

**Schriftenreihe
Verkehr
Heft 26**

Felix Rudolph

**Qualitätsanalyse koordinierter
Lichtsignalsteuerungen unter Verwendung
kooperativ gewonnener Messgrößen**

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

kassel
university 
press

Schriftenreihe Verkehr der Universität Kassel

Herausgeber:

Institut für Verkehrswesen

Felix Rudolph

**Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen
unter Verwendung kooperativ gewonnener Messgrößen**

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen 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. Justin Geistefeldt

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Juni 2016

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2016

ISBN 978-3-7376-0246-4 (print)

ISBN 978-3-7376-0247-1 (e-book)

DOI: <http://dx.medra.org/10.19211/KUP9783737602471>

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-402477>

Schriftenreihe Verkehr

Heft 26 – Januar 2017

Herausgeber:

Institut für Verkehrswesen

Universität Kassel

34109 Kassel

© 2017, kassel university press GmbH, Kassel

www.upress.uni-kassel.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Vorwort des Herausgebers

Die zyklische Unterbrechung von Verkehrsströmen an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten führt zu Brems-, Halte- und Beschleunigungsvorgängen und somit zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen gegenüber einer ungehinderten Fahrt. Eine Koordinierung der Signalisierung entlang der Hauptverkehrsströme soll die Anzahl der Haltevorgänge reduzieren und damit einen Beitrag zur Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen leisten. Die Koordinierungsqualität kann in Abhängigkeit von den topologischen Voraussetzungen sehr unterschiedlich ausfallen und sich bei Veränderungen der Verkehrsnachfrage und der Verkehrsstruktur auch unbemerkt verschlechtern. Selbstredend können sowohl temporäre als auch weitgehend dauerhaft etablierte verkehrsorganisatorische Maßnahmen oder auch bauliche Veränderungen entlang des Streckenzuges die Qualität der koordinierten Signalsteuerungen beeinträchtigen.

Kooperative Systeme im Straßenverkehr stiften immer dann sowohl auf der Fahrzeug- als auch auf der Infrastrukturseite einen Nutzen, wenn die von der einen Seite generierten Daten von der jeweils anderen sinnvoll genutzt werden können. Verbreiten beispielsweise Lichtsignalanlagen eine Information zum Zeitpunkt eines bevorstehenden Phasenwechsels, können Autofahrer mit diesem Wissen ihre Fahrweise auf die Signalisierung abstimmen. Im Gegenzug können Fahrzeuge bzw. in diesen mitgeführte Smartphones Fahrtverlaufsdaten liefern, mit denen die sich tatsächlich einstellende Signalisierungsqualität kontinuierlich analysiert werden kann. Allerdings kommt dieser Online-Ansatz mitunter zu ganz anderen Ergebnissen als etablierte Methoden, da der Verkehrsablauf nunmehr durch externe Fahrverhaltensempfehlungen beeinflusst ist.

Die vorliegende Arbeit greift diese Problematik auf und stellt ein Verfahren zur Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen unter Verwendung kooperativ gewonnener Messgrößen vor. Das Verfahren wurde im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens UR:BAN-VV¹ erprobt und die grundsätzliche Einsatzfähigkeit im realen Straßenverkehr mit kooperativen Lichtsignalanlagen im Straßennetz der Stadt Kassel nachgewiesen.

Kassel, im Juni 2016

Prof. Dr.-Ing. Robert Hoyer

¹ Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement - Vernetztes Verkehrssystem, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Förderkennzeichen 19P11007R

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrswesen der Universität Kassel. Der Leiter des Fachgebiets Verkehrstechnik und Transportlogistik, Herr Prof. Dr.-Ing. Robert Hoyer, übernahm die Erstbetreuung der Dissertation und trug durch seine fortwährend gute Betreuung, seine konstruktive Kritik und seine Anregungen maßgebend zum Gelingen dieser Arbeit bei. Ihm gebührt mein größter Dank.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Justin Geistefeldt danke ich für die Übernahme des Korreferats, für die fachlichen Hinweise und für die vielen wertvollen Beiträge. Danken möchte ich ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Carsten Sommer und Herrn Dr.-Ing. Konrad Mollenhauer für ihre Mitwirkung in der Promotionskommission.

Den ehemaligen Kollegen und den wissenschaftlichen Hilfskräften des Fachgebiets Verkehrstechnik und Transportlogistik danke ich für das sehr angenehme Arbeitsklima. Besonders möchte ich mich bei meinen guten Freunden Herrn Dr.-Ing. Toni Weisheit und Herrn Dipl.-Ing. Michael Schäfer für die vielen inspirierenden Diskussionen bedanken. In den gemeinsamen Jahren der Ausbildung, des Studiums und der Dissertation teilten wir deren Höhepunkte und motivierten uns gegenseitig in beschwerlichen Zeiten. Bei Toni Weisheit bedanke ich mich darüber hinaus für die tolle Zusammenarbeit im Forschungsprojekt UR:BAN-VV. Ein weiterer Dank richtet sich an Frau Agnès Geipel, die auch bei nicht-wissenschaftlichen Angelegenheiten immer ein offenes Ohr für mich hatte.

Weiterhin möchte ich mich bei den ehemaligen Kollegen des Instituts für Verkehrswesen bedanken, die mich bereits als Student thematisch gefordert, aber auch gefördert haben. Herrn Dr.-Ing. Thomas Otto danke ich darüber hinaus für die kritische Durchsicht der Arbeit und für die hilfreichen Verbesserungsvorschläge. Bei Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Carsten Kühnel möchte ich mich insbesondere für die motivierenden Gespräche bedanken. Herrn Dr.-Ing. Christian Leitzke danke ich für die unermüdliche Unterstützung bei Programmierungs- und Formatierungsarbeiten.

Ein sehr großer Dank geht an meinen guten Freund Juergen Sehm, der mich während meiner Promotion durch seinen Zuspruch immer wieder neu motivieren und bestärken konnte. Ihm danke ich auch für das Korrekturlesen des Manuskripts.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meiner Familie und bei meinen Freunden für ihre uneingeschränkte Unterstützung im privaten Bereich, wodurch die Anfertigung dieser Dissertation erst möglich wurde.

München, im November 2016

Felix Rudolph

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen unter Verwendung mobil erfasster Kenngrößen. Ausgangspunkt sind kooperative Lichtsignalanlagen, die in der Lage sind, mit entsprechend ausgestatteten Fahrzeugen zu kommunizieren. Hierbei können sowohl Signalisierungsinformationen der Lichtsignalanlage als auch Fahrtverlaufsdaten des Fahrzeuges gegenseitig ausgetauscht werden. Auf Basis der Signalisierungsinformationen generieren fahrzeugseitige Funktionen individuelle Fahrempfehlungen, welche u. a. ein Fahren über mehrere Lichtsignalanlagen ermöglichen und dadurch zur Verbesserung der Verkehrseffizienz sowie zur Emissionsminderung im urbanen Straßenraum beitragen. Der Infrastrukturbetreiber erhält im Gegenzug von den Fahrzeugen verkehrliche Daten, welche durch straßenseitige Erfassungseinrichtungen nur schwierig zu erfassen sind. In diesem Zusammenhang untersucht die Arbeit, wie die in Quasi-Echtzeit übermittelten verkehrlichen Kenngrößen in der Verkehrszentrale zur Qualitätsanalyse von koordinierten Lichtsignalsteuerungen genutzt werden können.

Die Arbeit greift dabei einen zentralenbasierten Ansatz auf. Eine in diesem Kontext entwickelte Smartphoneapplikation kooperiert direkt mit einer Verkehrszentrale respektive mit einem zwischengeschalteten Dienstleister. Der hierfür notwendige Datenaustausch erfolgt über das Mobilfunknetz. Das Endgerät erhält abhängig von der Fahrzeugposition und von der Fahrtrichtung prognostizierte Schaltzeiten vorausliegender Lichtsignalanlagen. Mit den Daten der Schaltzeitprognose generiert und visualisiert die eigens hierfür entwickelte Smartphoneapplikation individuelle Geschwindigkeitsempfehlungen. Durch die Fahrerassistenzfunktionen kann der Fahrer seine Geschwindigkeit an die Signalisierung stromabwärtiger Lichtsignalanlagen anpassen, um so unnötige Halte zu vermeiden. Jedoch profitiert nicht nur der informierte Fahrer von diesen Informationen, sondern auch der nachfolgende Verkehr. Vor diesem Hintergrund wird mit Hilfe mikroskopischer Verkehrssimulationen untersucht, in welchem Maße sich das geänderte Fahrverhalten auf den Verkehrsablauf der gesamten Strecke auswirkt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird in einem nächsten Schritt die Anwendbarkeit von bestehenden Bewertungsverfahren analysiert. Die Arbeit zeigt auf, dass sich die bislang angewendeten Verfahren nur bedingt eignen, die Koordinierungsqualität mittels der kooperativ gewonnenen Daten zu bewerten. Die direkt aus den mobil erfassten Daten abgeleiteten Qualitätskenngrößen weichen zum Teil erheblich von dem sich im unbeeinflussten Verkehr einstellenden und somit maßgebenden Referenzwerten ab. Die deutlichen Differenzen machen sich folglich auch in den auseinanderdriftenden Qualitätsbeurteilungen bemerkbar. Aus diesem Grund stellt die Arbeit ein neu entwickeltes Bewertungsverfahren vor, welche mehrere verkehrliche Kenngrößen aufgreift sowie wesentliche Einflussfaktoren mit einbezieht. Infolge der gleichzeitigen Berücksichtigung mehrerer voneinander abhängiger Variablen stellt der Ansatz ein multivariates Bewertungsverfahren dar.

Abstract

In the recent past, so-called cooperative traffic lights became a main emphasis of research and development activities. Cooperative traffic signal systems are now able to communicate with correspondingly equipped vehicles due to technical progress in vehicle-to-infrastructure communication. In this case, advanced driver assistance systems are able to obtain signal information from the upcoming traffic light and to provide individual driving recommendations. The driver can pass traffic lights without stopping by taking advantage of these information. This leads to an enhancement of traffic efficiency and to a reduction of emissions in urban road networks. In return, the infrastructure operator receives additional data from equipped cars, which are difficult to determine by conventional detectors. In this context, the present study analyzes, how limited probe vehicle data can be used in traffic management centers to assess the quality of coordinated signalizations.

The underlying cooperative system is based on a central-sided approach. A smartphone application specially developed for this purpose cooperates directly with the traffic management system or respectively with a service provider. The data exchange is realized via cellular network. Depending on the current position and on the driving direction, the mobile device receives predicted switching times from upcoming traffic signals. The smartphone application generates individual speed advisories in order to arrive to the next signalized intersection during a green phase. Besides the driver also the following traffic benefits from this information. Against this backdrop, the present study analyzes the impact of the changed driving habits regarding to the traffic flow on the entire road section. The analyses are based on traffic simulations. Subsequent to this, the applicability of already existing assessment methods is analyzed. The study reveals that the previously used methods are only restrictedly suitable for the determination of quality of coordinated signalizations by using the mentioned probe vehicle data. The quality parameters directly derived from the probe vehicle data deviate significantly from the reference value. The significant differences are also noticeable in wide gaps of determined quality assessment results. For this reason, the paper presents and discusses a new method for quality assessment which takes into account several traffic parameters, and the impacts of the influenced driving habits due to the provided signal information. The approach represents a multivariate assessment method due to the simultaneous consideration of several interdependent variables.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Zielsetzung und grundsätzliche Vorgehensweise	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Vorbemerkungen	5
2.2	Qualität	5
2.2.1	Allgemeiner Qualitätsbegriff	5
2.2.2	Technische Definition	6
2.2.3	Qualitätsbegriffe aus unterschiedlichen Perspektiven	7
2.2.4	Qualitätsdefinition im Verkehrswesen	8
2.3	Signalisierung im Straßennetz	9
2.3.1	Entwicklung	9
2.3.2	Ziele der Verkehrssteuerung mittels Lichtsignalanlagen	10
2.3.3	Steuerungsverfahren der Signalisierung	11
2.3.4	Steuerungsebenen der Signalisierung	14
2.3.5	Gegenüberstellung der Steuerungsverfahren	14
2.4	Koordinierung von Lichtsignalanlagen	16
2.4.1	Zielsetzung	16
2.4.2	Planung der Koordinierung	17
2.4.3	Grundlegende Verfahren zur Planung von Koordinierungen	23
2.4.4	Optimierungsverfahren und Optimierungsprogramme	24
2.4.5	Einsatz von Geschwindigkeitsanzeigen	28
2.4.6	Bewertungsverfahren	30
2.5	Schlussfolgerungen	35
3	Forschungsstand zu kooperativen Systemen	37
3.1	Vorbemerkungen	37
3.2	Europäische Projekte	38
3.3	Projekte im deutschsprachigen Raum	40
3.4	Schlussfolgerungen	44

4	Zentralenbasierter Ansatz kooperativer Lichtsignalanlagen	47
4.1	Problemstellung	47
4.2	Systemanforderungen und Systemarchitektur	48
4.3	Herausforderungen der technischen Umsetzung	50
4.3.1	Infrastrukturbetreiber	50
4.3.2	Dienstanbieter	52
4.3.3	Endgeräte	53
4.4	Umsetzung und Erprobung der Fahrerassistenzfunktionen	58
4.5	PVD-basierte Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen	62
4.6	Zwischenfazit	63
5	Verkehrliche Wirkungen der Fahrerbeeinflussung durch Assistenzfunktionen	65
5.1	Problemstellung	65
5.2	Simulationsumgebung	66
5.2.1	Simulationssoftware und Untersuchungsszenarien	66
5.2.2	Implementierung der Fahrerbeeinflussung	70
5.3	Ausstattungsrate	76
5.4	Versatzzeitvariation	78
5.5	Haltlinienabstand	81
5.6	Auslastungsgrad	85
5.7	Zwischenfazit	88
6	Qualitätsbewertung mittels fahrzeuggenerierter Daten	91
6.1	Vorbemerkungen	91
6.2	Mindestanforderungen an die verwendeten PVD	92
6.3	Ermittlung verkehrlicher Kenngrößen aus PVD	93
6.4	Qualitätsbewertung der Referenzszenarien	96
6.4.1	Qualitätsstufen	96
6.4.2	Durchfahrten ohne Halt	98
6.4.3	Mittlere Reisegeschwindigkeit	99
6.4.4	Performance Index	100
6.4.5	Zwischenfazit	101
6.5	Bewertung der Koordinierung mittels PVD	102
6.6	Zwischenfazit	110
7	Multivariates Bewertungsverfahren	113
7.1	Vorbemerkungen	113
7.2	Verfahrensentwicklung	114
7.2.1	Datengrundlage	114
7.2.2	Korrelationsanalysen	115

7.2.3	Ermittlung der Korrekturfunktionen	116
7.3	Vereinfachung und Anwendung des Verfahrens	119
7.4	Aussagefähigkeit	121
7.5	Mindestausstattungsrate	128
7.6	Anwendung auf Streckenzügen mit mehreren Lichtsignalanlagen	130
7.7	Fehlerbetrachtung	131
8	Zusammenfassung und Ausblick	135
8.1	Zusammenfassung	135
8.2	Grenzen und Ausblick	139
	Abkürzungsverzeichnis	V
	Verzeichnis verwendeter Formelzeichen	IX
	Literaturverzeichnis	XIII
	Abbildungsverzeichnis	XXVII
	Tabellenverzeichnis	XXIX
	Anhang	XXXI
A	Grundlagen Qualität	i
B	Erläuterungen zu den Begrifflichkeiten für die Einsatzempfehlung von Steuerungsverfahren bzgl. der Verkehrsbelastung	ii
C	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes	iii
D	Übersicht der IEEE 802.11-Standards	v
E	Strukturen der Verkehrssteuerung und des Verkehrsmanagements in Deutschland	vi
F	Extended-Devices-in-the-Loop Ansatz	viii
G	Statistischer Nachweis der Anzahl der Umläufe	ix
H	Fahrerbeeinflussung in der Simulationsumgebung	xv
I	Verkehrliche Wirkung der Fahrerbeeinflussung	xvi
J	Multivariates Bewertungsverfahren	xix

1 Einführung

1.1 Hintergrund

Das innerstädtische Verkehrsnetz ist durch eine Vielzahl von Knotenpunkten geprägt. Überall dort, wo eine zeitliche Trennung der Konfliktströme infolge zu hoher Verkehrsstärken oder aus Gründen der Verkehrssicherheit sinnvoll ist, bietet sich der Einsatz von Lichtsignalanlagen (LSA) an. Die Lage und Anzahl der LSA haben dabei einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Verkehrsablaufs. Um einen entsprechend hohen Standard zu erreichen, werden unter anderem die Freigabezeiten hintereinander liegender Signalisierungsquerschnitte auf bestimmten Straßenzügen koordiniert. Dadurch soll eine sogenannte "Grüne Welle" realisiert werden, mit der die Mehrzahl der Fahrzeuge eine Folge von LSA ohne Halt passieren kann. Dennoch entstehen viele Rückstaus und lange Wartezeiten vor Knotenpunkten bspw. durch unpassende und teilweise veraltete Parametereinstellungen der Signalprogramme einzelner LSA oder durch schlecht geplante bzw. eine nicht vorhandene Koordinierung. Die Ermittlung und Überwachung der sich in der Betriebsphase ergebenden Koordinierungsqualitäten stellt den Infrastrukturbetreiber vor eine gewisse Herausforderung. Der Grund liegt in der hierfür notwendigen und bislang sehr kosten- und zeitintensiven Durchführung von manuellen Erhebungen oder Befahrungen.

Eine Abhilfe können sogenannte kooperative Lichtsignalanlagen schaffen, welche zunehmend in das Blickfeld von Forschung und Entwicklung gerückt sind. Aufgrund neuer Informations- und Kommunikationstechnologien ist es nunmehr möglich, innerhalb des zugrunde liegenden verkehrstelematischen Systems Daten zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur bspw. der LSA auszutauschen. Der Grundgedanke besteht in einem wechselseitigen Informationsaustausch, von dem beide Kommunikationspartner profitieren. Im Hinblick auf signalisierte Straßennetze ist es bspw. zweckmäßig, dem kooperativen Fahrzeug bzw. dem kooperationswilligen Fahrer Umschaltzeitpunkte vorausliegender LSA zu übertragen. In Abhängigkeit vom Abstand bis zur nächsten LSA können daraus individuelle Geschwindigkeitsempfehlungen generiert und dem Fahrer bereitgestellt werden. Dadurch können die Fahrzeugführer ihre Fahrweise schon im Voraus auf die Signalisierung ausrichten und somit energieeffizienter und mit weniger Emissionen durch das lichtsignalisierte Straßennetz fahren. Der Infrastrukturbetreiber erhält im Gegenzug von den Fahrzeugen verkehrliche Daten, welche durch straßenseitige Erfassungseinrichtungen

nur schwierig zu erfassen sind. Die beiläufig mobil erfassten Daten bieten eine sinnvolle Ergänzung zu den Daten stationärer Erfassungseinrichtungen und können ggf. in eine in Echtzeit stattfindende und automatisierte Qualitätsanalyse von koordinierten Lichtsignalsteuerungen mit einbezogen werden. Im besten Fall kann dadurch auf die oben genannten manuellen Erhebungen und aufwendigen Befahrungen verzichtet werden. Aus heutiger Sicht (2016) scheint dieser Ansatz vielversprechend zu sein und sollte aus diesem Grund näher erforscht werden.

Trotz der positiven Entwicklungen hat sich bislang noch kein kooperatives System für signalisierte Straßennetze durchgesetzt. Infolge der hohen Kosten für die Inbetriebnahme der jeweiligen Teilapplikation und wegen der wechselseitigen Abhängigkeiten entsteht ein "Henne-Ei-Problem", welches die Einführung solcher Systeme erschwert [SANTA et al.-2014]. Die Fahrzeuge profitieren erst ab einem bestimmten Ausrüstungsgrad kooperationsfähiger Infrastruktureinrichtungen. Der Infrastrukturbetreiber erzielt wiederum erst bei entsprechend hoher Anzahl von kooperativen Fahrzeuge einen Vorteil.

1.2 Zielsetzung und grundsätzliche Vorgehensweise

Das Hauptziel der Arbeit liegt in der Entwicklung eines geeigneten Verfahrens, welches kooperativ gewonnene Messgrößen bzw. die mobil erfasste Daten nutzt, um die Koordination von Lichtsignalanlagen zu bewerten. Hierbei ist zunächst ein kooperativer Lösungsansatz zu erarbeiten, welcher den Anforderungen beider Kooperationspartner gerecht wird. Einerseits sind die Fahrerassistenzfunktionen mit den jeweils benötigten Infrastrukturdaten zu versorgen und andererseits sind geeignete fahrzeuggenerierte Daten zur Qualitätsanalyse von Lichtsignalanlagen zur Verfügung zu stellen. Der zu entwickelnde Lösungsansatz soll außerdem der langwierigen System Einführung entgegenwirken, indem der Aufwand für die Einführung des Systems möglichst gering gehalten wird und sich gleichzeitig ein hoher Nutzen für beide Partner ergibt. Um der Arbeit einen gewissen Praxisbezug zu verleihen, sollen sowohl die Fehlerquellen als auch die Herausforderungen der technischen Umsetzung des vorgestellten Systems erläutert und diskutiert werden.

