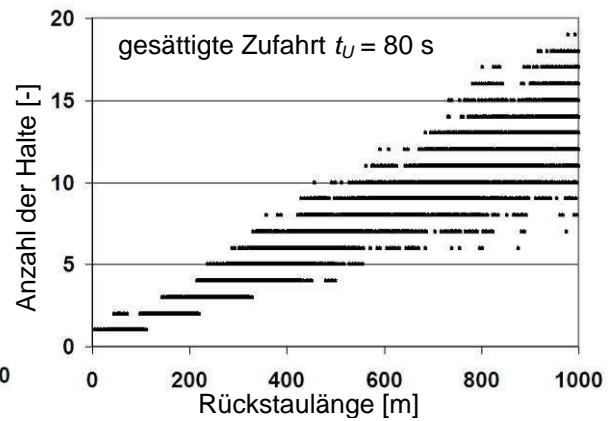
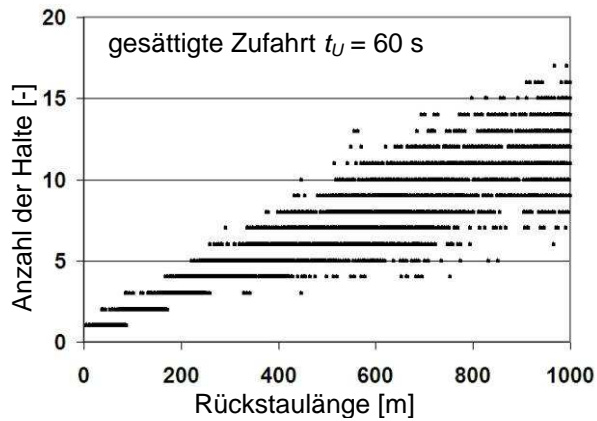