Die meisten etablierten Bewertungsansätze zur Qualitätsanalyse von koordinierten Lichtsignalsteuerungen beziehen sich auf Kenngrößen des tatsächlich existierenden Verkehrsgeschehens. Da hier die Wirksamkeit einer Koordination also indirekt über den echten Verkehr beurteilt wird, sind auch die Wirkungen der Fahrerbeeinflussung infolge der Bereitstellung von Fahrerinformationen in die Untersuchung einzubeziehen. Die Analyse der verkehrlichen Wirkung soll unter Anwendung einer Simulationsumgebung erfolgen. Das hierfür zu entwickelnde Simulationsmodell muss das Fahrzeugverhalten infolge der Fahrerassistenzen realitätsnah abbilden. Mit den Erkenntnissen aus der Wirkungsanalyse ist in einem nächsten Schritt das Potenzial der mobil erfassten Daten zur Qualitätsanalyse

von Koordinierungen zu erforschen. An dieser Stelle soll auch überprüft werden, ob und inwiefern sich die mobil erfassten Daten als Eingangsgrößen für die Bewertungsverfahren der einschlägigen Regelwerke eignen.

Die Arbeit hat den Anspruch ein Bewertungsverfahren zu entwickeln, welches auch bei geringer Marktdurchdringung des zugrunde liegenden kooperativen Systems die Koordinierung hinreichend genau beurteilen kann. Um dem genannten "Henne-Ei-Problem" entgegenzuwirken, soll das zu entwickelnde Verfahren bei bereits geringen Ausstattungsraten einsatzfähig sein und aussagekräftige Ergebnisse liefern.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich neben der Einführung in sieben weitere Kapitel auf. Im zweiten Kapitel werden grundlegende Begriffe eingeführt und der Stand der Technik über die Signalisierung urbaner Straßennetze aufgezeigt. Dabei werden zunächst unterschiedliche Qualitätsdefinitionen erörtert, um darauf aufbauend einen Bezug zum Straßenverkehr herzustellen. Weiterhin werden die Ziele, Grundbegriffe und Bewertungsansätze der Lichtsignalsteuerung diskutiert. Hierbei liegt das Hauptaugenmerk auf den bestehenden Verfahren zur Planung und Bewertung von koordinierten LSA.

Das Kapitel 3 beleuchtet die Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der kooperativen Systeme mit dem Ziel, den Entwicklungsstand und die Funktionsweisen verschiedener Ansätze herauszustellen. Neben den allgemeingültigen Grundlagen zu den kooperativen Systemen folgt eine Zusammenstellung von bisherigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im europäischen sowie im deutschsprachigen Raum.

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen der Lichtsignalsteuerung und auf dem Stand der bislang erforschten telematischen Anwendungen wird im vierten Kapitel ein weiterer zentralenbasierter kooperativer Lösungsansatz für den urbanen Straßenraum vorgestellt. Hierbei werden die Voraussetzungen und die Herausforderungen der technischen Umsetzung des vorgestellten Systems erläutert und diskutiert. Darüber hinaus werden kooperative Fahrerassistenzfunktionen vorgestellt, die als Ergebnis eigener Forschungs- und Entwicklungsarbeiten entstanden.

Bisherige Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass vergleichbare LSA-bezogene Fahrerassistenzfunktionen einen erheblichen Einfluss auf den Verkehrsablauf haben können. Da dies möglicherweise auch in die Bewertung einer Koordinierung mit richtlinienkonformen Verfahren einfließt, werden im fünften Kapitel die Wirkungen der Fahrerbeeinflussung auf den Verkehrsablauf der gesamten Strecke analysiert. Hierzu werden wesentliche Aspekte der Fahrerbeeinflussung aufgegriffen und relevante Teilfunktionen der entsprechenden Assistenten in mikroskopischen Verkehrssimulationen implementiert.

Das Kapitel 6 widmet sich der Qualitätsbewertung koordinierter Streckenzüge unter Berücksichtigung der kooperativ gewonnenen Messgrößen. Es wird untersucht, wie die mobil erfassten Daten aufgebaut sein müssen, wie daraus verkehrliche Kenngrößen zu ermitteln sind und inwiefern etablierte Bewertungsverfahren angewendet werden können. Die Untersuchung wird auf den simulativ gewonnenen Erkenntnissen der verkehrlichen Wirkungsanalyse aufgebaut.

Im vorletzten Kapitel wird ein Bewertungsverfahren zur Qualitätseinschätzung von LSA-Koordinierungen entwickelt, welches in erster Linie auf das zugrunde liegende kooperative System zugeschnitten ist. Das Verfahren greift im Gegensatz zu den bestehenden Methoden mehrere Bewertungskenngrößen auf und berücksichtigt den veränderten Verkehrsablauf infolge der Fahrerbeeinflussung. Das Verfahren wird auf Basis der Simulationsdatensätze entwickelt und getestet.

Die Arbeit schließt in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung der wesentlichsten Erkenntnisse, der Erörterung des weiteren Forschungsbedarfs und mit einem Fazit ab.

2 Grundlagen

2.1 Vorbemerkungen

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die Entwicklung eines Verfahrens zur Qualitätsbewertung koordinierter Signalsteuerungen unter Verwendung kooperativ gewonnener Messgrößen. Dies verlangt ein einheitliches Verständnis der Begrifflichkeiten, grundlegende Kenntnisse über die Signalisierung urbaner Straßennetze und die im Kontext stehenden verkehrlichen sowie steuerungstechnischen Zusammenhänge. Im Folgenden werden zunächst unterschiedliche Qualitätsdefinitionen erörtert, um darauf aufbauend einen Bezug zum Straßenverkehr herzustellen. Neben einem kurzen Exkurs zur Entstehung des signalisierten Straßennetzes werden in diesem Kapitel die Ziele, die Grundbegriffe und die Bewertung der Lichtsignalsteuerung eindeutig definiert. Weiterhin werden die Grundsätze sowie die Verfahren zur Planung und Bewertung von LSA erörtert. Hierbei wird das Hauptaugenmerk auf die koordinierte Signalisierung von Streckenzügen gelegt.

2.2 Qualität

2.2.1 Allgemeiner Qualitätsbegriff

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff "Qualität" vielfach in unterschiedlichen Kontexten verwendet. Das Wort wird in der Regel für eine positive Reputation benutzt. Daher wird es gerne mit anderen Begriffen verknüpft oder stellt repräsentativ einen "Gegenstand mit guter Eigenschaft" dar. So werden beispielsweise häufig Begriffe wie Lebensqualität, Qualitätsprodukt und Phrasen wie "Qualität hat ihren Preis" verwendet. Der Begriff leitet sich jedoch vom lateinischen Wort "*qualis*", d. h. wie beschaffen, ab und ist somit gewissermaßen wertneutral. Im Allgemeinen wird mit ihm die Charakterisierung einer Sache oder einer Leistung hinsichtlich relevanter Größen beschrieben [BRÜGGMANN / BREMER-2011].

In der Vergangenheit wurde schon mehrfach versucht, den Begriff "Qualität" zu definieren. Die Begriffsbestimmungen basierten auf verschiedenen Ansätzen, welche von individuellen Vorstellungen zum Sinngehalt geprägt waren. Einer der bedeutendsten Geschäftsphilosophen und wohl bekanntesten Vertreter von Qualitätskonzepten definierte Qualität

als *“conformance to requirements“* und setzt es somit der Erfüllung von Anforderungen bzw. der Nutzbarkeit für einen spezifischen Zweck gleich [CROSBY-1979]. Juran definierte Qualität als Nutzbarkeit für einen bestimmten Gebrauchszweck bzw. Funktionstüchtigkeit, indem er den Begriff *“fitness for use“* prägte [JURAN-1988]. Allen diesen Definitionen liegt eine Vergleichbarkeit des Nutzens zu Grunde und hat somit eine starke Produkt- und Kundenorientierung [ZINGEL-2005].

2.2.2 Technische Definition

In technischen Bereichen wird die Qualität rein nach den zu erfüllenden Anforderungen beurteilt. Das Urteil basiert demnach nicht wie beim allgemeinen bzw. umgangssprachlichen Qualitätsbegriff auf der Gegenüberstellung eines Produktes mit einer gedachten optimalen Beschaffenheit eines anderen vergleichbaren Objektes. Qualität bezeichnet vielmehr die *“realisierte Beschaffenheit einer Einheit bezüglich der Qualitätsanforderung“*. So umschrieb [GEIGER-2001] die von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) eingeführte Qualitätsdefinition. Zur einheitlichen Verwendung auf länderübergreifender Ebene wurde hier die Qualität als *“Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt wird“* definiert [DIN EN ISO 9000]. *“Inhärent“* bedeutet *“einer Einheit innewohnend“*. Anders als bei den anhaftenden Merkmalen wie Kosten oder Preise versteht sich ein inhärentes Merkmal als eine ständige Beschaffenheit einer Einheit. Der Begriff *“Einheit“* wird in diesen Beschreibungen als das Bezugsobjekt bezeichnet. Gemäß DIN 55350-11 sind alle materiellen und immateriellen Gegenstände in die Betrachtung einbezogen. Ausgehend von dieser Definition kann eine Einheit ein Prozess, ein Produkt, eine Tätigkeit, eine Organisation, eine Person oder ein System sein.

Wie die Definitionen zeigen, ist aus technischer Sicht eine geforderte Qualität unbekannt. Die Forderung bezieht sich vielmehr auf die Erfüllung der vorab gestellten Ansprüche (Abbildung 2.1). Die Beurteilung der Erfüllung führt dazu, dass die Qualität als das *“Maß der Güte einer Leistung“* angesehen werden kann [BRUHN-2007]. Durch die häufig durchgeführte Kategorisierung in verschiedenen Klassen (bspw. *“gut“*, *“mittel“*, *“schlecht“*) wird deutlich, dass die technische Qualitätsangabe wie im umgangssprachlichen Gebrauch eine Bewertung enthält. Der entscheidende Unterschied liegt allerdings darin, dass nach dem technischen Verständnis keine Gegenüberstellung mit anderen Einheiten erfolgt, sondern die Qualität aufgrund der konkret gestellten Anforderungen ermittelt wird [HESS-2007].

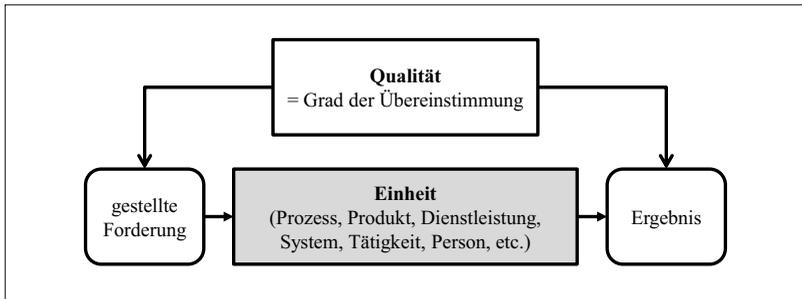


Abbildung 2.1: *Qualität als Grad der Übereinstimmung*¹

Wie Abbildung 2.1 verdeutlicht, beschreibt die Qualität die Übereinstimmung (Konformität) einer Einheit mit vorgegebenen Forderungen [BRÜGGEMANN / BREMER-2011]. Eine mangelnde Qualität im Sinne der Umgangssprache kann eine optimale Qualität im Sinne der technischen Definition sein [HESS-2007].

2.2.3 Qualitätsbegriffe aus unterschiedlichen Perspektiven

Eine weitere Differenzierung des Qualitätsbegriffes bietet die Unterscheidung nach verschiedenen Perspektiven. Es kann zwischen der

- transzenten,
- produktbezogenen,
- anwenderbezogenen,
- prozessbezogenen und
- Preis-Nutzen-bezogenen

Sichtweise unterschieden werden [GARVIN-1984]. Der Leistungsempfänger wie bspw. der Kunde versteht unter Qualität in der Regel den produkt- oder anwenderbezogenen Ansatz. Aus produktbezogener Perspektive ist Qualität präzise und messbar. Qualitätsunterschiede werden durch Differenzen von Eigenschaften hervorgerufen, die für das Ergebnis charakteristisch sind. Dieser Definition liegt eine gewisse Objektivität zugrunde. Eine subjektive Beurteilung durch den Leistungsempfänger spiegelt den anwenderbezogenen Ansatz wider. Hier zeichnet sich eine hohe Qualität durch die Erfüllung spezifischer Anforderung des Leistungsempfängers aus. Leistungserbringer wie bspw. die Dienstleistungsanbieter orientieren sich dagegen vielmehr am prozessbezogenen Ansatz. Denn hier steht der Entstehungsprozess im Fokus, wobei die Einhaltung bestimmter Spezifikationen

¹ in Anlehnung an [GEIGER / KOTTE-2007]

geprüft wird. Jede Abweichung von der Spezifikation hat eine Qualitätsminderung zur Folge [WERNER-2010].

2.2.4 Qualitätsdefinition im Verkehrswesen

Im Zuge des zunehmenden Wettbewerbs- und Kostendrucks sowie der steigenden Forderung nach entsprechenden Standards ist auch das Qualitätsbewusstsein im Bereich des Verkehrswesen gewachsen. Die in [GARVIN-1984] vorgeschlagene differenzierte Betrachtung wird hier durch das unterschiedliche Qualitätsverständnis besonders deutlich: Während Leistungsempfänger die Qualität gemeinhin subjektiv und ergebnisorientiert bewerten, neigen Leistungserbringer eher zu einer prozessorientierten und technischen Bewertung. So fließen beim Verkehrsteilnehmer bspw. die Fahrtzeit und der Komfort in die Bewertung ein. Der Betreiber hingegen beurteilt die Qualität nach anderen Kriterien wie bspw. Auslastungsgrade, Prozess- sowie Betriebsabläufe [EICHMANN et al.-2005]. Diese Problematik wurde zuerst im Bereich des Öffentlichen Verkehrs (ÖV) normativ aufgegriffen. Auf europäischer Ebene wurde im Jahre 2002 hier die DIN EN 13816 eingeführt. Ziel war insbesondere die Qualität von Leistungen im ÖV festzulegen und eine Auswahl entsprechender Messmethoden vorzuschlagen. Die Norm stellt eine Empfehlung dar und erklärt ihre Anwendung zum Erreichen der Qualitätsziele *“unter Umständen für sinnvoll“* [DIN EN 13816]. Die oben genannte Relation zwischen dem Erbringer und dem Empfänger einer Leistung wurde hier im Qualitätskreis für eine Dienstleistung (siehe Anhang A) verdeutlicht. In dem Konzept werden vier unterschiedliche Sichtweisen integriert:

- vom Kunden erwartete Qualität,
- vom Kunden wahrgenommene Qualität,
- vom Anbieter angestrebte Qualität,
- vom Anbieter tatsächlich erbrachte Qualität.

Der für den ÖV konkretisierte Ansatz zeigt, dass das Verständnis von Qualität stark unterschiedlich ausgeprägt ist. Aus weiteren Untersuchungen geht hervor, dass dieser Qualitätskreis nicht nur für allgemeine Dienstleistungen zutrifft, sondern auch auf den Individualverkehr (IV) adaptierbar ist [REUSSWIG-2005]. Wie beim ÖV stehen sich die vier Sichtweisen auch beim IV gegenüber. Das kontroverse Qualitätsverständnis, das durch unterschiedliche Auffassungen von Verkehrsteilnehmern und Verkehrsbetreibern hervorgerufen wird, veranschaulicht der in Abbildung 2.2 dargestellte Qualitätskreis. Die unterschiedlichen Komponenten dienen beim Durchlaufen des Qualitätskreises gegenseitig als Maßstab. Der Idealzustand tritt ein, wenn die jeweiligen Anforderungsniveaus des Vorgängers erfüllt werden.

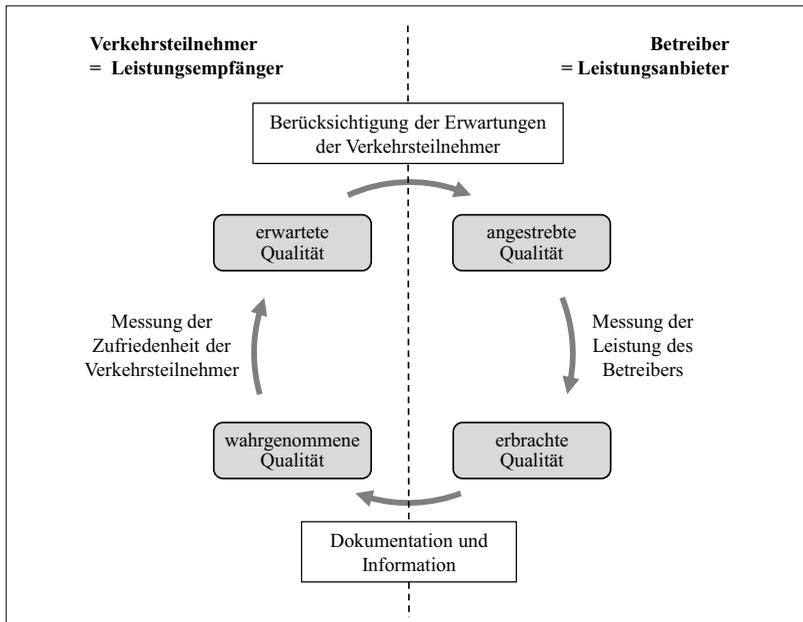


Abbildung 2.2: Qualitätskreis im Verkehrswesen²

2.3 Signalisierung im Straßennetz

2.3.1 Entwicklung

Der innerstädtische Verkehr heutigen Charakters hat seinen Ursprung in der Industrialisierung im 19. Jahrhundert. Nicht zuletzt durch die zunehmende Entwicklung neuer Transportmittel erfreuten sich die Städte eines enormen Wachstums. Schienen-Pferdebahnen, Dampfomnibusse und -lokomotiven sowie Lauf-, Hoch- und Fahrräder prägten das damalige Verkehrsgeschehen. Binnen kurzer Zeit wuchsen die Städte über ihre Grenzen hinaus, weil die Einwohnerzahlen vieler Ortschaften rasch anstiegen. Die territoriale Ausdehnung und die räumliche Trennung der innerstädtischen Funktionen erforderten leistungsfähige Verkehrsmittel. Durch die Errichtung öffentlicher Personenverkehrssysteme konnte zunächst ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Stadtgröße und des Verkehrsflächenbedarfs hergestellt werden [SCHNABEL / LOHSE-2011]. Erst mit dem plötzlichen Aufkommen individueller und schnellerer Transportmittel kamen die zur Verfügung stehende

² in Anlehnung an [BOLTZE-2005]

multifunktionalen Straßen bzw. Wege mit den bisherigen Gewohnheiten und Vorschriften schnell an ihre Kapazitätsgrenze. Aus diesem Grund wurden neben einer speziellen Straßenverkehrsordnung mit der Zeit technische Einrichtungen zur Regelung, Steuerung und Organisation des Verkehrs eingeführt. Die erste Signalanlage wurde bereits 1868 in London vor dem Parlamentsgebäude in Betrieb genommen. Eine Explosion der gasbetriebenen Lampen brachte den Einsatz des Signalgebers jedoch nach kurzer Betriebsdauer für lange Zeit zum Erliegen [VON STEIN-1969].

Dank der Bereitstellung von elektrischem Strom für die Beleuchtungen in der Öffentlichkeit erlebte die Signalanlage 55 Jahre später ihre Wiedergeburt. Im Jahre 1913 wurden in der US-Stadt Cleveland die ersten elektrischen Lichtsignale für den Kraftfahrzeugverkehr eingeführt. Durch die zunehmende Motorisierung von Personenkraftwagen breitete sich der Gedanke der LSA schnell aus. Schon vier Jahre nach der Einführung des elektrischen Signalgebers wurde in Salt Lake City eine Koordinierung über mehrere signalisierte Knotenpunkte realisiert. Diese Vorgehensweise ermöglichte, dass Fahrzeuge gebündelt und ohne Halt über eine Mehrzahl aufeinanderfolgenden Knotenpunkte geführt werden konnten. Die Koordinierung basierte zunächst auf einer einfachen Simultanschaltung, bei der alle Signalgeber der entsprechenden Richtung gleichzeitig auf "Grün" bzw. "Rot" schalteten. Ab dem Jahre 1926 wurde die sogenannte Progressivsteuerung in vielen amerikanischen Städten eingeführt. Die Signalisierung wurde dahingehend verändert, dass erst beim Eintreffen eines Pulks freigegeben wurde. Tatsächlich wurde diese besondere Art der Steuerung "zufällig entdeckt". Wichtige Knotenpunkte auf den Hauptstraßen wurden durch Polizisten geregelt, die bald merkten, dass sie durch Abstimmung untereinander den Verkehr flüssiger gestalteten. Damit die Polizisten die Zeichen benachbarter Knotenpunkte besser erkennen konnten, wurden Lichtsignale eingesetzt. Dieses System ging als "Grüne Welle" in die Signalgeschichte ein [MCSHANE-1999].

2.3.2 Ziele der Verkehrssteuerung mittels Lichtsignalanlagen

Der Einsatz von LSA wird u. a. mit der Erhöhung der Verkehrssicherheit begründet, welche durch die zeitliche Trennung von im Konflikt stehenden Verkehrsströmen gewährleistet ist. Trotz der unumgänglichen Entstehung von Wartezeiten tragen LSA auch zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten sowie zur Qualitätssteigerung des Verkehrsablaufes bei. Daher finden sie sich überwiegend im städtischen Raum wieder. Die Ziele einer konkreten Lichtsignalsteuerung ergeben sich jeweils aus den Wünschen, Interessen und Anforderungen einzelner Verkehrsteilnehmergruppen, betroffener Anwohner sowie insbesondere aus verkehrspolitischen Vorgaben. Die Erwartungen sind in der Regel nicht deckungsgleich, so dass Zielkonflikte zwischen konkurrierenden Nutzergruppen entstehen. Die Bevorrechtigung des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) kann sich

bspw. negativ auf die Reduzierung der Gesamtwartzeit aller Verkehrsteilnehmer auswirken. Die Zielkonflikte sind im Planungsprozess zu berücksichtigen und durch entsprechende Maßnahmen in der LSA-Steuerung zu minimieren. Aus verkehrlicher Sicht sind unter Berücksichtigung vielfältiger Randbedingung die Kapazitäten von Knotenpunkten zu erhöhen und die Qualität des Verkehrsablaufes zu verbessern. Um den zusätzlichen Nutzen kooperativ gewonnener Messgrößen zur Qualitätsbewertung und -überwachung der Signalisierung angemessen beschreiben zu können, wird im nächsten Abschnitt die Klassifizierung der unterschiedlichen Steuerungsverfahren nach den Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) aufgegriffen.

2.3.3 Steuerungsverfahren der Signalisierung

In den RiLSA wird grundsätzlich zwischen der verkehrsabhängig und der festzeitgesteuerten Signalisierung unterschieden [FGSV-2010]. Im Laufe der Entwicklung haben sich verschiedene Ansätze gebildet. In der Literatur werden durchaus unterschiedliche Begriffe für gleichartige Verfahren verwendet. Aufbauend auf einer weiterführenden Beschreibung der Steuerungsverfahren werden in diesen Abschnitt die Begrifflichkeiten in einen einheitlichen Kontext gebracht.

Festzeitsteuerung

Der festzeitgesteuerten Signalisierung liegt ein Signalprogramm mit unveränderlichen Schaltzeitpunkten zugrunde. Dies impliziert, dass sich die Signalprogrammelemente wie Umlaufzeit, Phasenreihenfolge, Frei- und Sperrzeiten periodisch in gleicher Weise in jedem Zyklus wiederholen. Das Festzeitprogramm wird in der Planungsphase auf der Grundlage historischer Daten bspw. aus Verkehrserhebungen erstellt. Hierbei werden die Freigabezeiten so bemessen, dass bestenfalls alle Verkehrsteilnehmer während der Spitzenbelastung innerhalb der Umlaufzeit den Knotenpunkt passieren können. Die Vorteile der Festzeitsteuerung liegen in der guten Planbarkeit und der relativ einfachen Kontrollmöglichkeit. Aus diesem Grund finden sie sich auch häufig in Netz- und Linienkoordinierungen wieder und werden als Basis zur Erstellung von verkehrsabhängigen Steuerungen genutzt. Die Festzeitsteuerung hat den Nachteil, dass kurzfristige Schwankungen des Verkehrsgeschehens infolge nicht durchgeführter Verkehrsdatenerfassung über Detektoren unberücksichtigt bleiben. Aufgrund des unveränderlichen Ablaufes des Signalprogrammes können vermeidbare Verlustzeiten entstehen.

Regelbasierte verkehrsabhängige Steuerung

Aufgrund der genannten Nachteile der Festzeitsteuerung wurden Steuerungsverfahren entwickelt, welche die aktuelle Verkehrssituation kurzfristig berücksichtigen können. Durch die Erfassung des Verkehrsgeschehens über stationäre Detektoren konnte die

Signalisierung nunmehr auf gegenwärtige Verkehrssituationen reagieren. Diese erste Generation der verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren wurde in der Literatur durch den direkten Bezug einer hinterlegten Steuerungslogik zu den erfassten Kenngrößen oft auch als messwertbasiertes Verfahren bezeichnet [FRIEDRICH-1999; GANSER-2003; KOBBELOER-2007]. Die regelbasierte verkehrsabhängige Steuerung folgt einer Ablauflogik, welche sekundlich "abgearbeitet" wird. In der Steuerungslogik sind Entscheidungs- und Aktionselemente miteinander verknüpft. Wie der linke Teil der Abbildung 2.3 verdeutlicht, werden auf Grundlage der gemessenen Verkehrskenngrößen und der Abfrage logischer, zeitlicher und den Zustand betreffender Bedingungen entsprechende Schaltbefehle ausgeführt. Durch die Beobachtung des Verkehrs in der Zufahrt werden bspw. Entscheidungen zur Verkürzung bzw. Verlängerung von Freigabezeiten getroffen. Bei Anmeldung von ÖPNV-Fahrzeugen ist es möglich, Phasen zu tauschen oder Bedarfsphasen anzufordern. Neben den genannten Kriterien können weitere Einzelanmeldungen anderer Verkehrsteilnehmer oder das Unter- bzw. Überschreiten festgelegter Grenzwerte von Zeitlücken, von Verkehrsstärken, von Belegungszeiten sowie von Geschwindigkeiten als logische Bedingung für den Phasenwechsel verwendet werden.

Über die Jahre hat sich die regelbasierte verkehrsabhängige Steuerung als verlässlicher Ansatz bewährt und wird heute in der Praxis schwerpunktmäßig eingesetzt. Das zugrunde liegende Steuerungsverfahren ist dabei sehr stark von den persönlichen Fähigkeiten und vom individuellen Stil des Planers der Lichtsignalsteuerung geprägt. Die Steuerungen sind in ihrem Aufbau und in ihrer Wirkung daher schwer klassifizierbar [WIETHOLT-2009]. Eine Online-Optimierung der Steuerung kann aufgrund der unterlassenen Wirkungsanalyse ebenfalls nicht durchgeführt werden. Aus diesem Grund beschränken sich die regelbasierten verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren auf den Ausgleich kurzfristiger Schwankungen im Verkehrsablauf und auf die Reaktion aktueller Anforderungen [FRIEDRICH-1999].

Die regelbasierten verkehrsabhängigen Steuerungen haben den Nachteil, dass sie gerade in Zeiten hoher Verkehrsnachfragen an ihre Grenzen stoßen und sich die Signalisierung immer mehr der Festzeitsteuerung annähert [BRETHERTON / RAI-1982; BRILON / GROSSMANN / BLANKE-1994; FRIEDRICH-2000; MÜCK-2002]. Dem steht entgegen, dass selbst eine *"[...] maximale Grenzbelastung aller Verkehrsströme an einem Knotenpunkt weder theoretisch noch praktisch existiert. Auch eine konstante Zuflussmenge in einer Zufahrt verteilt sich in jedem Umlauf zufällig auf die Anteile der verschiedenen Fahrrichtungen"* [BOSSERHOFF / NOVOTNY-2007]. Im Vergleich zu den nachfolgend beschriebenen modellbasierten Steuerungsverfahren besteht der Vorteil im geringeren Bedarf an Rechnerressourcen, in der besseren Implementierbarkeit in weniger leistungsfähige LSA-Steuergeräte und in der schnelleren Reaktionszeit, welche insbesondere für die ÖV-Priorisierung zweckmäßig ist [MERTZ-2001].

Modellbasierte verkehrsabhängige Steuerung

Im Gegensatz zur regelbasierten Umsetzung der verkehrsabhängigen Signalisierung werden bei den modellbasierten Verfahren die Auswirkungen des aktuellen und des zukünftigen Steuerungsverhaltens auf den Verkehrsablauf ermittelt. Hierbei wird eine Modellrechnung durchgeführt, die unter Verwendung netzweit erfasster Verkehrskenngrößen eine permanente Optimierung der Signalzeitenpläne versucht. In der rechten Hälfte der Abbildung 2.3 sind die Komponenten und die Funktionsweise dargestellt. Ausgehend von einer Kenngrößenerfassung wird schritthaltend eine Zustandsanalyse sowie eine Kurzzeitprognose über den Verkehrsablauf erstellt. Die Ergebnisse gehen kontinuierlich in ein Verkehrsflussmodell ein, wo sie zusammen mit Detektorsignalen wie etwa auch Anforderungen weiterverarbeitet werden. Innerhalb des Wirkungsmodells werden die Auswirkungen verschiedener Steuerungsmöglichkeiten ermittelt. Im Steuerungsmodell werden valide Steuerungsvarianten erzeugt, mithilfe eines entsprechenden Algorithmus optimiert und anschließend Schaltbefehle generiert. Durch diesen Optimierungszyklus können im Rahmen der Verfahrensgrenzen bestmögliche Signalzeiten für die jeweils aktuelle und zukünftige Verkehrssituation ermittelt werden.

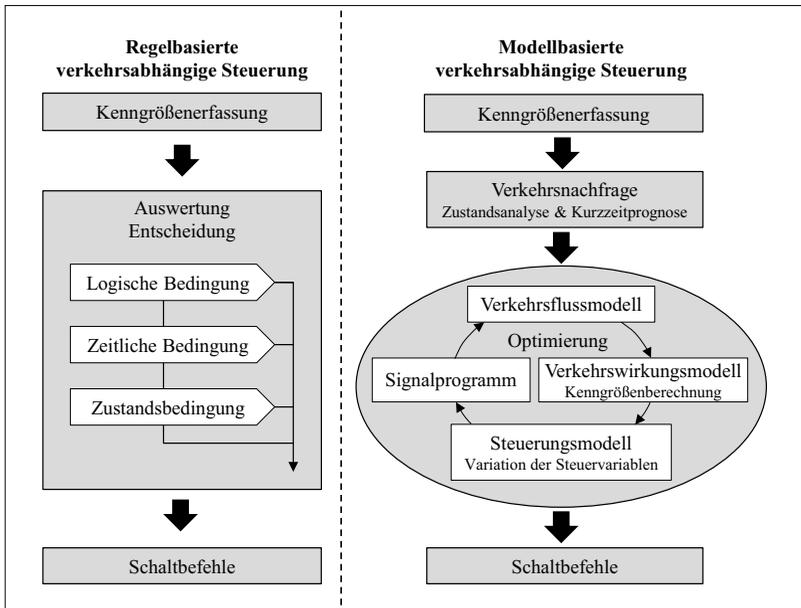


Abbildung 2.3: Verkehrsabhängige Steuerungsverfahren³

³ in Anlehnung an [FGSV-2010]

Die modellbasierten Verfahren verwenden Echtzeitdaten, um die Signalzeitenpläne für einen Straßenzug oder ein Straßennetz zu optimieren. Eine im Programm hinterlegte Funktion formuliert dabei ein bzw. mehrere Ziele wie die Minimierung der Wartezeiten, der Anzahl der Halte, der Staulängen oder der Reisezeiten. Die sich daraus ergebende Zielfunktion kann durch die Gewichtung der genannten Bewertungskenngrößen für die jeweilige Verkehrsteilnehmergruppe definiert werden, womit sich auch verkehrspolitische Vorgaben mit vertretbarem Aufwand funktional umsetzen lassen. Ein weiteres Potenzial besteht in einer a priori durchführbaren Wirkungsanalyse, welche mithilfe einer Simulation der strategischen Ziele realisiert werden kann [KELLER et al.-2002].

2.3.4 Steuerungsebenen der Signalisierung

Neben der Klassifizierung nach dem Steuerungsverfahren lässt sich die Signalisierung in zwei verschiedene Steuerungsebenen einordnen. In den RiLSA wird dabei zwischen der makroskopischen und der mikroskopischen Steuerungsebene unterschieden [FGSV-2010]. Die Verfahren der makroskopischen Ebene berücksichtigen längerfristige Belastungsänderungen im Straßennetz. Sie reagieren auf kollektive bzw. aggregierte Verkehrskenngrößen wie bspw. die mittlere Verkehrsstärke und die durchschnittliche Staulänge. Folglich werden die Eigenschaften von Verkehrsströmen einbezogen. Bei Erreichen vordefinierter Grenzwerte werden entsprechende Änderungen in der Signalisierung vorgenommen, welche über einen längeren Zeitraum Bestand haben. Die Verfahren der mikroskopischen Ebene sind vornehmlich auf eine Betrachtung des Einzelknotens ausgerichtet. Hierbei werden kurzfristige Veränderungen der Verkehrssituation berücksichtigt. Die Reaktionszeit liegt innerhalb der Umlaufzeit, so dass auch stochastische Einzelergebnisse jeweiliger Verkehrsarten wie ÖPNV- und Fußgängeranforderungen verarbeitet werden können.

Weiterhin ist eine Klassifizierung in eine strategische, eine taktische und eine lokale Steuerungsebene möglich [FRIEDRICH-1999]. In der strategischen Ebene werden die Vorgaben übergeordneter verkehrspolitischer Ziele über eine Zielfunktion für das Gesamtnetz berücksichtigt. Innerhalb der taktischen Ebene soll das aktuelle Verkehrsgeschehen entsprechend der Zielfunktion für ein Teilnetz optimal gesteuert werden. Die lokale Ebene reagiert auf Schwankungen im Verkehrsablauf und auf stochastisch eintretender Ereignisse am Knotenpunkt.

2.3.5 Gegenüberstellung der Steuerungsverfahren

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den Steuerungsverfahren bestehen in der Verwendung und im Umfang benötigter Verkehrsdaten sowie von Verkehrsmodellen, in der Art der Steuerung verschiedener Verkehrsströme, im Grad der Beeinflussbarkeit und in

der Veränderbarkeit der Signalprogrammelemente, zu denen u. a. die Umlaufzeit und die Phasenfolge zählen. Die in Abschnitt 2.3.3 erwähnten Vor- und Nachteile sind allgemein für die mikroskopische Ebene gültig. Ergänzende Aussagen für die makroskopische Ebene liefern die Hinweise für die Lichtsignalsteuerung in Straßennetzen [FGSV-2014], welche vorrangig zur Entscheidungsfindung für ein bestimmtes Netzsteuerungsverfahren dienen soll. Aus Sicht der Autoren sind die Netzsteuerungsverfahren als Teil der makroskopischen Steuerungsebene anzusehen. Neben den Einsatzempfehlungen werden Hinweise zur bedarfsgerechten Planung, zum nachhaltigem Betrieb und zur effizienten Pflege gegeben. In Tabelle 2.1 sind die aus Untersuchungen und Praxiserfahrungen abgeleiteten Einsatzempfehlungen von Steuerungsverfahren hinsichtlich unterschiedlicher Auslastungsgrade und Vorhersehbarkeiten dargestellt. Die Vorhersehbarkeit bezieht sich auf kurzfristige Schwankungen der Verkehrsstärke. Eine hohe Vorhersehbarkeit ist vorhanden, wenn sich die Verkehrsstärke größtenteils im Rahmen von bekannten Tagesganglinien bewegt. Findet sich die Veränderung der Verkehrsstärke nicht in charakteristischen Belastungssituationen oder Tagesganglinien wieder, ist eine niedrige Vorhersehbarkeit gegeben [FGSV-2014].

Tabelle 2.1: Einsatzempfehlung von Steuerungsverfahren auf makroskopischer Ebene⁴

Auslastungs- grad	Vorherseh- barkeit	Festzeit- steuerung	Verkehrsunabhängige Steuerung	
			regelbasiert	modellbasiert
gering	hoch	+	+	+
gering	niedrig	-	+	+
mittel	hoch	+	+	+
mittel	niedrig	-	0	+
hoch	hoch	0	+	+
hoch	niedrig	-	-	0

+ gut geeignet

0 mit Einschränkungen geeignet

- nicht geeignet

Anhand verschiedener Untersuchungen und vorliegender Praxiserfahrungen wurde abgeleitet, dass sich geringe Verkehrsbelastungen mit minimalen kurzfristigen Schwankungen grundsätzlich mit jeder gut eingestellten Steuerung zufriedenstellend bedienen lassen [FGSV-2014]. Bei niedrigen Vorhersehbarkeiten kurzfristiger Schwankungen der Verkehrsstärke zeigen verkehrsunabhängige Steuerungen Vorteile gegenüber Festzeitsteuerungen. Dies wird umso deutlicher, je höher die Verkehrsstärke ist. Bei mittleren und höheren

⁴ in Anlehnung an [FGSV-2014], Erläuterungen zu den Begrifflichkeiten können im Anhang B eingesehen werden

Verkehrsstärken, welche starken Schwankungen unterliegen, können Festzeitsteuerungen nicht mehr alle Belastungsfälle abdecken. Hier bieten die verkehrsabhängigen Verfahren aufgrund der Möglichkeit zur kurzfristigen Berücksichtigung des Verkehrsablaufes eine wesentlich höhere Leistungsfähigkeit. Die modellbasierte Steuerung erzielt insbesondere bei mittleren Verkehrsstärken eine höhere Leistungsfähigkeit als die regelbasierte Steuerung [FGSV-2014].

Das Potenzial der modellbasierten Verfahren zur Verbesserung des Verkehrsablaufes ist in der Literatur weitgehend unumstritten. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass positive Auswirkungen durch den Einsatz modellbasierter Steuerungen nicht automatisch erreicht werden [BRILON / HOHMANN / GIULIANI-2013]. Der Erfolg setzt eine sehr gewissenhafte Planung sowie eine Berücksichtigung ortsspezifischer Gegebenheiten voraus. Im Gegensatz zu den regelbasierten Verfahren ist die Installation von modellbasierten Verkehrssteuerungen mit einem nicht unerheblich höheren Planungsaufwand verbunden, welcher zugleich einen hohen Erfahrungsschatz und eine hohe Sorgfalt erfordert. Die damit einhergehenden Kosten stehen mitunter nicht im angemessenen Verhältnis zum teilweise geringen oder kaum erkennbaren Mehrwert. Eine Umrüstung eines Straßenzuges oder Straßennetzes auf ein modellbasiertes System ist daher sorgfältig abzuwägen [BRILON / HOHMANN / GIULIANI-2013].

2.4 Koordinierung von Lichtsignalanlagen

2.4.1 Zielsetzung

Unter der Koordinierung von Lichtsignalanlagen wird die zeitliche Abstimmung der Freigabezeiten hintereinanderliegender Signalisierungsquerschnitte verstanden. Die Abstimmung der Freigabezeiten durch geeignete Zeitversätze soll bewirken, dass die Mehrzahl der betroffenen Kraftfahrer einen Streckzug mit mehreren signalisierten Knotenpunkten ohne Halt durchfahren kann [FGSV-2010]. Weitere Ziele der Koordinierung sind die Minimierung der Reisezeiten, eine Erhöhung des Fahrtkomforts und eine Verringerung des Energieverbrauchs sowie der Schadstoffemissionen. Die LSA-Koordinierung wird in der Praxis mit dem umgangssprachlich geprägten Begriff "Grüne Welle" in Zusammenhang gebracht. Die Begriffe werden von Laien und gelegentlich auch von Fachleuten gleichgesetzt, wobei sie streng genommen unterschiedliche Bedeutungen haben. Die Notwendigkeit der differenzierten Betrachtung ist vor allem durch die Einführung von kooperativen Systemen⁵ gestiegen und soll aus diesem Grund genauer beleuchtet werden. Das

⁵ Definiton siehe Kapitel 3

Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) liefert eine zu der Überlegung passende Definition [FGSV-2009]⁶: *“Werden in einem Straßenzug mehrere Knotenpunkte lichtsignalgesteuert betrieben, wird man die Freigabezeiten so aufeinander abstimmen, dass die Mehrzahl der Fahrzeuge bei Einhaltung einer bestimmten Geschwindigkeit den Straßenzug ohne Halt durchfahren kann (“Grüne Welle”).“* Infolge einer guten Koordinierung **kann** demnach eine Grüne Welle entstehen, die Fahrzeugpulks das Durchfahren eines Streckenzuges mit mehreren aufeinanderfolgenden LSA ohne Halt ermöglicht. Die Koordinierung ist daher als Ergebnis der Planung zu verstehen, welche zum Ziel hat, dass sich Grüne Wellen im Verkehrsablauf tatsächlich einstellen. Eine gut geplante und fehlerfrei umgesetzte Koordinierung kann einen positiven Effekt auf den Verkehrsablauf haben. Aus dieser Überlegung geht hervor, dass sich aus einer guten Planung nicht zwangsläufig auch eine Grüne Welle ergibt. Dies macht sich bspw. bei unerwarteten Störungen im Verkehrsablauf oder bei einer zu hohen Verkehrsbelastung bemerkbar. Bei einer entsprechenden Geschwindigkeitsanpassung der Kraftfahrer besteht die theoretische Möglichkeit, dass auch schlecht oder nicht koordinierte signalisierte Streckenzüge Grüne Wellen aufweisen können. Während der Betreiber bestrebt ist, eine gute Koordinierung zu realisieren, stellt die Beurteilung der Verkehrsteilnehmer eher die subjektive Empfindung des Verkehrsablaufes (= Grüne Welle) dar. Hier wird das in Abschnitt 2.2.4 diskutierte kontroverse Qualitätsverständnis deutlich. Unter den genannten Gesichtspunkten ist es unumgänglich, die Begrifflichkeiten insbesondere bei Qualitätseinschätzung differenziert zu betrachten.