### Geänderter Freigabezeitanteil

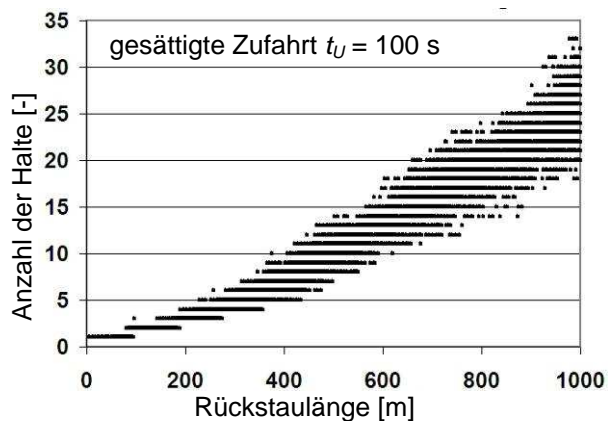


## Gegenüberstellung von Anzahl der Halte und Rückstaulänge

Konstanter Freigabezeitanteil



Geänderter Freigabezeitanteil



**Nachweis der Korrelation und des Stichprobenumfangs**

Anzahl der Halte und Wartezeit

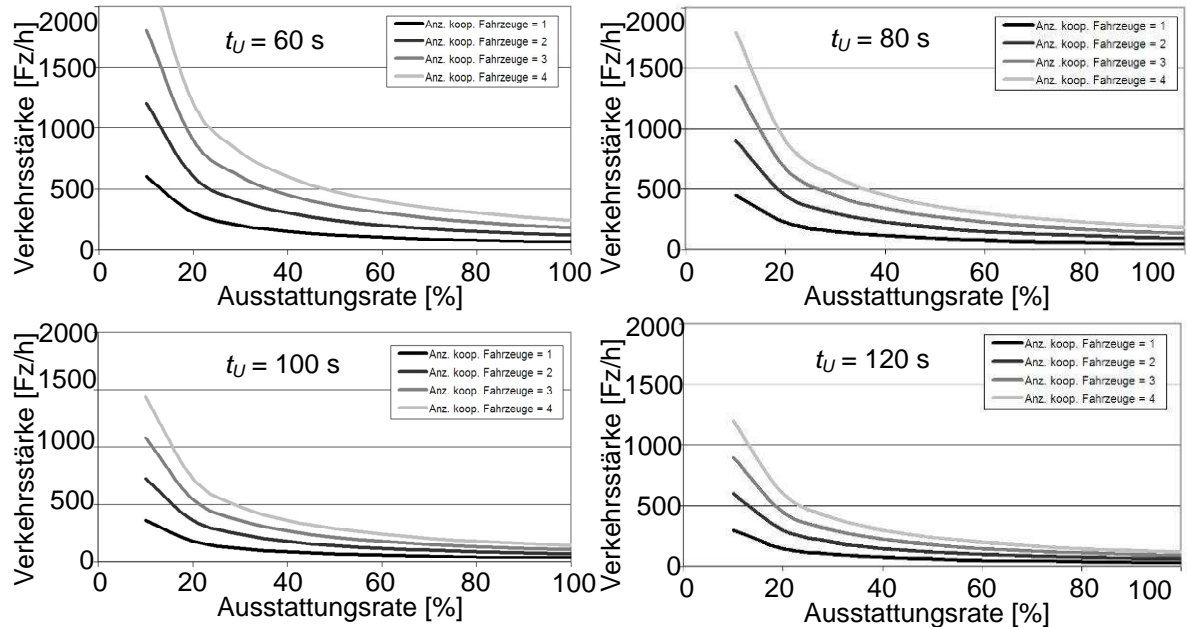
Umlaufzeit	60 s	80 s	100 s	120 s	100 s
Art der Regression	nicht linear $y = a \cdot x^b$	nicht linear $y = a \cdot x^b$	nicht linear $y = a \cdot x^b$	nicht linear $y = a \cdot x^b$	nicht linear $y = a \cdot x^b$
Sättigung	> 1.0	> 1.0	> 1.0	> 1.0	> 1.0
<b>r</b>	0,9632	0,9660	0,9700	0,9662	0,9621
<b>B</b>	0,9277	0,9332	0,9409	0,9334	0,9257
<b>x<sub>m</sub></b>	4,410	4,975	5,673	5,895	5,873
<b>y<sub>m</sub></b>	0,940	1,311	1,965	2,166	2,056
<b>S<sub>xx</sub></b>	16507	14789	10140	8640	9513
<b>S<sub>yy</sub></b>	11029	14167	13630	13291	13992
<b>S<sub>xy</sub></b>	12996	13983	11403	10353	11100
<b>a<sub>linear</sub></b>	-2,531	-3,393	-4,415	-4,899	-4,797
<b>b<sub>linear</sub></b>	0,7873	0,9455	1,1246	1,1983	1,1668
<b>a</b>	0,0796	0,0336	0,0121	0,0075	0,0083
<b>b</b>	0,7873	0,9455	1,1246	1,1983	1,1668
<b>t<sub>berechnet</sub></b>	511,59	539,15	576,99	541,01	431,07
<b>t<sub>prüf</sub></b>	3,107	3,107	3,107	3,107	3,107
<b>α</b>	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
H <sub>0</sub> , dass keine lineare Regression vorliegt wird abgelehnt → wahrscheinlich lineare Korrelation					
Korrelation?	JA	JA	JA	JA	JA
<b>C</b>	1	1	1	1	1,5
<b>α</b>	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
<b>t(α;n-1)</b>	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86
<b>n<sub>erf.</sub></b>	2,26	3,96	6,62	8,01	8,13
Simulationsläufe?	JA	JA	JA	JA	JA

Anzahl der Halte und Rückstaulänge

Umlaufzeit	60 s	80 s	100 s	120 s	100 s
Art der Regression	linear $y = a + b \cdot x$	linear $y = a + b \cdot x$	linear $y = a + b \cdot x$	linear $y = a + b \cdot x$	linear $y = a + b \cdot x$
Sättigung	> 1.0	> 1.0	> 1.0	> 1.0	> 1.0
<b>r</b>	0,9639	0,9695	0,9621	0,9566	0,977
<b>B</b>	0,9291	0,9399	0,9257	0,9152	0,9545
<b>x<sub>m</sub></b>	232,54	371,97	633,19	731,9	518,24
<b>y<sub>m</sub></b>	3,39	5,1	9,12	10,86	11,32
<b>S<sub>xx</sub></b>	1054260802	1601797807	1922821801	1762607139	1312258920
<b>S<sub>yy</sub></b>	160359	324170	537022	564052	994771
<b>S<sub>xy</sub></b>	12533201	22092543	30916586	30164053	352996621
<b>a</b>	0,626	-0,035	-1,059	-1,666	-2,621
<b>b</b>	0,012	0,014	0,016	0,017	0,027
<b>t<sub>berechnet</sub></b>	516,9	569,53	510,43	474,5	559,83
<b>t<sub>prüf</sub></b>	3,107	3,107	3,107	3,107	3,107
<b>α</b>	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
H <sub>0</sub> , dass keine lineare Regression vorliegt wird abgelehnt → wahrscheinlich lineare Korrelation					
Korrelation?	JA	JA	JA	JA	JA
<b>C</b>	1	1	1	1	1
<b>α</b>	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
<b>t(α;n-1)</b>	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86
<b>n<sub>erf.</sub></b>	1,93	3,25	6,6	7,93	10,48
Simulationsläufe?	JA	JA	JA	JA	JA