2.4.2 Planung der Koordinierung

Grundsätzlicher Planungsablauf

Prinzipiell kann die Planung von koordinierten Steuerungen manuell durchgeführt werden. Nach der Überprüfung der Leistungsfähigkeit aller Einzelknotenpunkte wird zunächst eine einheitliche Umlaufzeit bestimmt, wobei in der Regel der Knotenpunkt mit der größten Belastung maßgebend ist. Die Umlaufzeit gibt dabei die maximale Dauer eines vollständigen Ablaufs eines Signalzeitenplans an. Anschließend werden die erforderlichen Freigabezeiten der Haupttrichtungen berechnet und deren Lage im Umlauf aufeinander abgestimmt. Maßgebende Faktoren zur Bestimmung des geeigneten Zeitversatzes sind die Abstände der Knotenpunkte sowie die angenommenen Geschwindigkeiten der Fahrzeugströme beider Fahrtrichtungen. Die zugrunde gelegte Geschwindigkeit ist eine planerische Größe und wird auch als Progressionsgeschwindigkeit bezeichnet. Die abgestimmten Grünzeiten (Freigabezeiten) werden ausgehend von dem am höchsten

⁶ Unmittelbar vor Einreichung der vorliegenden Arbeit wurde eine überarbeitete Auflage des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS-2015) [FGSV-2015] veröffentlicht. Der Arbeit liegt der Stand der Ausgabe 2001, Fassung 2009 zugrunde. Alle weiteren im Zusammenhang stehenden Angaben beziehen sich auf das HBS-2001 [FGSV-2009].

belasteten Knotenpunkt in ein Zeit-Weg-Diagramm (ZWD) übertragen. Daraus ergeben sich die zur Verfügung stehenden Freigabezeiten für querende Verkehrsströme, welche mit den erforderlichen Grünzeiten verglichen werden. Da die errechnete Freigabezeit für die Nebenrichtungen in den seltensten Fällen ausreichen, müssen diese unter einer relativ diffizilen Kompromissuche und -findung angepasst werden. Die Koordinierung von Lichtsignalanlagen ist daher mit komplexen Planungsprozessen verbunden. Insbesondere bei einer hohen Anzahl an zu berücksichtigenden Knotenpunkten ist eine Vielzahl von iterativ durchzuführenden Rückkopplungsschritten notwendig.

Grundgleichung der koordinierten Lichtsignalsteuerung

Als ein geeignetes Beschreibungsmittel zur Planung von LSA-Koordinierungen hat sich die Darstellung in ZWD gemäß Abbildung 2.4 herausgestellt. In diesem Diagramm wird der räumlich-zeitliche Verlauf der Grünzeiten über den Streckenzug verdeutlicht.

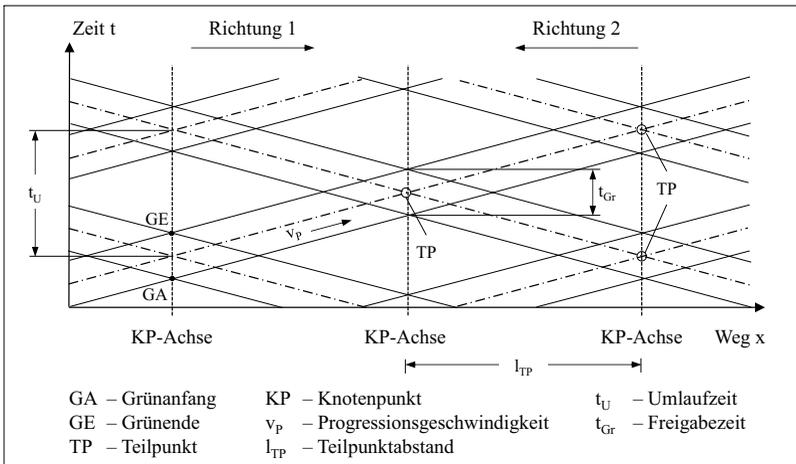


Abbildung 2.4: Koordinierung im Zeit-Weg-Diagramm

Die Abbildung 2.4 zeigt einen Idealfall, welcher in historisch gewachsenen, unregelmäßigen Straßennetzen wie bspw. in Deutschland kaum vorkommt. Hier werden neben der einheitlichen Umlaufzeit auch

- identische Knotenpunktabstände,
- gleiche Progressionsgeschwindigkeiten sowie
- einheitliche Freigabezeiten in beiden Richtungen an allen Knotenpunkten

vorausgesetzt. Ausgehend von der zugrunde gelegten Progressionsgeschwindigkeit v_P entstehen Grünbänder, deren vertikale Höhe der Freigabedauer am jeweiligen Knotenpunkt entspricht. Die orthogonal zur Abszissenachse verlaufende Höhe der Grünbänder wird auch als Grünbandbreite bezeichnet. Die Steigung der Mittellinie spiegelt die Progressionsgeschwindigkeit v_P wider, welche sich durch folgende Geschwindigkeitsbeziehung beschreiben lässt.

$$v_P = \frac{2 \cdot l_{TP}}{t_U} \quad (2.1)$$

mit:

v_P ... Progressionsgeschwindigkeit der jeweiligen Richtung [m/s]

t_U ... Umlaufzeit [s]

l_{TP} ... Teilpunktabstand [m]

Der Schnittpunkt der Mittellinien zweier gegenläufiger Grünbänder wird als Teilpunkt und der räumliche Abstand zwischen zwei Teilpunkten wird als Teilpunktabstand l_{TP} bezeichnet. Entspricht der Teilpunktabstand den Knotenpunktabständen, können die Grünbänder so verschoben werden, dass die Teilpunkte im Knotenpunktbereich wie in Abbildung 2.4 zum Liegen kommen. In diesem fiktiven Fall sind die zu vergebenden Freigabezeiten für den Querverkehr maximal. Durch die geometrischen Beziehungen im ZWD lässt sich die folgende Grundgleichung der Koordinierung entwickeln:

$$t_U = \frac{3,6 \cdot l_{TP} \cdot (v_{P,Ri1} + v_{P,Ri2})}{v_{P,Ri1} \cdot v_{P,Ri2}} \quad (2.2)$$

mit:

$v_{P,Ri1}, v_{P,Ri2}$... Progressionsgeschwindigkeit der jeweiligen Richtung [km/h]

Die Koordinierung wird zumeist für den Motorisierten Individualverkehr (MIV) konzipiert. Besonders langsameren Verkehrsteilnehmern wie Radfahrern oder Bussen ist es nicht möglich, mit der so geplanten Koordinierung über mehrere Signalisierungsquerschnitte ohne Halt zu fahren. Aus der Darstellung der Grünbänder im ZWD und der Grundgleichung geht hervor, dass noch weitere Wellen, sogenannte Oberwellen, existieren.

tieren (Abbildung 2.5). Allgemeingültig lässt sich die Progressionsgeschwindigkeit v_P weiterhin mit der Gleichung

$$v_P(n) = \frac{2 \cdot l_{TP}}{(2 \cdot n - 1) \cdot t_U} \quad (2.3)$$

angeben. Die Geschwindigkeit der Grundwelle (Primärwelle) wird mit $n = 1$ und die der ersten Oberwelle (Sekundärwelle) wird mit $n = 2$ berechnet. Die Sekundärwellen sind angesichts niedrigerer Geschwindigkeiten für den MIV weniger relevant. Aufgrund der Aufenthaltszeit bei Haltestellen und der damit einhergehenden niedrigeren Durchschnittsgeschwindigkeit können die Oberwellen jedoch eine wichtige Rolle für den ÖPNV spielen und sind ggf. auch für langsamere Verkehrsteilnehmer wie Radfahrer von Bedeutung.

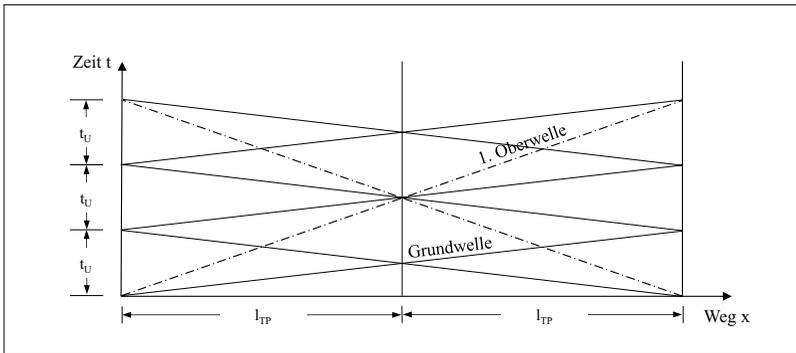


Abbildung 2.5: Grund- und Oberwellen

Verkehrstechnische Randbedingungen für die Dimensionierung

Bei der Planung von Koordinierungen sind zunächst knotenspezifische Umlaufzeiten nach der üblichen Vorgehensweise zu ermitteln. Die größte Umlaufzeit, welche sich in der Regel am Knotenpunkt mit der höchsten Belastung ergibt, stellt die maßgebende Mindestumlaufzeit der Koordinierung dar. Um sicherzustellen, dass sich die geplanten Grünen Wellen in jedem Umlauf wiederholen und dass der aufkommende Verkehr ohne Einschränkungen vollständig abgewickelt werden kann, ist die maßgebende Mindestumlaufzeit an allen LSA anzuwenden.

Die aus der Freigabedauer resultierende Grünbandbreite orientiert sich an der größten Fahrstreifenverkehrsstärke. Die ermittelte (Mindest-)Breite des Grünbandes sollte über den gesamten koordinierten Streckenzug nicht unterschritten werden. In [SCHNABEL /

LOHSE-2011] wird neben Berechnungsempfehlungen eine Mindestbreite von 15 s als Voraussetzung für die grundlegende Funktionstüchtigkeit der Koordinierung vorgegeben.

Zur Festlegung der Progressionsgeschwindigkeit v_P existieren verschiedene Ansätze. In den Regelwerken werden Bereiche zwischen 85 und 100 % [FGSV-2009] sowie 90 und 100 % [FGSV-2010] der zulässigen Höchstgeschwindigkeit vorgeschlagen. Der anzusetzende Faktor richtet sich dabei nach den gegebenen Randbedingungen, welche Auswirkungen auf die Fahrgeschwindigkeit haben. Hierzu zählen bspw. Schwerverkehrsanteile, Steigungen, Kurvenradien und Fahrbahnbeschaffenheiten. Bei bereits vorhandenen Streckenzügen empfiehlt es sich, die geeignete Progressionsgeschwindigkeit durch Messfahrten zu ermitteln. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Koordinierung von LSA auch bei Streckenzügen mit niedrigen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (bis minimal 30 km/h) zu empfehlen ist [SCHUSTER-1996].

Die Grenze der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit der Koordinierung liegt bei einem Auslastungsgrad von 85 % der maximalen Verkehrsstärke [FGSV-2010]. Laut HBS kann dieser Grenzwert in Ausnahmefällen auch 90 % betragen [FGSV-2009]. Bei Überschreitung dieser Werte kommt es selbst bei gut geplanten Koordinierungen zu Stauerscheinungen, so dass eine Fahrt ohne Halt nicht bzw. nur noch selten möglich ist.

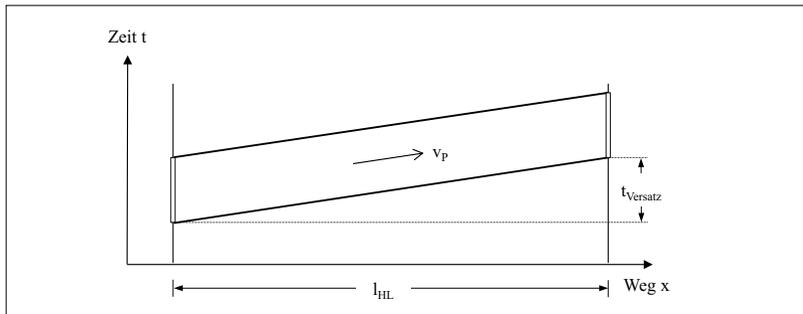


Abbildung 2.6: Versatzzeit

Bei der Errichtung einer koordinierten Steuerung ist die Lage der Freigabezeiten im Umlauf aufeinander abzustimmen. Die zeitliche Differenz zwischen den geplanten Grünanfängen benachbarter Signalisierungsquerschnitte wird als Versatzzeit $t_{Versatz}$ bezeichnet. Eine Darstellung im ZWD ist in Abbildung 2.6 gegeben. Die Versatzzeit berechnet sich aus der Progressionsgeschwindigkeit v_P und der Streckenlänge zwischen den Haltlinien l_{HL} mit der Gleichung 2.4.

$$t_{Versatz} = \frac{l_{HL}}{v_P} \quad (2.4)$$

mit:

$t_{Versatz}$... Versatzzeit [s]

l_{HL} ... Streckenlänge zwischen Haltlinien (HL) [m]

v_P ... Progressionsgeschwindigkeit der Richtung [m/s]

Neben der Versatzzeit $t_{Versatz}$ sind bei der Festlegung der Freigabezeitpunkte an den folgenden Knotenpunkten weitere Faktoren zu berücksichtigen. Für die Abwicklung stromaufwärts einbiegender Verkehrsströme sowie abgehängter Pulkfahrzeuge können Grünbandbreitenvergrößerungen vorgesehen werden (vgl. links in Abbildung 2.7). Bei der Wahl der Bandbreitenvergrößerung in Form von Vor- und Nachlaufzeiten liegen folgende Überlegungen zugrunde. Das HBS [FGSV-2009] empfiehlt eine Vorlaufzeit von mindestens vier Sekunden. Neben der Abwicklung von stromaufwärts einbiegenden Verkehrsströmen können Pulkspitzenfahrzeuge in diesem Fall den Signalwechsel auf Grün bereits vor der Ankunft an der Haltlinie wahrnehmen und somit Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge vermeiden. Unter gewissen Umständen empfiehlt es sich, auf die Vorlaufzeit zu verzichten und darüber hinaus eine Grünbandverkleinerung vorzunehmen. Mit dem Verzicht auf die Vorlaufzeit und den damit in Kauf genommenen Haltevorgängen kann bspw. ein aufgelöster Pulk wieder zusammengebracht werden. Eine Grünbandverkleinerung (rechts in Abbildung 2.7) empfiehlt sich insbesondere, wenn sich die Verkehrsstärke des durchgehenden Stroms durch Abbiegeverkehr verringert.

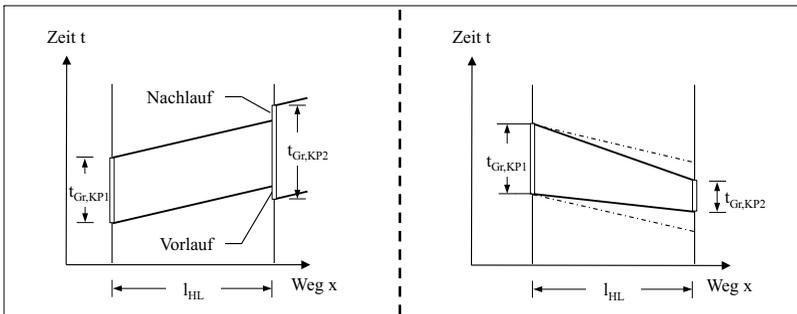


Abbildung 2.7: Grünbandbreitenvergrößerung und -verkürzung

Bautechnische Randbedingungen für die Dimensionierung

Bei der planerischen Konstruktion einer Koordinierung müssen neben den verkehrstechnischen Anforderungen auch bautechnische Randbedingungen beachtet werden, da sie ebenfalls die Qualität der Koordinierung maßgeblich beeinflussen können. In den Regelwerken [FGSV-2010] und [FGSV-2009] wird vorgeschlagen, je nach Möglichkeit mehr als einen Fahrstreifen für den koordinierten Strom vorzusehen. Zudem können Halteverbote eine negative Beeinträchtigung der Qualität des Verkehrsablaufs vermeiden. Diese

Maßnahmen sind insbesondere bei hohem Parksuch-, Rad- und Lieferverkehr sowie bei einer hohen Anzahl von ÖV-Haltevorgängen an Haltestellen empfehlenswert. Weiterhin sind besonders bei vielen Abbiegevorgängen gesonderte Abbiegefahrstreifen vorzusehen, damit Fahrzeuge in der koordinierten Richtung nicht behindert und Auffahrunfälle vermieden werden.

Gemäß § 26 der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung [VwV-StVO-2010] sind Fußgängerüberwege in Streckenzügen mit koordinierten LSA unzulässig.

Da sich bei größeren Knotenpunktabständen Fahrzeugpuls in Folge unterschiedlicher Geschwindigkeiten auflösen, sollten die Entfernungen zwischen benachbarten Knotenpunkten unter 750 m liegen. In Ausnahmefällen kann der Abstand auch bis zu 1.000 m betragen [FGSV-2009].

2.4.3 Grundlegende Verfahren zur Planung von Koordinierungen

Wie in Abschnitt 2.4.2 beschrieben kann die Koordinierung von LSA manuell geplant werden. Dessen ungeachtet sind in der Vergangenheit eine Vielzahl von grafischen und analytischen Methoden entwickelt worden, welche zum Teil auch noch in heutigen Planungs- und Optimierungsprogrammen Anwendung finden. In der Literatur werden u. a. die Methoden

- Translationsverfahren [SCHNABEL-1973],
- Bandbreitenverfahren [HAMBURGER-1933],
- Konstruktionsverfahren [PITZINGER / SULZER-1968],
- MAXBAND-Verfahren [LITTLE / KELSON-1980],
- Bandbreitenmaximierung [BAASS-1985] und
- Dominanzverfahren [SCHNABEL / LOHSE-2011]

zur Berechnung und Konstruktion von Koordinierungen aufgeführt. Die meisten Berechnungsverfahren arbeiten nach dem Prinzip der Bandbreitenmaximierung. Hier wird auf Grundlage der zuvor errechneten Signalprogramme jeder LSA die maximal verteilbare Bandbreite auf dem koordinierten Streckenzug ermittelt. Eine ausführliche Beschreibung sowie Rechenbeispiele zu einigen der aufgezählten Methoden sind neben den genannten Quellen in [SCHNABEL / LOHSE-2011] zu finden. Viele der Verfahren unterliegen vereinfachenden Annahmen und sind daher nur unter gewissen Randbedingungen praktikabel. Das Bandbreitenverfahren setzt bspw. gleiche Progressionsgeschwindigkeiten beider Richtungen, identische Freigabezeiten in allen Zufahrten und konstante Bandbreiten voraus [HAMBURGER-1933]. Bei der Methode nach [BAASS-1985] werden zudem zweiphasige Signalprogramme unterstellt. Das Basisverfahren wurde im gleichen Schriftwerk

weiterentwickelt. Hier konnten erstmals auch mehrphasige LSA-Steuerungen und abweichende Knotenpunktabstände berücksichtigt werden. Die mehrphasige LSA-Steuerungen sind allerdings mit zusätzlichen und zum Teil sehr komplexen Berechnungsschritten verbunden. Bei den Methoden der Bandbreitenoptimierung bleibt im Allgemeinen ungeklärt, wie zu verfahren ist, wenn die ermittelte Grünbandbreite kleiner als die Mindestbreite aus den Vorgaben verkehrstechnischer Randbedingungen ist [SCHNABEL / LOHSE-2011] (vgl. Abschnitt 2.4.2). Beim Dominanzverfahren wird dieses Problem aufgegriffen [SCHNABEL / LOHSE-2011]. Es wird zunächst ein durchgehendes Grünband für die Verkehrsrichtung mit der größeren Verkehrsbedeutung, welche als Hauptrichtung bezeichnet wird, eingerichtet. Anschließend wird unter Berücksichtigung der notwendigen Freigabezeiten für den Querverkehr der frühest- und der spätestmögliche Freigabezeitbeginn der Gegenrichtungen an allen Knotenpunkten ermittelt und darauf aufbauend das gegenläufige Grünband konstruiert. Das MAXBAND-Verfahren [LITTLE / KELSON-1980] wird vor allem im amerikanischen Raum verwendet. Wie in [BRILON / WIETHOLT / WU-2007] erwähnt sind die Grundzüge des Verfahrens ähnlich denen der Methode zur Bandbreitenmaximierung von [BAASS-1985].

2.4.4 Optimierungsverfahren und Optimierungsprogramme

Infolge des technologischen Fortschritts konnten die komplexen Algorithmen der Berechnungsverfahren in Softwareprogrammen implementiert, getestet und weiterentwickelt werden. Hieraus resultierten Anwendungen, die nicht nur koordinierte Signalzeitenpläne erstellen, sondern diese auch automatisch optimieren können. Die Optimierungsprogramme unterscheiden sich in ihrer Anwendung für Planungszwecke im Offlinemodus und für den Betrieb im Onlinemodus. Beide Programmtypen optimieren auf Grundlage einer Zielfunktion die Signalzeitenpläne. Bei den Offline-Programmen müssen die Verkehrsdaten manuell eingegeben werden. Online-Verfahren können hingegen direkt auf Signalisierungsdaten sowie Verkehrsdaten von stationären Detektoren zurückgreifen und somit die Signalisierung unmittelbar an das Verkehrsgeschehen anpassen. Eine Online-Optimierung von Koordinierungen kommt zumeist in Netzsteuerungsverfahren zur Anwendungen. Zur Optimierung der Lichtsignalsteuerung werden u. a.

- Gradientenverfahren (Hill-Climbing-Algorithmus),
- Methoden der sukzessiven Näherung,
- gemischt-ganzzahlige Optimierung,
- dynamische Optimierung,
- “Branch-and-bound“-Verfahren und
- genetische Algorithmen

eingesetzt [BOHLINGER-2007]. Folgend wird eine Auswahl von Programmen zur Optimierung von Signalzeitenplänen und deren zugrunde liegenden Verfahren umrissen.

TRANSYT & SCOOT

“Traffic Network Study Tool“ (TRANSYT) ist das international populärste Programm zur Erstellung von Signalzeitenplänen. Die erste Version wurde in den 1960er Jahren zur Vorhersage des Stauverhaltens von Robertson entwickelt [ROBERTSON-1969]. TRANSYT kann sowohl für den Online-Betrieb als auch für die Offline-Planung verwendet werden. Grundlagen sind ein makroskopisches, deterministisches Verkehrsmodell und ein eigens entwickeltes Pulkauflösungsmodell. Die Optimierung basiert auf der Hill-Climbing-Methode, einem heuristischen Verfahren zur Suche eines lokalen Minimums oder Maximums. Bei der Lichtsignalsteuerung wird der Hill-Climbing-Algorithmus verwendet, um die Signalzeitenpläne zu optimieren, indem ein definierter Bewertungsindex schrittweise minimiert wird. Weitere Informationen und eine allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise ist u. a. in [BOHLINGER-2007] zu finden. Mit der Kenntnis der Verkehrsstärken und der Abbiegebeziehungen optimiert das Programm die Freigabe- und Versatzzeiten. Hierzu ist eine Reihe iterativ durchzuführender Berechnungsschritte notwendig [ROBERTSON-1997].

Das Programm “Split, Cycle and Offset Optimisation Technique“ (SCOOT) wird insbesondere in Großbritannien zur modellbasierten Steuerung von LSA verwendet. Es berücksichtigt Daten von haltlinienfernen Detektoren, um online eine Optimierung der Steuerung vorzunehmen. SCOOT wird oft mit TRANSYT in Verbindung gebracht, da die Programme fast identische Optimierungsalgorithmen nutzen. Im Gegensatz zu TRANSYT werden Verkehrsstärken direkt gemessen und die Optimierungsberechnung kontinuierlich sowie rekursiv durchgeführt [BRILON / WIETHOLT / WU-2007]. Auf Grundlage der Detektordaten, einer angenommenen mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit sowie aktueller Signalzustände werden die Ankunftszeiten der sich nähernden Fahrzeuge und die Rückstaulängen in jeder Zufahrt unter Berücksichtigung der Pulkauflösung prognostiziert. Zur Minimierung der Verlustzeiten, der Anzahl der Halte und der Staulängen werden Umlauf-, Freigabe- und Versatzzeiten solange variiert, bis ein vordefinierter Sättigungsgrad, üblicherweise 90 %, erreicht wird. Falls dieser Wert nicht erreicht werden kann, wird bei Übersättigung die maximal und bei geringen Verkehrsstärken die minimal zulässige Umlaufzeit verwendet [HUNT et al.-1981].

MOTION & BALANCE

In Deutschland fanden die ersten Netzsteuerungsverfahren erst in den 1990er Jahren mit der Entwicklung von MOTION und BALANCE Beachtung. Das Steuerungsverfahren MOTION “Method for the Optimization of Traffic Signals In On-line controlled Networks“ hat wie alle anderen diesbezüglichen Verfahren zum Ziel, den Verkehrsablauf

im gesamten Netz möglichst flüssig zu halten, indem unnötige Halte und Wartezeiten verhindert werden [BUSCH / KRUSE-1993]. Eingangsdaten sind lokale und netzstrategische Messdaten von stationären Detektoren. Mithilfe eines genetischen Optimierungsalgorithmus⁷ werden auf Basis einer Schätzung des aktuellen und zukünftigen Verkehrszustandes angepasste Signalprogramme berechnet. Hierbei werden aus den vorgegebenen Randbedingungen lokaler LSA-Steuerungen (Phasen, Phasenfolgen, Mindestgrünzeiten etc.) die jeweils beste Umlaufzeit, Grünzeitverteilung und Versatzzeit für eine optimale Koordinierung berechnet. Insgesamt werden die einzelnen LSA nach spätestens 15 Minuten neu miteinander koordiniert. Der ÖPNV kann bei der Erstellung des optimierten Signalprogramms eine höhere Priorität als der MIV erhalten. Das Online-Verfahren wurde auf einem Streckenzug in Münster angewendet. Gegenüber der vorherigen regelbasierten Steuerung konnten deutliche Verbesserungen der Qualität des Verkehrsablaufes für den MIV festgestellt werden [BRILON et al.-2009].

Das modellbasierte Steuerungsverfahren “Balancing Adaptive Network Control Method“ (BALANCE) [FRIEDRICH-1999; FRIEDRICH-2000] liefert alle 5 bis 15 Minuten optimierte Signalprogramme für jede eingebundene LSA im Netz. Der hinterlegte Optimierungsalgorithmus berücksichtigt auch hier eine Zielfunktion, welche die Minimierung der Wartezeit, der Staulängen und der Anzahl der Halte einschließt. In einem makroskopischen Verkehrsmodell werden auf der Grundlage aggregierter Daten haltliniennaher Detektoren Knotenströme erzeugt, Kantenbelastungen ermittelt und anschließend Quelle-Ziel-Beziehungen im Teilnetz abgeschätzt. Im nächsten Schritt werden die erzeugten Daten in einer mesoskopischen Ebene für die Erstellung von Verkehrsflussprofilen verwendet. In einem Wirkungsmodell werden die vorgenannten Kenngrößen geschätzt. Durch die Variation von Freigabezeitanteilen und Versatzzeiten wird im Optimierungsprozess nach den bestmöglichen Signalprogrammen gesucht. Der erste Optimierungsansatz basierte auf dem Hill-Climbing-Algorithmus. Später wurde ein echtzeitfähiger genetischer Algorithmus zur netzweiten Optimierung der Lichtsignalsteuerung (GALOP) getestet [BRAUN-2008].

PASSER, SOAP, SIGOP & Synchro

Die Programmserie “Progression Analysis and Signal System Evaluation Routine“ (PASSER) besteht aus insgesamt drei Softwarepaketen zur Analyse und Optimierung von Signalzeitenplänen. Die Programme wurden vom Texas Transportation Institute (TTI) entwickelt. Die erste Version von PASSER kam als Echtzeitsteuerungsverfahren an vier signalisierten Knotenpunkten in Dallas im US-Bundesstaat Texas zum Einsatz. In den späten 1970er Jahren wurde PASSER mit unterschiedlichen Berechnungsansätzen für die Offline-Anwendung weiterentwickelt [TTI-2014].

⁷ Weiterhin wurde ein bislang nicht veröffentlichtes Optimierungsverfahren beruhend auf einer deterministische Heuristik entwickelt [MÜCK-2008].

Das Programm PASSER II wurde ursprünglich entwickelt, um LSA-Koordinierungen in Streckenzügen offline zu optimieren [MESSER / HAENEL / KOEPPE-1974]. Es beinhaltet ein Verfahren zur Bandbreitenoptimierung, welches die Umlaufzeit, die bestmöglichen Phasenfolgen und die optimalen Versatzzeiten für maximal 20 signalisierte Knotenpunkte bestimmt. Das Programm benutzt eine modifizierte Version der häufig verwendeten Wartezeitformel nach [WEBSTER-1958], um das Verhalten der Fahrzeugpuls vorherzusagen. Notwendige Eingangsdaten sind die Verkehrsfluss- und Geoinformationsdaten wie bspw. Abbiegeraten, Sättigungsverkehrsstärke, Knotenpunktabstände, voraussichtliche Reisegeschwindigkeiten, minimale Phasendauer und erlaubte Phasenwechsel für jede LSA. Das Programm schätzt die mittlere und summierte Wartezeit, den Kraftstoffverbrauch, die Anzahl von Halten und die Staulängen. Daraus werden die Phasenfolgen, die Grünzeiten, die Versatzzeiten, die Progressionsgeschwindigkeiten und die Umlaufzeit ermittelt, mit denen die Grünbandbreiten beider Richtungen maximiert werden. Das Programm ist in der Lage, mehrere Phasen, variable Umlaufzeiten und Grünbandbreiten zu berücksichtigen [MESSER / HAENEL / KOEPPE-1974].

Neben PASSER II wurden weitere Optimierungsprogramme unter den Namen PASSER III, PASSER IV und PASSER V entwickelt. Ein häufig verwendetes Programm ist PASSER IV, welches auf dem MAXBAND-Verfahren nach [LITTLE / KELSON-1980] aufbaut und im Gegensatz zu PASSER II mehrere Streckenzüge, geschlossene Straßennetze sowie Ein- und Zweirichtungsfahrbahnen berücksichtigen kann [CHAUDHARY-1997].

Das Programm "Signal Operation Analysis Package" (SOAP) bietet eine makroskopische Analyse mit dem primären Ziel der Erstellung von Signalzeitenplänen für Einzelknotenpunkte. Über die Minimierung eines Performance Index werden offline Umlaufzeiten und Grünzeiten berechnet. Eingangsgrößen sind Verkehrsströme, Lkw-Anteile, Linksabbiegeraten und Sättigungsverkehrsstärken. Die Ergebnisse der Analyse umfassen die Wartezeit, den Sättigungsgrad, die Rückstaulänge, den Kraftstoffmeherverbrauch, die Konflikte mit Linksabbiegern und die Anzahl der Halte [SABRA-2003].

Mit dem Programm "Signal Optimization" (SIGOP) ist eine Offline-Optimierung eines Straßennetzes mit bis zu 150 festzeitgesteuerten LSA möglich. Dabei können bis zu vier Phasen berücksichtigt werden. Das zugrunde liegende makroskopische Verkehrsflussmodell betrachtet die Struktur und insbesondere die Auflösung von Fahrzeugpuls. SIGOP wählt mittels einer sukzessiven Näherung aus zehn verschiedenen Umlaufzeiten die optimale Umlaufzeit aus [BOHLINGER-2007].

Synchro ist eine makroskopische Analyse- und Optimierungssoftware. Das Programm basiert auf dem Highway Capacity Manual (HCM), dem US-amerikanischen Vorbild des HBS. In der aktuellen Version⁸ sind die Methoden des HCM berücksichtigt [HCM-2010]. Synchro kann zur Offline-Analyse der Koordinierung verwendet werden. Unter anderem

⁸ Stand Februar 2016: Version 9

werden die mittlere Verlustzeit, die Wartezeiten, der Auslastungsgrad, die Rückstaulänge, die Anzahl der Halte, die Reisezeit, die Emissionen und der Kraftstoffverbrauch berechnet [SYNCHRO-2013].

Weitere Verfahren

Die aufgeführten Verfahren stellen lediglich eine Auswahl von Optimierungsansätzen für die Koordinierung von Lichtsignalanlagen dar. Viele dieser Optimierungsverfahren finden sich insbesondere in Netzsteuerungsprogrammen wieder. Einen Gesamtüberblick über die Verfahren liefern u. a. [PEARSON-2003; BOHLINGER-2007; WIETHOLT-2009; OTTO-2011]. Weiterhin in der Literatur erwähnte Verfahren sind

- RATISBONA-OPT [BRAUN / WEICHENMEIER-2005],
- Ampel-K [BOHLINGER-2007],
- SCATS [LOWRIE-1982],
- OPAC [GARTNER-1983],
- SPOT/UTOPIA [MAURO / DITARANTO-1990] sowie
- PRODYN [HENRY / FARGES-1989].

2.4.5 Einsatz von Geschwindigkeitsanzeigen

Kollektive Geschwindigkeitsanzeigen

Im Zuge koordinierter Signalsteuerungen können Geschwindigkeitsanzeigen den Fahrzeugführern eine bestimmte Geschwindigkeit empfehlen, bei welcher sie den nächsten signalisierten Knotenpunkt theoretisch bei Grün erreichen und ohne Halt passieren können. Die Strecken werden in der Regel am Anfang des Streckenzuges mit Hinweistafeln (links in Abbildung 2.8) oder Geschwindigkeitssignalen (rechts in Abbildung 2.8) ausgestattet. Die Wirksamkeit dieser kollektiven Verkehrsbeeinflussung ist in der Literatur unumstritten. In [SCHNABEL / LOHSE-2011] sind Messergebnisse veröffentlicht, die das Verhalten des Pulkspitzenfahrzeugs in einem ca. 400 m langen Streckenabschnitt mit und ohne Geschwindigkeitsanzeige wiedergeben. Insgesamt haben sich fast 70 % der ersten Fahrzeuge im Pulk an die empfohlene Geschwindigkeit angepasst, so dass sich die Durchfahrten der Pulkspitzenfahrzeuge ohne Halt mehr als verdoppelt haben. Die Geschwindigkeitsanpassung des Pulkspitzenfahrzeuges hat eine Homogenisierung des nachfolgenden Verkehrs zur Folge. Durch das “Zusammenschließen des Fahrzeugpulks“ können somit die Kapazitäten der koordinierten LSA optimal ausgenutzt werden [FGSV-2010]. Mit dem Einsatz der Geschwindigkeitsanzeigen sind auch Knotenpunktabstände über die in den bautechnischen Randbedingungen in Abschnitt 2.4.2 empfohlenen 750 m bzw. 1.000 m

hinaus möglich [FGSV-2009]. Besonders bei größeren Abweichungen zwischen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der Progressionsgeschwindigkeit kommt der Vorteil von Geschwindigkeitssignalen bzw. Hinweistafeln zur Geltung, da sich die niedrigeren Geschwindigkeiten im tatsächlichen Verkehrsablauf ohne die Geschwindigkeitsempfehlungen nicht ohne Weiteres einstellen. So sind nach [SCHUSTER-1996] bei Progressionsgeschwindigkeiten unter 40 km/h zusätzliche Maßnahmen wie angepasste Straßenraumgestaltung und -nutzung, Ausweisung der entsprechenden zulässigen Höchstgeschwindigkeiten oder eben der Einsatz von Geschwindigkeitsanzeigen vorzusehen. Trotz der unbestrittenen Wirksamkeit einer Geschwindigkeitsanzeige wird aufgrund des technischen Aufwandes auf Geschwindigkeitssignale weitgehend verzichtet [SCHNABEL / LOHSE-2011].

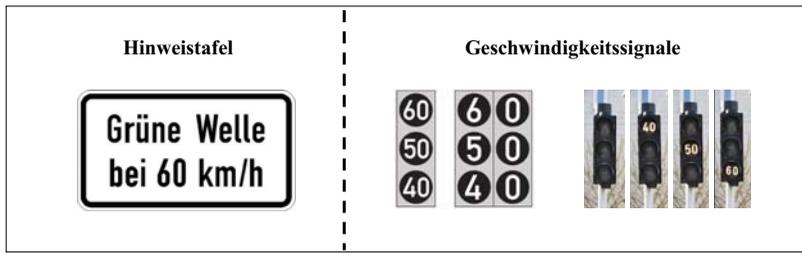


Abbildung 2.8: Beispiele kollektiver Geschwindigkeitsanzeigen⁹

Individuelle Geschwindigkeitsanzeigen

In den Anfängen der 1980er Jahre wurde erstmals ein System zur individuellen Geschwindigkeitsanzeige entwickelt. Im Rahmen des damaligen Forschungsprojekts “Wolfsburger Welle“ wurden Grüne-Welle-Informationen direkt in das Fahrzeug übermittelt [ZIMDAHL-1983]. Das System wurde im Wolfsburger Straßennetz auf einer Strecke mit insgesamt elf LSA erprobt. Zur Übertragung der relevanten Daten wurde die Infrarottechnik genutzt, deren damalige Reichweite bis zu 70 Meter betrug. Auf einem im Fahrzeug integrierten Display wurde die aktuelle räumliche und zeitliche Lage des Fahrzeuges im Grünband angezeigt. Ein beweglicher Balken auf einem Hintergrund mit gelb-grün-gelben Farbverlauf diente als Orientierung (links in Abbildung 2.9). Befand sich der Balken im grünen Bereich, fuhr der Fahrer mit optimaler Geschwindigkeit in der Grünen Welle. Sofern dies nicht zutraf, konnte der Fahrer intuitiv durch Abbremsen oder Beschleunigung seine Geschwindigkeit so anpassen, dass er bei unbehinderter Fahrt vom gelben in den grünen Bereich gleiten konnte. Die individuellen Geschwindigkeitsanzeigen wurden auch in späteren Forschungsprojekten wie TRAVOLUTION, AKTIV-VM, KOLIBRI,

⁹ Hinweistafel gemäß Zusatzzeichen nach § 39 [StVO-2013], Bildquelle: [BAST-2014]; Bildquellen Geschwindigkeitssignale: [FGSV-2010] und [WELTER-SCHULTES-2013] (Bild bearbeitet)

sim^{TD}, SHARE und UR:BAN-VV aufgegriffen.¹⁰ Durch den technologischen Fortschritt konnten neuartige Anzeigekonzepte entwickelt sowie zeitgemäße mobile Endgeräte genutzt werden. In AKTIV-VM wurde unter anderem ein Personal Digital Assistant (PDA, mittig in Abbildung 2.9) und in KOLIBRI sowie in UR:BAN-VV ein Smartphone zur Anzeige der Grünen-Welle-Information genutzt. Auf der rechten Seite in Abbildung 2.9 ist ein Anzeigekonzept aus sim^{TD} dargestellt.

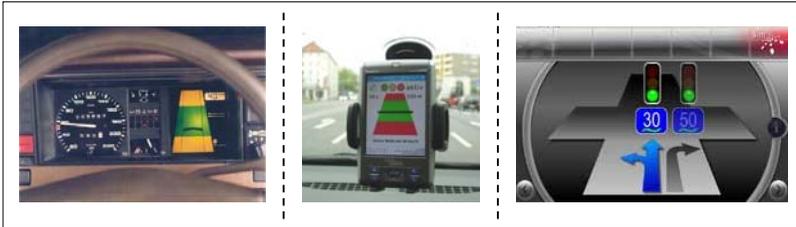


Abbildung 2.9: Beispiele individueller Geschwindigkeitsanzeigen¹¹

Neben den verschiedenen Anzeigekonzepten besteht ein weiterer wesentlicher Unterschied in der Art und im Umfang der Datenkommunikation. Die Infrarottechnik wurde vom Wireless Local Area Network (WLAN) abgelöst, weil hier u. a. keine direkte Sichtverbindung zwischen beiden Kommunikationspartnern erforderlich ist. Ähnlich wie im Projekt “Wolfsburger Welle“ wurden WLAN-Router als infrastrukturseitige Sendeeinrichtungen in Betrieb genommen. Diese Systeme haben sich aufgrund des relativ hohen technischen Aufwandes sowie wegen der hohen Investitions- und Instandhaltungskosten noch nicht durchgesetzt. Die Datenübertragung kann auch über den Mobilfunk erfolgen. Dieser Ansatz wird bspw. auch im Rahmen aktueller Forschungs- und Entwicklungsvorhaben untersucht. Das Fahrzeug kommuniziert hier mit einer Verkehrszentrale respektive einem Dienstanbieter. Dadurch ist die Kommunikation nicht mehr auf die Reichweite lokaler Sendeeinheiten beschränkt. Der mobilfunkbasierte Datenaustausch ist wesentlicher Bestandteil des später in der Arbeit behandelten Systems und wird in Abschnitt 4.2 ausführlich beschrieben.

2.4.6 Bewertungsverfahren

Grundsätzlich kann die Bewertung von koordinierten Lichtsignalsteuerungen aus verkehrstechnischer, monetärer, ökologischer und verkehrspolitischer Sicht erfolgen. Für die

¹⁰ TRAVOLUTION u.a. in [BRAUN et al.-2009], AKTIV-VM u.a. in [OTTO / HOYER-2010], KOLIBRI u.a. in [KRAUSE / BENGLER-2013], sim^{TD} in [SIM^{TD}-2013]; siehe Kapitel 3 für Bedeutung der Akronyme und detaillierte Projektinformationen

¹¹ Bildquellen: [BUSCH-2007], [OTTO / HOYER-2010], [SIM^{TD}-2013]

vorliegende Arbeit steht der verkehrstechnische Aspekt im Vordergrund und wird im Folgenden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bewertungskriterien näher erläutert.

Bewertung anhand der Anzahl der Halte

Wie aus der Definition der koordinierten Steuerung in Abschnitt 2.4.1 hervorgeht, liegt der Grundgedanke einer Koordinierung in einer ungehinderten Durchfahrt von Fahrzeugen über mehrere Knotenpunkte hinweg. Dies begründet, dass sich der Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt als vorrangiges Qualitätsmerkmal zur Bewertung der koordinierten Steuerung herauskristallisiert und sich in den einschlägigen Regelwerken manifestiert hat. Das HBS-2001 empfiehlt, die Wirksamkeit der Koordinierung anhand dieses Kriteriums zu beschreiben. Die Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufes in koordinierten Zufahrten erfolgt anschließend in sechs Stufen gemäß Tabelle 2.2. Die in A bis F eingeteilten Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes (QSV) ergeben sich aus den aufgeführten Grenzwerten.