## Anhang F: Kooperative Lichtsignalanlage

### Erforderliche Ausstattungsraten für kooperative Lichtsignalsteuerung



### Herleitung der Zusammenhänge bei gesättigten Zufahrten

Abbildung: Gegenüberstellung von Wartezeit und Anzahl der Umläufe

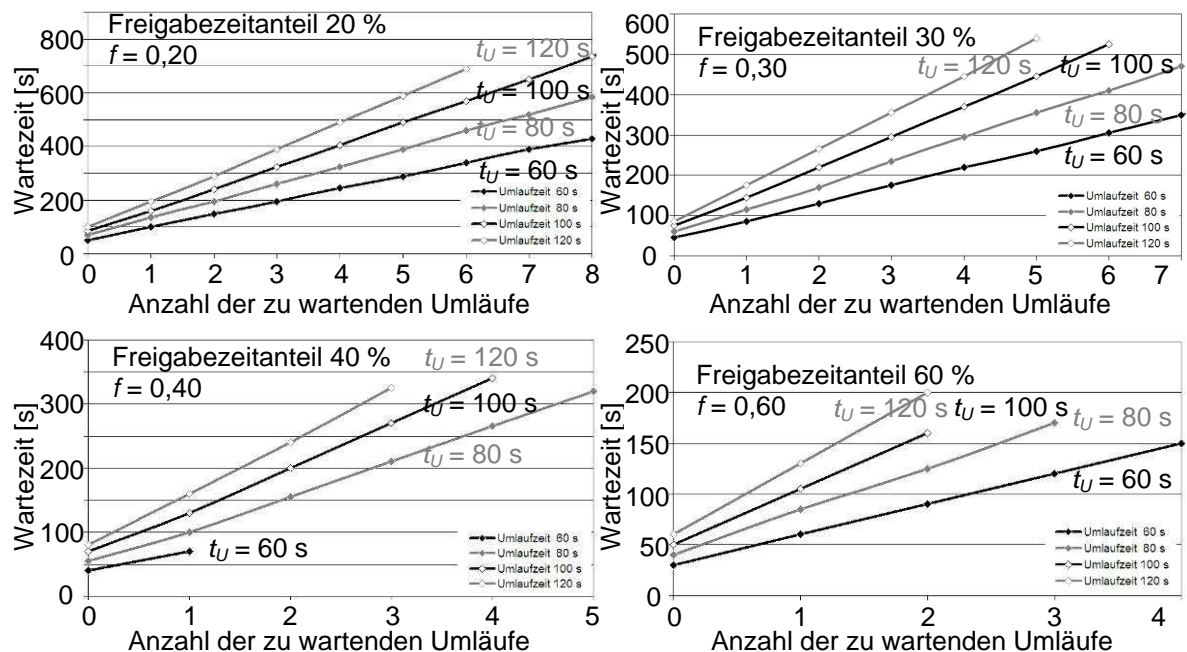




Tabelle: Nachweis der Regressionsgeraden

$y = a \cdot x + b$				
$t_U$	$t_S$	$a$	$b$	$R^2$
<b><math>f = 0,20</math></b>				
60	48	47,75	52,33	0,9172
80	64	64,58	68,33	0,9366
100	80	81,88	79,55	1,0057
120	96	98,57	96,43	0,9956
<b><math>f = 0,30</math></b>				
60	42	44,27	41,82	1,0044
80	56	59,05	57,08	0,9810
100	70	75,00	71,43	0,9800
120	84	90,71	84,05	0,9994
<b><math>f = 0,40</math></b>				
80	48	53,57	50,24	0,9555
100	60	68,00	66,00	0,9091
120	72	81,50	79,00	0,9114
<b><math>f = 0,60</math></b>				
60	24	30,00	30,00	0,8000
80	32	43,00	40,50	0,7901
100	40	55,00	50,00	0,8000
120	48	70,00	60,00	0,8000

ISBN 978-3-86219-190-1