Tabelle 2.2: Qualitätsstufenkonzept zur Bewertung von Koordinierungen¹²

QSV	Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt [%]	Prozentsatz der Halte [%]	Erläuterung der Qualität
A	≥ 95 %	< 5 %	ausgezeichnet
B	≥ 85 %	< 15 %	noch sehr ausgezeichnet
C	≥ 75 %	< 25 %	gut
D	≥ 65 %	< 35 %	ausreichend
E	≥ 50 %	< 50 %	mangelhaft*
F	< 50 %	≥ 50 %	ungenügend*

* Koordinierung unwirksam

Eine Möglichkeit zur Ermittlung der in Tabelle 2.2 genannten Qualitätskenngröße besteht in der manuellen Verkehrserhebung. Hierzu werden an allen koordinierten Knotenpunktzufahrten die durchfahrenden und haltenden Fahrzeuge gezählt. Aus den erhobenen Werten wird der Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt nach Gleichung 2.5 berechnet [FGSV-2009].

$$D = \frac{q_D}{q_D + q_H} \cdot 100 \% \quad (2.5)$$

¹² in Anlehnung an [FGSV-2009], siehe Anhang C für Definitionen zu den QSV

mit:

- D ... Prozentsatz der Anzahl der registrierten Durchfahrten ohne Halt an den Knotenpunkten mit LSA [%]
 q_D ... Anzahl der durchfahrenden Fahrzeuge in einem Zeitintervall [Fz/h]
 q_H ... Anzahl der haltenden Fahrzeuge in einem Zeitintervall [Fz/h]

Da die Wirksamkeit von Koordinierungen nur bis zu einem Auslastungsgrad von 90 % gegeben ist (siehe Abschnitt 2.4.2), sollte die Erhebung grundsätzlich bei mittleren bis hohen Verkehrsstärken stattfinden. In [SCHNABEL / LOHSE-2011] wird das Verfahren um die zusätzliche Betrachtung von sogenannten "behinderten Fahrzeugen" erweitert. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht zum Stillstand kommen, ihre Fahrt jedoch verlangsamen müssen. Sie werden gemäß der Gleichung 2.6 mit dem halben Wert den durchfahrenden Fahrzeugen zugeschlagen.

$$D = \frac{q_D + 0,5 \cdot q_B}{q_D + q_H + q_B} \cdot 100 \% \quad (2.6)$$

mit:

- q_B ... Anzahl der behinderten Fahrzeuge in einem Zeitintervall [Fz/h]

Neben der Verkehrserhebung können relevante Daten auch über eine Befahrung erhoben werden. Bei der sogenannten Messwagenmethode fährt ein Messfahrzeug im Verkehrsstrom mit. Die Überprüfung der Funktionsfähigkeit einer Koordinierung erfordert mindestens fünf Messfahrten [FGSV-2009]. Die relevanten Parameter wie Halte, Haltezeiten, Fahrzeiten etc. werden zumeist direkt aufgezeichnet oder aus einem mitgeschriebenen Fahrprofil nachträglich ausgelesen. Mit den Befahrungsdaten lässt sich anschließend das Koordinierungsmaß k_i für einen in Betracht gezogenen Streckenzug für die Verkehrsrichtung i nach Gleichung 2.7 bestimmen.

$$k_i = \frac{N_i}{(N_{K,LSA} - 1) \cdot n} \cdot 100 \% \quad (2.7)$$

mit:

- i ... Verkehrsrichtung (Hin- und Rückrichtung), $i = \{1, 2\}$
 k_i ... Koordinierungsmaß für die Verkehrsrichtung i [%]
 N_i ... Anzahl der registrierten Durchfahrten ohne Halt an den Knotenpunkten mit LSA (außer am Eingangs-Knotenpunkt) für die Verkehrsrichtung i von allen Messfahrten n [-]
 $N_{K,LSA}$... Anzahl der Knotenpunkte mit LSA des Streckenzugs [-]
 n ... Anzahl der Messfahrten [-]

Nachträglich kann das Koordinierungsmaß für beide Richtungen des Streckenzuges mit $k = (k_1 + k_2)/2$ bestimmt werden. Die Qualitätsbewertung erfolgt ebenfalls nach Tabelle 2.2.

Das ermittelte Koordinierungsmaß bzw. das bestimmte Qualitätsergebnis ist insbesondere bei einer geringen Anzahl von Messfahrten kritisch zu hinterfragen. Dies trifft auch dann zu, wenn die Messfahrten immer zum gleichen Zeitpunkt im Umlauf beginnen. In dem Falle könnte es bspw. vorkommen, dass das Messfahrzeug immer das Pulkspitzenfahrzeug ist. Die Messfahrten sollten daher idealerweise über den gesamten Grünzeitbereich der ersten LSA verteilt sein. Eine weitere Voraussetzung ist, dass während der gesamten Messfahrten kein Signalprogrammwechsel statt findet.

Bewertung anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit

Eine grundsätzliche Qualitätskenngröße zur Bewertung des Verkehrsablaufes ist die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R . Die in [SCHNABEL et al.-1998] vorgeschlagenen Grenzwerte wurden mehrfach überarbeitet¹³ und dienten ursprünglich der Bewertung des Qualitätsablaufes auf Hauptverkehrsstraßen in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit v_{zul} .

Tabelle 2.3: *Qualitätsstufen unter Berücksichtigung der Reisegeschwindigkeit*

LOS bzw. QSV	[HCM-2010]*				[BRILON / SCHNABEL-2003]		
	$\frac{\bar{v}_R \cdot 100}{v_{frei}} \%$	$v_{frei} = 50$	$v_{frei} = 60$	$v_{frei} = 70$	$v_{zul} = 50$	$v_{zul} = 60$	$v_{zul} = 70$
	[%]	$\bar{v}_R [km/h]$			$\bar{v}_R [km/h]$		
A	> 85	> 42,5	> 51	> 59,5	≥ 40	≥ 50	≥ 60
B	> 67	> 33,5	> 40	> 47	≥ 30	≥ 35	≥ 40
C	> 50	> 25	> 30	> 35	≥ 25	≥ 25	≥ 30
D	> 40	> 20	> 24	> 28	≥ 20	≥ 20	≥ 25
E	> 30	> 15	> 18	> 21	≥ 15	≥ 15	≥ 15
F	≤ 30	≤ 15	≤ 18	≤ 21	< 15	< 15	< 15

* Grenzwerte gelten nur bei einem Auslastungsgrad $\leq 1,0$
 Grenzwerte für $v_{frei} = 50 km/h, v_{frei} = 60 km/h, v_{frei} = 70 km/h$ berechnet

Es können mit diesem Ansatz sämtliche Straßenzüge aus der Kombination von Knotenpunkten mit und ohne LSA sowie Kreisverkehre und auch Koordinierungen berücksichtigt werden. Die Grenzwerte wurden in Anlehnung an die jeweilige Ausgabe des HCM definiert. In den älteren Versionen des HCM wurden in Abhängigkeit von der Straßenkategorie feste Grenzwerte für sechs Qualitätsstufen¹⁴ festgelegt. Im aktuellen [HCM-2010]

¹³ siehe Anhang C
¹⁴ hier: LOS

sind die Schwellwerte als prozentualer Anteil einer vorab zu definierenden "typischen freien Geschwindigkeit" v_{frei} angegeben. Die Tabelle 2.3 zeigt eine Auflistung der aktuellen Schwellwerte aus verschiedenen Literaturquellen.

Bewertung anhand des Performance Index

Die oben genannten Bewertungsansätze bestimmen die Koordinierungsqualität über eine isolierte Betrachtung einer Verkehrskenngröße. Bei der Bewertung anhand des sogenannten Performance Index PI werden hingegen mehrere Verkehrskenngrößen mit einbezogen. Der Performance Index PI geht auf [ROBERTSON-1969] und das im Zusammenhang stehende TRANSYT-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.4.4) zurück. Der Performance Index PI stellt einen gewichteten Wert aller Wartezeiten und Halte dar. Er wird nach Gleichung 2.8 bestimmt.¹⁵

$$PI = \left(G_W \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (\bar{t}_{W_{i,j}} \cdot q_{i,j} \cdot \gamma_j) + G_H \cdot \sum_{i=1}^k (N_{H_{i,j}} \cdot q_{i,j} \cdot \gamma_j) \right) \quad (2.8)$$

mit:

PI	...	Performance Index [-]
k	...	Anzahl der Knotenpunkte [-]
n	...	Anzahl der Fahrstreifen am Knotenpunkt i [-]
$\bar{t}_{W_{i,j}}$	...	mittlere Wartezeit auf dem Fahrstreifen j am Knotenpunkt i [s]
$N_{H_{i,j}}$	...	Anzahl der Halte auf dem Fahrstreifen j am Knotenpunkt i [-]
G_W	...	Gewicht der Wartezeiten [Fz ⁻¹]
G_H	...	Gewicht der Halte [s/Fz]
γ_j	...	Gewicht für den Fahrstreifen bzw. für die gesamte zulaufende Strecke [-]
$q_{i,j}$	...	Verkehrsstärke [Fz/s]

Der Performance Index PI hat als alleinstehender Wert keine Bedeutung. Er erzielt erst beim Vergleich verschiedener Steuerungslösungen einen Nutzen. Die Lösung mit dem geringsten Wert stellt dabei die beste Lösung dar. Der Performance Index PI kann sowohl für die Beurteilung der Koordinierungsqualität signalisierter Streckenzüge als auch für die Qualitätseinschätzung eines gesamten signalisierten Straßennetzes einschließlich der nicht koordinierten Zufahrten der Nebenstraßen genutzt werden [BRILON / HOHMANN / GIULIANI-2013].

Bewertung anhand der "Grünbandverletzung"

Prinzipiell ist eine Einschätzung der Koordinierungsqualität auch ohne die Erhebung vorgenannter Kenngrößen des tatsächlichen Verkehrsablaufes möglich. Anders als in den

¹⁵ Gleichung 2.8 in Anlehnung an [SCHNABEL / LOHSE-2011]

o. g. Verfahren wurden bspw. im Projekt ARRIVE die sich im Zeit-Weg-Diagramm einstellenden Grünbänder analysiert. Die Grünbänder, welche hier den idealisierten Verlauf eines Fahrzeugpulses versinnbildlichen sollen, werden mit den Grünzeiten an jedem Knotenpunkt verglichen. Sofern die Ankunftszeit des "Pulks" nicht im Freigabezeitraum liegt, wird eine Störung am Anfang und am Ende des Grünbandes und anschließend eine sogenannte "Störintensität" ermittelt. Für eine angestrebte Optimierung werden verschiedene Varianten durch die Variation der Versatzzeit erstellt, bewertet und mit einer Qualitätskennzahl versehen. Über einen Vergleich dieser Qualitätswerte lässt sich die beste Lösung ermitteln. Dieses Verfahren wurde in ARRIVE zur Optimierung der LSA-Steuerungen an fünf Streckenzügen verwendet [ARRIVE-2010].

2.5 Schlussfolgerungen

Die in diesem Kapitel behandelten Grundlagen verdeutlichen, dass die Bewertung einer koordinierten Lichtsignalsteuerung auf unterschiedliche Weise erfolgen kann. Die meisten etablierten Bewertungsansätze beziehen sich auf Kenngrößen des tatsächlich existierenden Verkehrsgeschehens. Die Wirksamkeit einer Koordinierung wird also indirekt über den echten Verkehr beurteilt. In der Regel sind hierzu kosten- und zeitintensive Befahrungen bzw. aufwendige manuelle Beobachtungen notwendig. Eine Abhilfe können sogenannte kooperative Lichtsignalanlagen schaffen, welche im nächsten Kapitel thematisiert werden sollen. Vorab sei erwähnt, dass mit den kooperativen Systemen die Infrastrukturbetreiber verkehrliche Daten von im Verkehr mitschwimmenden Fahrzeugen erhalten können. Genau diese mobil erfassten Daten bieten das Potenzial für eine in Echtzeit stattfindende und automatisierte Qualitätsanalyse von koordinierten Lichtsignalsteuerungen. Im besten Fall kann dadurch auf die bislang manuell durchzuführenden Erhebungen und Befahrungen verzichtet werden.

Weiterhin sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Erwartung und die Zufriedenheit der Verkehrsteilnehmer in den etablierten Bewertungsverfahren von koordinierten Lichtsignalsteuerungen keine direkte Berücksichtigung finden. Die "Messung" der Qualität erfolgt nur auf Seiten der Leistungserbringer. Es bleibt fraglich, ob die Qualitätseinschätzung des Betreibers derjenigen der Verkehrsteilnehmer gleicht. Der Qualitätskreis (Abbildung 2.2) wäre demnach nicht geschlossen. Im Hinblick auf den o. g. Qualitätskreis im Verkehrswesen ist auch auf die begriffliche Abgrenzung zwischen einer Grünen Welle und einer Koordinierung von LSA zu achten.

3 Forschungsstand zu kooperativen Systemen

3.1 Vorbemerkungen

In jüngster Vergangenheit rückten im Bereich der Verkehrstelematik¹⁶ sogenannte kooperative Systeme zunehmend in das Blickfeld von Forschung und Entwicklung. Begründet durch neue Informations- und Kommunikationstechnologien ist es nunmehr möglich, Informationen zwischen Fahrzeugen untereinander sowie zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur auszutauschen. Kooperative Systeme sind daher als neuartige Anwendungsfelder in der Verkehrstelematik (ITS¹⁷) zu verstehen. Die offizielle Definition für “kooperative Systeme“ im Straßenverkehr der Europäischen Kommission [BMVBS-2011] lautet: *“Straßenbetreiber, Infrastruktur, Fahrzeuge, ihre Fahrer und andere Straßenbenutzer kooperieren, um eine möglichst effiziente, sichere und angenehme Fahrt zu ermöglichen. Zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur kooperierende Systeme werden über die Möglichkeiten isolierter Systeme hinaus zur Erreichung dieser Zielsetzung beitragen.“* Technisch gelingt der Austausch an Informationen durch

- die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (auch als V2V-Kommunikation¹⁸ bzw. C2C-Kommunikation¹⁹ bezeichnet) sowie durch
- die Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation (auch als V2I-Kommunikation²⁰ bzw. C2I-Kommunikation²¹ bezeichnet).

Als Oberbegriff für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation werden die in der Literatur auch die Begriffe C2X-Kommunikation und V2X-Kommunikation verwendet.

Insbesondere die Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation erschließt neue Potenziale für die Analyse und Steuerung des Straßenverkehrs. Der Infrastrukturbetreiber erhält von den Fahrzeugen weitere verkehrliche Daten, welche durch straßenseitige Erfassungseinrichtungen nur schwierig zu erfassen sind. Die in der strategischen Verkehrssteuerung abgeleiteten Empfehlungen können wiederum durch die Vernetzung der Akteure in das

¹⁶ Verkehrstelematik bezeichnet den Einsatz von Informatik und Telekommunikation im Verkehrsbereich

¹⁷ ITS - “Intelligent Transport Systems“; internationale Bezeichnung für Verkehrstelematik

¹⁸ V2V - “vehicle-to-vehicle“

¹⁹ C2C - “car-to-car“

²⁰ V2I - “vehicle-to-infrastructure“

²¹ C2I - “car-to-infrastructure“

Fahrzeug übertragen und in neuartigen Fahrerassistenzsystemen aufgegriffen werden. Durch einen direkten Eingriff in die Fahrzeugsteuerung oder durch die individuelle Reaktion des Fahrers kann der Fahrtverlauf der gegenwärtigen Verkehrssituation angepasst werden.

Einhergehend mit dem in Abschnitt 2.4.5 erwähnten Projekt “Wolfsburger Welle“ folgten zahlreiche Forschungsaktivitäten mit dem Ziel, neuartige Fahrerassistenzsysteme zu entwickeln. Durch die informationstechnische Verbindung des Automobils mit der Infrastruktur konnten nunmehr infrastruktur- und fahrzeugbezogenen Daten über verschiedene Kommunikationswege gegenseitig ausgetauscht werden. Auf nationaler und internationaler Ebene rückte dadurch die Entwicklung von kooperativen Systemen immer mehr in den Fokus von Forschung und auch Politik. Nachfolgend wird eine Auswahl aktueller Forschungsansätze kooperativer Systeme genauer beschrieben. Hierdurch sollen der Entwicklungsstand und die unterschiedlichen Funktionsweisen herausgestellt werden.

3.2 Europäische Projekte

Im europäischen Raum befassten sich in den letzten Jahren u. a. drei Großprojekte mit der Anwendung von kooperativen Systemen. Die abgeschlossenen Projekte CVIS²², SAFESPOT²³ und COOPERS²⁴ hatten zum Ziel, die Sicherheit und die Effizienz des Straßenverkehrs zu steigern. Die grundlegenden Unterschiede zwischen den Projekten sind folgende:

- CVIS (2006 - 2010) umfasste die Prüfung und Entwicklung von Schlüsseltechnologien für die Kommunikation innerhalb kooperativer Systeme,
- SAFESPOT (2006 - 2010) konzentrierte sich auf kooperative Applikationen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und
- COOPERS (2006 - 2010) befasste sich mit der Konzeption kooperativer Systeme aus Sicht der Infrastrukturbetreiber, um den Systemansatz eines integrierten Verkehrsmanagements voran zu treiben.

Im Projekt CVIS wurde untersucht, welche Technologien benötigt werden, damit Fahrzeuge untereinander sowie mit infrastrukturseitigen Einrichtungen, sogenannten Road Side Units (RSU), sicher kommunizieren können. Dabei wurde in CVIS der internationale CALM²⁵-Standard genutzt. Die Architektur von CALM erlaubt die gleichzeitige Internetverbindung über mehrere drahtlose Übertragungstechnologien wie bspw.

²² CVIS - “Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems“

²³ SAFESPOT - “Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety“

²⁴ COOPERS - “Cooperative Systems for Intelligent Road Safety“

²⁵ CALM - “Communications access for land mobiles“

Infrarot, Mobilfunk sowie WLAN. Die CVIS-Plattform konnte den strengen Anforderungen an Kommunikations- und Netzwerkleistung gerecht werden [MOE / NEBEHAJ / ERNST-2010]. Live-Tests haben gezeigt, dass für die V2I- und für die V2V-Kommunikation ausreichende Kommunikationsgeschwindigkeiten mit hinreichendem Datendurchsatz erreicht wurden.

Im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsprojekts SAFESPOT wurden Applikationen für die Fahrerunterstützung durch kooperative Sicherheitssysteme entwickelt und evaluiert. Ziel des Projektes war die Erhöhung der Verkehrssicherheit durch die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur. Sicherheitskritische Zustände und Situationen im Straßenverkehr sollten frühzeitig erkannt und an andere Autofahrer weitergegeben werden. Die Applikationen umfassten einen Kreuzungsassistenten, einen Längsverkehrsassistenten mit Geschwindigkeits- und Abstandshinweisen, eine Warnung vor Verletzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit sowie eine lokale Gefahrenwarnung im Falle kritischer Straßenzustände und mangelhafter Sichtbedingungen. Der Kooperationsansatz basierte auf einer dezentralen Lösung. Die Fahrzeuge kommunizierten untereinander sowie mit mehreren RSU. Der Datenaustausch erfolgte über den WLAN-Standard IEEE 802.11p [BRIGNOLO-2007], einer Funkschnittstelle speziell für Anwendungen im Rahmen intelligenter Verkehrssysteme.²⁶ In [LÜDEKE et al.-2010] wurden die Ergebnisse des SAFESPOT-Projektes bezüglich der ökonomischen Bewertung kooperativer Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Nutzer und Infrastrukturbetreiber veröffentlicht. Neben den zahlreichen Vorteilen des kooperativen Systems, wie Sicherheitswirkungen, wurde auch festgestellt, dass die Marktdurchdringungsrate eine entscheidende Rolle für die Profitabilität des Systems spielt. Es wird vorgeschlagen RSU nur gezielt an Unfallschwerpunkten zu installieren, um Infrastrukturinvestitionen kostensparend nur an solchen Stellen durchzuführen, an denen eine besonders hohe Wirksamkeit zu erwarten ist [LÜDEKE et al.-2010].

Das Projekt COOPERS befasste sich mit der Anwendung einer Echtzeit-Datenkommunikation zwischen der Infrastruktur und dem Fahrzeug, um sicherheitsrelevante Informationen unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verhältnisse eines bestimmten Straßenabschnitts auszutauschen. Wie in [RICHTER / GILKA-2012] erwähnt, lag der Fokus im Gegensatz zu SAFESPOT und CVIS vor allem auf der V2I-Kommunikation mit dem Ziel, die Potenziale und Grenzen eines Verkehrsmanagements mit integriertem kooperativen System zu analysieren. Hinsichtlich der zukünftigen Investitionskosten und der strategischen Ausrichtung der Infrastrukturbetreiber sind insbesondere die Ergebnisse der Akzeptanz- und Fahrverhaltensanalyse interessant. Die in COOPERS definierten Dienste umfassten bspw. ein Unfallmanagement, eine Straßenzustands-

²⁶ Die WLAN-Technologie ist im IEEE-Standard 802.11 spezifiziert und teilt sich in verschiedene Unterstandards auf. Tabelle D.1 im Anhang D zeigt eine tabellarische Übersicht über die aktuellen WLAN-Standards.

und Wetterwarnung, Baustelleninformationen, Fahrstreifennutzungsinformationen, Geschwindigkeitsempfehlungen und Stauwarnungen [FAISSTNAUER-2011]. Die durchgeführten Feldtests vermittelten den Infrastrukturbetreibern mehrerer europäischer Städte einen Einblick in die Entwicklung, Installation und Benutzung kooperativer Systeme. Es stellte sich heraus, dass die Installationen der kooperativen Systemkomponenten sehr anspruchsvoll ist, da sie in eine komplexe Straßeninfrastruktur im laufenden Betrieb integriert werden mussten. Der Funktionsnachweis der angewendeten Kommunikations- und Kodierungstechniken konnte erbracht und die Kompatibilität der Systeme untereinander nachgewiesen werden. Die einheitliche Definition von vereinbarten Diensten und die daraus resultierenden Spezifikationen gemeinsamer Software-Erweiterungen waren ein wichtiger Schritt bezüglich der Harmonisierung der Angebotsqualität von Verkehrsinformationen auf europäischer Ebene. Die durchgeführten Tests erlaubten eine erste Schätzung der Investitions- und Betriebskosten solcher Systeme. Ebenfalls konnten fehlende oder fehlerhafte Elemente und Funktionalitäten wie bspw. die falsche Abbildung der Verkehrslage infolge mangelhafter Datenfusion festgestellt werden [BOSOM et al.-2011].

Nach Abschluss der hier genannten drei Großprojekte galt es u. a. die Frage zu klären, inwiefern die kooperativen Systeme über Zuständigkeits- und Ländergrenzen hinweg überführt und eingesetzt werden können. Die Europäische Kommission finanzierte daraufhin eine Serie von mehreren anwendungsorientierten Folgeprojekten auf europäischer Ebene. Zur Klärung der Frage nach der Übertragbarkeit wurden die Systeme in mehreren Städten Europas unter Durchführung umfassender Feldtests erprobt. Großangelegte Feldtests fanden u. a. in den Projekten Drive C2X, TeleFOT, euroFOT und FOTsis statt. Dabei wurden auch hier verschiedene Übertragungstechnologien, die Auswirkungen diverser Fahrerassistenzfunktionen und Analysen zur Markteinführung durchgeführt. Projektergebnisse finden sich bspw. in [EUROFOT-2012] und [TELEFOT-2012].

3.3 Projekte im deutschsprachigen Raum

Auch auf der nationalen Ebene gab es zahlreiche Projekte, die sich mit der Entwicklung von kooperativen Systemen befassten. Folgend sollen abgeschlossene Projekte im deutschsprachigen Raum aufgegriffen und analysiert werden.

Im Rahmen des im Jahre 2008 abgeschlossenen Forschungsprojekts TRAVOLUTION²⁷ wurde unter anderem ein Datenaustausch zwischen Lichtsignalanlagen und Fahrzeugen erprobt [BRAUN et al.-2009]. Ziel war es, den Fahrer über eine optimale Fahrweise zu

²⁷ TRAVOLUTION - "Traffic and Evolution"

informieren, ohne aktiv in die Fahrzeugsteuerung einzugreifen. Durch die Beeinflussung des Fahrverhaltens sollten insbesondere Stauungen vermieden und deren Auflösung beschleunigt werden. Im innerstädtischen Raum sollten ferner die Kapazitäten von signalisierten Knotenpunkten erhöht, die Anzahl der Halte sowie die Wartezeiten reduziert werden. Hierzu wurden die zwei Fahrerassistenzfunktionen “Restrotanzeige“ und “dynamische Grüne Welle“ entwickelt, umgesetzt und erprobt. Es wurden insgesamt drei LSA-Steuergeräte in Ingolstadt mit Kommunikationsmodulen ausgerüstet, welche über eine einseitige Schnittstelle Daten in der direkten Umgebung verbreiten konnten. Die verwendete V2I-Kommunikation basierte auf dem konventionellen WLAN-Standard (IEEE 802.11b/g). Entsprechend ausgerüstete Fahrzeuge konnten innerhalb der Empfangsradien die Daten beziehen, verkehrliche Informationen extrahieren und im Kombiinstrument anzeigen. Die Restrotanzeige informierte den Fahrer über die verbleibende Wartezeit bei Rot. Neben dem Komfortgewinn konnte dem Fahrer die Entscheidung erleichtert werden, ob das Abschalten des Motors sinnvoll ist. Bei der dynamischen Grünen Welle wurde dem Fahrer ein Geschwindigkeitsbereich angezeigt, in welchem er ohne Halt den nächsten signalisierten Knotenpunkt passieren kann. Die Erprobungsphase hat gezeigt, dass die größten Herausforderungen in der Prognose der LSA-Schaltzeiten und in der Abschätzung des Rückstaus vor den einbezogenen LSA bestanden. Die Prognosen sind gerade bei verkehrsabhängig geregelten Anlagen nicht trivial. Die Grünwahrscheinlichkeiten wurden sekundlich aktualisiert, vom LSA-Kommunikationsmodul ausgesendet und im Fahrzeug verarbeitet. Die Abschätzung der Rückstaulänge erfolgte unter Anwendung des in [MÜCK-2002] beschriebenen Verfahrens. Unter Berücksichtigung der prognostizierten Größen wurde die optimale Geschwindigkeit berechnet. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf [BRAUN et al.-2009]. Verkehrliche Wirkungen sowie volks- und betriebswirtschaftliche Aspekte eines solchen Systems gehörten nicht zur Untersuchung.

Das Projekt AKTIV-VM²⁸ strebte insbesondere eine gesamtheitliche Betrachtung kooperativer Systeme an. Ziel des Projektes war die Vernetzung von Verkehrs- und Informationszentralen, straßenseitigen Infrastruktureinrichtungen und intelligenten Fahrzeugen [AKTIV-2011]. Ähnlich wie bei COOPERS lag der Schwerpunkt auf V2I-Applikationen. Hier wurde u. a. eine kooperative Lichtsignalanlage entwickelt, welche mittels einer drahtlosen Kommunikation eine Verbindung zu umliegenden Fahrzeugen mit kooperativen Endgeräten aufbauen konnte. Vom gegenseitigen Informationsaustausch profitierten beide Seiten. Die im Fahrzeug befindlichen kooperativen Endgeräte sendeten mobil erfasste Fahrtverlaufsdaten an die LSA. Die kooperative Lichtsignalanlage konnte anhand dieser Zusatzinformationen ihren Beobachtungshorizont erweitern und den Verkehr mittels einer angepassten Signalsteuerung noch optimaler steuern. Ein entsprechender Ansatz findet sich in [PRIEMER-2010]. Das hier entwickelte azyklische, dezentrale Steuerungsverfahren nutzte das neue Potenzial an fahrzeuggenerierten Daten, um die

²⁸ AKTIV-VM - “Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr - Verkehrsmanagement“

Freigabezeiten an die vorhandene Verkehrsnachfrage in den einzelnen Zufahrten anzupassen. Im Gegenzug übermittelte die LSA Daten mit Informationen über zukünftige Umschaltzeitpunkte und einen erweiterten digitalen Lageplan. Ein im Fahrzeug befindliches kooperatives Endgerät (hier PDA) generierte aus diesen Daten verbleibende Grün- und Rotzeiten sowie Grüne-Welle-Informationen. Über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, welche im englischsprachigen Raum auch als Human Machine Interface (HMI) bezeichnet wird, konnten diese Informationen ausgegeben werden. Ein Beispiel zur Darstellung einer Grüne-Welle-Information ist in Abschnitt 2.4.5 aufgeführt. Dem Autofahrer wurde so die Möglichkeit gegeben, seine Geschwindigkeit an das Grünzeitfenster der stromabwärtigen LSA auszurichten. Im Kontext des Projekts wurde u. a. auch die verkehrliche Wirksamkeit der Verkehrsbeeinflussung infolge dieser dynamischen Geschwindigkeitsinformation untersucht [OTTO-2011]. Es zeigte sich, dass der Wirkungsgrad der resultierenden Verkehrsbeeinflussung von mehreren Faktoren abhängig ist. Neben der Ausstattungsrate der kooperationsfähigen Fahrzeuge sind auch das Koordinierungsmaß, die Anzahl der Richtungsfahstreifen, die minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung sowie geometrische und zeitliche Bedingungen im Straßennetz entscheidend. Die Fahrerbeeinflussung eröffnet eine grundsätzlich neue Möglichkeit zur Verbesserung des Verkehrsablaufes. Durch die Anpassung der Geschwindigkeit ausgestatteter Fahrzeuge an die jeweilige Signalisierung kommt es auf der gesamten Zulaufstrecke zur Entstehung von Fahrzeugpulk und damit zur Harmonisierung des Verkehrsablaufes. In Abhängigkeit von den genannten Einflussfaktoren lassen sich die Anzahl der Halte sowie die Gesamt-wartezeit des Fahrzeugkollektivs deutlich reduzieren. Eine Erhöhung der Kapazität oder eine Verkürzung der Reisezeit kann nur durch eine Anpassung der Steuerung erreicht werden. Die größte verkehrliche Wirkung erzielt die Fahrerbeeinflussung bei einer schlechten LSA-Koordinierung und bei großen Knotenpunktabständen.

Im Projekt sim^{TD} ("Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland") wurde die sogenannte V2X-Kommunikation, welche als Oberbegriff für die V2I- und V2V-Kommunikation verwendet wird, erstmalig ein Feldversuch auf öffentlichen Straßen über einen Zeitraum von einem halben Jahr mit insgesamt 120 Fahrzeugen getestet und bewertet [SIM^{TD}-2009]. Das Projekt hatte zum Ziel, Fahrzeug-, Kommunikations- und Verkehrstechnologien zu einem ganzheitlichen System zu verknüpfen. Analog zu anderen Projekten sollten die Autofahrer durch umfassende Informationen vor potenziellen Gefahren gewarnt werden. Jedes ausgestattete Fahrzeug generierte unter Verwendung board-eigener Sensoren Daten zum Verkehrsgeschehen, welche bei Bedarf an andere Fahrzeuge oder an die nächstgelegene RSU²⁹ kommuniziert wurden. Die von der RSU aufgenommenen Daten wurden einer Zentrale³⁰ übermittelt. Dort wurden die Daten mehrerer RSU gesammelt und fusioniert. Die verarbeiteten Informationen konnten wiederum an die Fahrzeuge über verschiedene Kommunikationskanäle übermittelt werden. Das koope-

²⁹ in sim^{TD} als ITS Roadside Station (IRS) bezeichnet

³⁰ in sim^{TD} als ITS Central Station (ICS) bezeichnet

orative System nutzte hier u. a. einen hybriden Kommunikationsansatz, welcher sowohl die WLAN- als auch die Mobilfunktechnologie unterstützt. Primär wurde der vom Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) spezifizierte ITS-G5-Standard [ETSI EN 302 663] verwendet. ITS-G5 nutzt das 5,9-GHz-Frequenzband und ist die europäische Variante des amerikanischen WLAN-Standards (IEEE 802.11p). Parallel wurden in sim^{TD} die Nachrichten auch über Mobilfunk (GSM³¹, UMTS³² etc.) und über den konventionellen WLAN-Standard (IEEE 802.11b/g) verbreitet.

Analog zu den bereits genannten Projekten fokussierte das Projekt KOLINE³³ die Entwicklung eines verkehrstelematischen Systems, welches eine Kooperation von Fahrzeugen und Infrastruktur ermöglichte. Auf Basis der V2I-Kommunikation und unter Berücksichtigung aktueller Messdaten wurden die Programme der Lichtsignalsteuerung optimiert. Darüber hinaus ermöglichte die Kooperation eine Entwicklung und Umsetzung individueller LSA-Annäherungsstrategien einzelner Fahrzeuge. Das System bestand aus den drei Teilsystemen KOLINE-Fahrzeug, KOLINE-LSA und KOLINE-Zentrale [BLEY et al.-2011]. Bei Annäherung an einen Knotenpunkt stellten ausgestattete Fahrzeuge der KOLINE-LSA entsprechende Bewegungsdaten bereit. Die mobil erfassten Daten wurden anschließend von der LSA an die KOLINE-Zentrale übermittelt, wo eine modellbasierte netzweite LSA-Optimierung stattfand. Unter Verwendung des sogenannten Cell Transmission Model (CTM) konnte hier die Wirkungen unterschiedlicher Kombinationen von Versatzeiten und Progressionsgeschwindigkeiten der einzelnen LSA für die Hauptströme bewertet und für jeden signalisierten Knotenpunkt optimierte Festzeit-signalprogramme bestimmt werden. Die Übermittlung der angepassten Signalprogramme an die KOLINE-LSA erfolgte in 15-minütigen Intervallen. Die Lichtsignalanlage änderte daraufhin ihre Signalisierung und schickte über eine spezielle RSU Signalisierungsdaten an die Fahrzeuge. Die V2I-Kommunikation basierte auf dem WLAN-Standard IEEE 802.11p und auf den im Forschungsprojekt sim^{TD} definierten Kommunikationsprotokollen [BLEY et al.-2011].

Im Rahmen des bayrischen Pilotprojektes KOLIBRI³⁴ wurde ein kooperativer Verkehrssteuerungsansatz realisiert [DINKEL et al.-2013]. Ein Ziel bestand in der Verbesserung koordinierter Lichtsignalsteuerungen auf Streckenzügen mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten über 50 km/h. Weiterhin sollte das individuelle Fahrverhalten durch die fahrzeuginterne Bereitstellung der aktuellen Progressionsgeschwindigkeiten einer Grünen Welle optimiert werden, um Staus an signalisierten Knotenpunkten zu reduzieren. Die Testfelder umfassten jeweils einen Streckenzug mit mehreren kooperativen LSA in München und in Regensburg. Der kooperative Ansatz ermöglichte eine drahtlose Verbin-

³¹ GSM - "Global System for Mobile Communications", Mobilfunkstandard der zweiten Generation (2G)

³² UMTS - "Universal Mobile Telecommunications System", Mobilfunkstandard der dritten Generation (3G)

³³ KOLINE - "Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen"

³⁴ KOLIBRI - "Kooperative Lichtsignaloptimierung"

dung zwischen ausgestatteten Fahrzeugen und einer Zentrale mittels Mobilfunk (UMTS). Somit konnten Signalisierungsinformationen in ein fest installiertes oder mobiles Endgerät übertragen und über das jeweilige HMI ausgegeben werden [ETTINGER-2014]. Abhängig vom gegenwärtigen Standort des Fahrzeuges fragte das Endgerät prognostizierte Signalisierungsinformationen der nächsten LSA ab und leitete daraus die entsprechenden Grüne-Welle-Informationen ab. Die Prognose der Schaltzeitpunkte stütze sich dabei auf historische Daten.

Im österreichischen Forschungsprojekt TESTFELD TELEMATIK wurde erprobt, wie kooperative Dienste zu gestalten und einzusetzen sind, damit sie zu mehr Sicherheit, Effizienz und umweltverträglicher Mobilität im Verkehrsnetz beitragen können [TESTFELD TELEMATIK-2014]. In einem im Großraum Wien aufgebauten Testfeld konnten Fahrzeuge und Infrastruktur gegenseitig Echtzeit-Informationen austauschen. Die räumliche Ausdehnung des Testfelds bezog sich auf das übergeordnete Straßennetz unter Einbeziehung des öffentlichen Verkehrs und des sekundären Straßennetzes. Die hier entwickelten kooperativen Dienste wie bspw. lokale Gefahrenwarnung, Wetterwarnung, Park-and-Ride-Informationen und Geschwindigkeitsempfehlungen konnten demnach in realer Umgebung erfolgreich getestet werden [BANKOSEGGER et al.-2013]. Mit Beendigung des Projektes im Jahre 2013 konnte die technische Machbarkeit von kooperativen Diensten in Österreich nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurden Potenziale zur Verbesserung von technischen Unzulänglichkeiten in den Standards für kooperative Dienste identifiziert, welche an die entsprechenden Standardisierungsgremien (ETSI, CEN³⁵) herangetragen wurden. Die Erkenntnisse fließen auch im derzeit bearbeiteten Nachfolgeprojekt ECO-AT³⁶ ein. Hier werden harmonisierte und standardisierte kooperative ITS-Anwendungen abgestimmt und gemeinsam mit deutschen und niederländischen Partnern entwickelt. Das Projekt hat eine Gesamtlaufzeit von vier Jahren und endet voraussichtlich im zweiten Quartal 2017 [ECO-AT-2015]. Veröffentlichte Projektergebnisse lagen zum Zeitpunkt des Redaktionsschlusses der vorliegenden Arbeit nicht vor.

Neben den oben aufgeführten Projekten gibt es eine Vielzahl weiterer Forschungsprojekte mit Bezug zu kooperativen Systemen. Unter anderem sind DIAMANT, COMeSafety, COM2REACT, DRIVE C2X, SEVECOM, FleetNet, GST, Invent, NoW, PreVENT und CONVERGE zu nennen.

3.4 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine hohe Aktivität in diesem Bereich zu verzeichnen ist. Bereits in den letzten zehn Jahren wurde allein von der Europäischen

³⁵ CEN - Europäische Komitee für Normung

³⁶ ECO-AT - "European Corridor - Austrian Testbed for Cooperative Systems"

Kommission über 100 Millionen Euro in die Entwicklung und Erprobung kooperativer ITS-Anwendungen investiert [GILKA-2012]. In Deutschland werden seit 2006 kooperative Systeme auf Basis des WLAN-IEEE Standards 802.11p bzw. ITS-G5 unter Einbeziehung der Verkehrsinfrastruktur entwickelt und erprobt. Aufgrund dieser zahlreichen Aktivitäten wurde eine Basis für eine europaweite Einführung kooperativer Systeme geschaffen.

Trotz der positiven Entwicklungen wird es voraussichtlich noch mehrere Jahre dauern, bis sich kooperative Systeme etablieren. In den meisten Projekten wurde bzw. wird die V2I-Kommunikation auf Basis des WLAN-IEEE Standards 802.11p bzw. ITS-G5 präferiert. Um eine hohe Abdeckung und damit eine hohe Wirksamkeit zu erreichen, müssen hierfür eine Vielzahl kostenintensiver straßenseitiger Einrichtungen (wie RSU) installiert und betrieben werden. Dem entgegen steht die langwierige Markteinführung von Fahrzeugen mit entsprechend kooperativer Ausrüstung. Die potenzielle Nutzergruppe fällt bis zur vollständigen Marktdurchdringung daher eher klein aus. Ein städtisches Verkehrsmanagement kann im Hinblick auf die Analyse und Steuerung des Verkehrsablaufes hingegen von diesem System erst profitieren, wenn eine gewisse Masse an Anwendern erreicht ist. Dieser Konflikt erklärt auch eine mögliche Zurückhaltung der Straßenbaustraßenträger in den notwendigen Ausbau der Infrastruktur zu investieren.

Die zunehmende Verbreitung von ITS-G5 birgt auch Risiken. Es besteht die Befürchtung, dass die verwendeten Frequenzbänder um 5.9 GHz überlastet sein werden [ITS-CH-2013]. Ein Ausweg wäre die parallele Nutzung von Mobilfunknetzen wie GSM, UMTS oder LTE³⁷. So können zumindest nicht zeitkritische Anwendungen auf Mobilfunknetze ausweichen. Solch ein hybrider Kommunikationsansatz wurde u.a. in CONVERGE sowie in sim^{TD} verwendet und wird auch in der länderübergreifenden Initiative C-ITS Corridor betrachtet [C-ITS-2014].

³⁷ LTE - "Long Term Evolution", Mobilfunkstandard der vierten Generation (3,9G-Standard)

4 Zentralenbasierter Ansatz kooperativer Lichtsignalanlagen

4.1 Problemstellung

Der kurze Abriss der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Kapitel 3 hat gezeigt, dass es viele unterschiedliche Ansätze von kooperativen Systemen gibt. Für die städtischen Straßennetze hat sich jedoch bis zum heutigen Stand (2016) noch kein Ansatz mit kooperativen LSA durchgesetzt. Dies liegt nicht zuletzt an den hohen Investitionskosten und an der langwierigen Einführung des speziell auf V2X-Anwendungen zugeschnittenen ITS-G5-Standards bzw. IEEE 802.11p-Standards, welcher auch für den städtischen Raum bislang überwiegend präferiert wurde. Bei der ausschließlichen Verwendung des genannten WLAN-Standards findet der wechselseitige Datenaustausch lokal zwischen den Fahrzeugen und der straßenseitigen Kommunikationseinrichtung der LSA statt. Eine Übertragung der mobil erfassten Daten von der kooperativen LSA an eine übergeordnete Komponente ist aufwendig und mit einem langen Umsetzungsprozess verbunden. Eine netzweite bzw. streckenbezogene Bewertung der koordinierten Lichtsignalsteuerung unter Anwendung dieser dezentralen Systeme ist daher in absehbarer Zeit kaum möglich. Aus diesem Grund wird in der Arbeit ein zentralenbasierter Ansatz verwendet, bei denen die Fahrzeuge direkt mit der Verkehrszentrale respektive eines Dienstanbieters über Mobilfunk kommunizieren, um mobil erfasste Daten sowie Signalisierungsdaten gegenseitig auszutauschen. Die Daten der LSA und der Fahrzeuge können so in der Verkehrszentrale gesammelt und für die Qualitätsbewertung der LSA-Koordinierung herangezogen werden.

In dem vorliegenden Kapitel wird der zugrunde gelegte zentralenbasierte Ansatz mit kooperativen Lichtsignalanlagen vorgestellt. Dieser Ansatz entspricht in weiten Teilen der im Rahmen des Teilprojektes “Urbane Straße“ des Forschungsprojektes UR:BAN-VV³⁸ entwickelten telematischen Lösung. Das Kapitel soll einen Überblick über die funktionalen und technischen Gegebenheiten des kooperativen Systems verschaffen. Dabei stehen insbesondere die Gewinnung der mobil erfassten Daten sowie die fahrzeugseitigen Assistenzfunktionen im Fokus der Betrachtung. Hierbei ist zu klären, wie die Daten aufgebaut

³⁸ UR:BAN-VV - “Urbane Straße: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement - Vernetztes Verkehrssystem“ [UR:BAN-2014]

sein müssen und wie oft sie ausgetauscht werden müssen, damit beide Kommunikationspartner von dem System profitieren. Einerseits ist sicherzustellen, dass die zentral bereitgestellten Signalisierungsdaten im Fahrzeug empfangen, verarbeitet und entsprechende Fahrerinformationen abgeleitet werden können. Andererseits sind die kooperativ gewonnenen Fahrzeugdaten so zu spezifizieren, dass sie sich als Eingangsdaten für die Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen eignen. Die fahrzeuggenerierten Daten werden in der Arbeit auch als Probe Vehicle Data (PVD) bezeichnet.

4.2 Systemanforderungen und Systemarchitektur

Das der Arbeit zugrunde liegende kooperative System zielt in erster Linie auf eine Steigerung der Verkehrseffizienz und Emissionsreduzierung bei Fahrten im lichtsignalgesteuerten innerstädtischen Straßennetz für den motorisierten Individualverkehr ab. Ähnlich wie in anderen Projekten wurden Fahrzeugfunktionen entwickelt, welche auf Basis von Signalisierungsinformationen emissionsreduzierte Fahrten über mehrere Lichtsignalanlagen hinweg ermöglichen. Hierbei wurden vom Infrastrukturbetreiber Lichtsignalzeitpunkte bereitgestellt, damit die Fahrzeuglenker genau die Informationen erhalten, welche sie für ein energie- und emissionsoptimales Fahren und Halten durch ein signalisiertes Straßennetz benötigen. Im Gegenzug erhält der Infrastrukturbetreiber von den Fahrzeugen mobil erfasste Kenngrößen, die durch straßenseitige Erfassungseinrichtungen nur schwierig oder gar nicht zu ermitteln sind. Genau diese Kenngrößen bieten das Potenzial für eine in Echtzeit stattfindende und automatisierte Qualitätsanalyse von koordinierten Lichtsignalsteuerungen. Im besten Fall kann dadurch auf die bislang notwendigen manuellen Erhebungen bzw. aufwendigen Befahrungen verzichtet werden.

Wie bereits beschrieben wird in der vorliegenden Arbeit ein zentralenbasierter kooperativer Ansatz mit V2I-Kommunikation aufgegriffen. Zentralenbasiert bedeutet in diesem Kontext, dass die Fahrzeuge nicht mit dezentral verteilten RSU kooperativer LSA, sondern über Mobilfunkkanäle direkt mit einer übergeordneten Verkehrszentrale respektive einem Dienstanbieter kommunizieren.

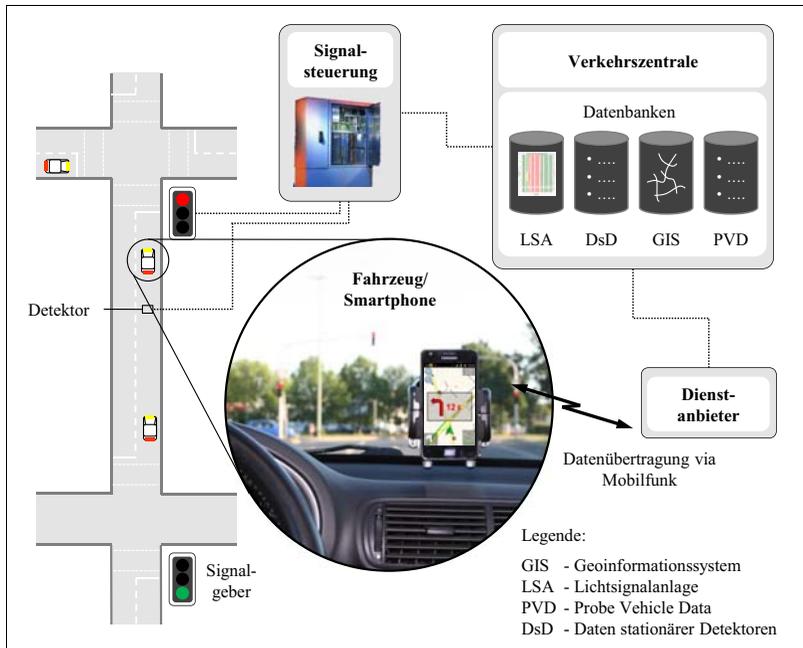


Abbildung 4.1: Aufbau des zugrunde liegenden kooperativen Systems³⁹

Das zentralenbasierte kooperative System besteht im Wesentlichen aus vier Hauptkomponenten: den im Fahrzeug befindlichen Endgeräten, der Signalsteuerung, der Verkehrszentrale und einem Dienstanbieter. Die Komponenten und die funktionalen Zusammenhänge sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Die prinzipielle Funktionsweise lässt sich folgendermaßen beschreiben:

1. Das Fahrzeug respektive das kooperative Endgerät sendet über den Mobilfunk sogenannte Probe Vehicle Data (PVD) an einen Dienstanbieter. Die PVD sind mobil erfasste Daten, welche mindestens die aktuelle Position und die Fahrtrichtung enthalten.
2. Der Dienstanbieter führt mit den in den PVD erhaltenen Positionsdaten ein Map-Matching durch. In Abhängigkeit von der gemeldeten Fahrtrichtung werden durch den Abgleich der aktuellen Fahrzeugposition mit einer digitalen Karte die nächsten LSA bestimmt. Die PVD werden in einer Datenbank gespeichert.
3. Für die nächstgelegenen stromabwärtigen LSA werden Status- und Geoinformationen aus Datenbanken der Verkehrszentrale abgerufen. Hierzu ist es notwendig, dass

³⁹ in Anlehnung an [UR:BAN-2014] und [RUDOLPH / LEITZKE / HOYER-2013]

die entsprechenden LSA kommunikationstechnisch an die Verkehrszentrale angebunden sowie georeferenziert sind.

4. Der Dienstanbieter ermittelt prognostizierte Schaltzeiten aller Signalgruppen der entsprechenden Zufahrten und schickt sie zusammen mit einem digitalen Kartenauszug der Strecke vom aktuellen Standort bis zu den nächsten LSA an das Fahrzeug zurück.
5. Eine im Endgerät implementierte Fahrerassistenzapplikation verarbeitet die Daten und georeferenziert fortwährend die Fahrzeugposition auf dem erhaltenen digitalen Kartenauszug. Je nach der aktuellen Lage in der Grünen Welle generieren und visualisieren entsprechende Fahrerassistenzfunktionen unterschiedliche Fahrerinformationen.

4.3 Herausforderungen der technischen Umsetzung

4.3.1 Infrastrukturbetreiber

Die Einführung eines zentralseitigen kooperativen Systems stellt besonders die Infrastrukturbetreiber vor gewisse Herausforderungen. Im Unterschied zu den dezentralen verkehrstelematischen Lösungen müssen nun auch Funktionalitäten einer zentralseitigen Daten- und Servicebereitstellung übernommen werden. Es muss demnach geklärt werden, welche Daten gesammelt und mit Dritten ausgetauscht werden können. Seitens der Baulastträger ist der Datenaustausch besonders effizient, wenn die beteiligten Systeme geeignete Schnittstellen aufweisen. Mit Blick auf LSA sind OCIT⁴⁰-Schnittstellen etabliert. In der Regel ist bei allen nach dem Jahr 2006 installierten Verkehrsrechnern eine entsprechende Schnittstelle (OCIT-I-, OCIT-C- oder OTS⁴¹) vorhanden [OTTO / SCHMID-2012].⁴² Vor dem Jahr 2001 in Betrieb genommene Verkehrsrechner besitzen in den meisten Fällen keine der genannten Schnittstellen. Diese können voraussichtlich auch nicht mit vertretbarem Aufwand ergänzt werden. Bei Verkehrsrechnern, welche zwischen 2001 und 2005 installiert wurden, ist eine nähere Prüfung bezüglich der Schnittstellenverfügbarkeit bzw. -nachrüstung erforderlich. Eine Umfrage zeigt, dass in den deutschen Städten mit mehr als 50.000 Einwohnern mehrheitlich Verkehrsrechner ab 2006 verwendet werden [FAKLER et al.-2014]. Die Häufigkeitsverteilung der Verkehrsrechner ist in

⁴⁰ Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems (OCIT) sind offene Schnittstellen für die Straßenverkehrstechnik. In den Definitionen werden Systemarchitektur, Regeln, OCIT-Protokolle, Funktionen und Übertragungsprotokolle festgelegt [OCIT-2007].

⁴¹ Open Traffic Systems (OTS): offener Schnittstellenstandard für den herstellerübergreifenden Datenaustausch in Systemen der Verkehrssteuerung und des Verkehrsmanagements [OTS-2014].

⁴² Ab 2006 wurden die *„gebräuchlichen Verkehrsrechner von Siemens (SCALA ab 2006) und von Huber / Unicom (VSR3000 ab 2007) mit einer OCIT-konformen Schnittstelle ausgestattet“* [OTTO / SCHMID-2012].

Abhängigkeit vom Baujahr mit variablen Klassenbreiten in Abbildung 4.2 dargestellt. Nur die Minderheit aller Städte mit weniger als einer Million Einwohnern operiert mit Verkehrsrechnern, welche vor dem Jahr 2001 in Betrieb genommen wurden. Jedoch besitzen 32 % aller Städte mit weniger als 100.000 Einwohnern generell keinen Verkehrsrechner. Mehr als die Hälfte aller Städte bis eine Million Einwohner weisen Rechner ab Baujahr 2006 auf. Die Umfrage zeigt weiterhin, dass in den Großstädten mehr als 70 % der LSA an die Verkehrsrechnerzentrale angebunden sind. Nur über diese direkte Verbindung können Informationen über den aktuellen Signalstatus, den bevorstehenden Wechsel der Signalzustände, die Detektorereignisse etc. gesammelt und im Rahmen kooperativer Systeme zentralseitig weiterverwendet werden.

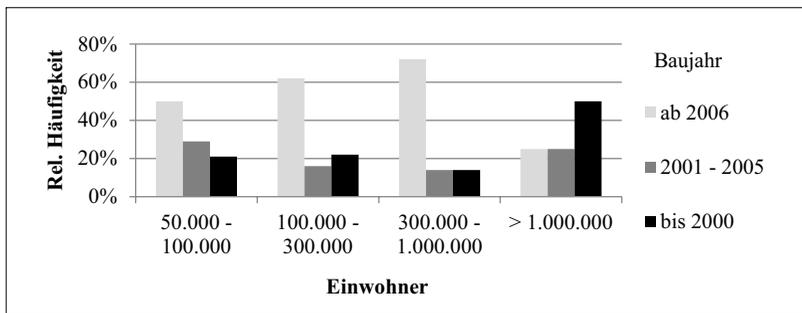


Abbildung 4.2: Altersstruktur der Verkehrsrechner in Deutschland⁴³

Neben der Schnittstellenverfügbarkeit am Verkehrsrechner ist vor allem der Anteil der an der Zentrale angeschlossenen LSA von Bedeutung. Die in [OTTO / SCHMID-2012] vorgenommene Altersklassifizierung deckt sich mit den in [FAKLER et al.-2014] festgelegten Intervallgrenzen. Es kann demnach geschlossen werden, dass aus infrastruktureller und kommunikationstechnischer Sicht über die Hälfte aller Städte mit mehr als 50.000 Einwohnern das vorgestellte zentralenbasierte System integrieren können. Aufgrund des relativ hohen Anteils der an den Verkehrsrechner angebundenen LSA könnte zudem prinzipiell ein Großteil des Hauptverkehrsstraßennetzes für das vorgestellte kooperative System verwendet werden.

Weitere Ergebnisse der Umfrage verdeutlichen den zusätzlichen Nutzen des hier vorgestellten zentralseitigen Ansatzes für den Infrastrukturbetreiber. Das in Abbildung 4.3 dargestellte Histogramm zeigt die geringe Abdeckung des Straßennetzes mit stationären Detektoren. Nur ein Viertel aller Städte gaben an, dass sie die Verkehrslage vollständig über stationäre Detektoren abbilden können [FAKLER et al.-2014]. Der Großteil der Städte besitzt Detektoren nur an ausgewählten, strategischen Orten oder erfassen gar keine Ver-

⁴³ in Anlehnung an [FAKLER et al.-2014]

kehrdaten. Dies unterstreicht das oben genannte Potenzial von kooperativen Systemen, die ergänzende Möglichkeiten zur mobilen Erfassung von Verkehrskenngrößen bieten. Weitere Ergebnisse der Umfrage können dem Anhang E entnommen werden.

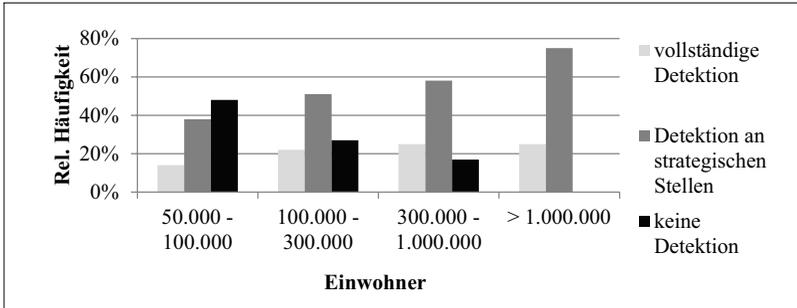


Abbildung 4.3: Abdeckung des Straßennetzes mit stationären Detektoren⁴⁴

4.3.2 Dienstanbieter

Der Dienstanbieter ist das Bindeglied zwischen der Infrastruktur und kooperativen Fahrzeugen. Seine Hauptaufgabe besteht in der Weitergabe relevanter LSA- und Geoinformationen. Hierzu sind zusätzliche Aufgaben bzw. Prozesse abzarbeiten. Diese umfassen u. a.

- der Datenaustausch mit der Verkehrszentrale,
- die Sammlung und Verarbeitung von LSA-, GIS- und Detektordaten sowie von PVD,
- den drahtlosen Datenaustausch mit den Fahrzeugen,
- die Verortung der gesendeten Fahrzeugpositionen in einer digitalen Karte (Map-Matching),
- die Bestimmung der stromabwärtigen LSA und aller Signalgruppen der jeweiligen Zufahrt,
- das Extrahieren der digitalen Kartenauszüge von den gemeldeten Positionen bis zu den nächsten stromabwärtigen LSA einschließlich der verorteter Haltlinien,
- die Prognose von Schaltzeiten und Rückstaulängen sowie
- die Erstellung der Datenpakete.

⁴⁴ in Anlehnung an [FAKLER et al.-2014]

Neben der Datenverarbeitung muss der Dienstanbieter auch die Aufgaben eines Webserver übernehmen. Die technologischen Anforderungen an die Ausrüstung des Dienstanbieters sind dabei von mehreren Faktoren abhängig und können aus diesem Grund nicht angegeben werden. Entscheidend sind bspw. die Anzahl kommunikationstechnisch angebundener LSA, die Ausstattungsrate kooperativer Fahrzeuge, der Kommunikationszyklus sowie Art und Umfang der benötigten Daten. Grundvoraussetzungen sind ausreichende Rechenleistung (Serverfarmen) sowie eine stabile Internetverbindung, von der erwartungsgemäß nicht immer ausgegangen werden kann. Prinzipiell kann hier auf den hohen Entwicklungszustand bestehender Technologien sowie auf standardisierte Übertragungs- und Netzwerkprotokolle zurückgegriffen werden.

4.3.3 Endgeräte

Das Endgerät im Fahrzeug erhält vom Dienstanbieter Daten über aktuelle und prognostizierte Steuerungsentscheidungen der jeweils nächsten stromabwärtigen Lichtsignalanlagen. Daraus leitet das Endgerät variable Geschwindigkeitsempfehlungen und Fahrhinweise ab, welche dem Fahrer mittels entsprechender Assistenzfunktionen bereitgestellt werden. Das Endgerät muss im Rahmen der kooperativen Anwendung eine Reihe von Aufgaben erledigen. Im Einzelnen handelt es sich um Prozesse für

- den drahtlosen Datenaustausch mit dem Dienstanbieter,
- die Bestimmung von Fahrzeugposition, -geschwindigkeit und Fahrtrichtung,
- deren Georeferenzierung auf einen entgegengenommenen Kartenauszug,
- die Filterung der fahrzeugrelevanten Informationen aus dem LSA-Datenstrom,
- die Berechnung der Lage in der Grünen Welle,
- die Abschätzung, ob das Fahrzeug die Haltlinie im aktuellen Umlauf passieren kann,
- die eventuelle Übernahme von Abbiegeinformationen aus Fahrzeug- oder Navigationsdaten und
- die visuelle und/oder sprachbasierte Ausgabe der entsprechenden Fahrerinformationen.

Die Vielzahl der erforderlichen Rechenprozesse verdeutlicht die Notwendigkeit eines adäquat leistungsfähigen Endgerätes. Das Endgerät muss weiterhin über eine satellitengestützte Ortungsfunktion der Eigenposition wie bspw. via Global Positioning System (GPS), eine Datenverbindung sowie ein HMI verfügen. In der vorliegenden Arbeit wurden Smartphones bzw. Tablets als mobiles Endgerät und die mobilfunkbasierte Internetverbindung verwendet. Da es in Deutschland rund 45,6 Millionen Smartphone-Nutzer

gibt⁴⁵, von denen ca. 75 % mobil im Internet surfen⁴⁶, kann eine breite Masse potenzieller Anwender in kurzer Zeit erreicht werden. Neben den meisten Smartphones erfüllen auch andere Geräte wie Tablets und fahrzeugintegrierte Systeme die genannten Voraussetzungen.

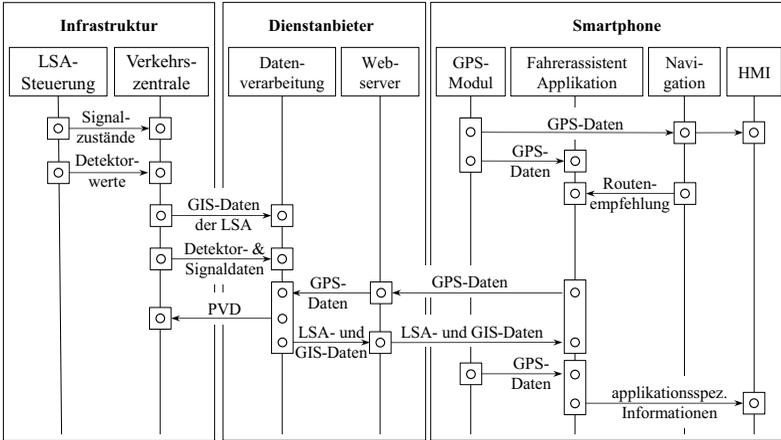


Abbildung 4.4: Sequenzdiagramm des zugrunde liegenden kooperativen Systems

Die im Endgerät zu implementierenden Fahrerassistenzfunktionen zeichnen sich durch eine hohe Komplexität des Zusammenspiels verteilter Funktionen einschließlich der Sensoren sowie durch die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug aus. Im Hinblick auf deren Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr ist die Beherrschung dieser Komplexität während des Entwicklungsprozesses eine große Herausforderung. Abbildung 4.4 zeigt die Vielschichtigkeit der Gesamtfunktionalität der sowohl mobilen als auch stationären Komponenten. Das hier dargestellte Sequenzdiagramm gibt einen Einblick in die funktionalen Zusammenhänge des Systems. Die Fahrerassistenzfunktionen auf dem Smartphone sind auf den zeitlich genau abgestimmten Daten-Input anderer Komponenten angewiesen. Neben den internen Schnittstellen zum GPS-Modul ist die Datenverbindung zur Infrastruktur respektive zum Dienstanbieter unumgänglich.

Um den Fahrer nicht mit Informationen zu überfluten, sollten lediglich routenspezifische Signalinformationen der jeweils nächsten Anlage ausgegeben werden. Hierzu ist die Kenntnis über die wahrscheinlichste Fahrrichtung bzw. über den Abbiegewunsch des Fahrers notwendig. Prinzipiell gibt es mehrere Möglichkeiten, diese Kenntnis zu erlangen.

⁴⁵ Stand: Februar 2015, Studie von <http://www.comscore.com> (veröffentlicht in [STATISTICA-2015])

⁴⁶ Der Wert von 75 % errechnet sich aus der Anzahl der Smartphone-Nutzer und der 34,3 Millionen Menschen in Deutschland, die das mobile Internet nutzen (Stand: 2013, Quelle: [AGOF-2015]).

Die wahrscheinlichste Fahrtrichtung kann u. a. durch das "Erraten" der Route bestimmt werden, was in den meisten Fällen aufgrund fehlender Datengrundlage bzw. fehlender Information über das gewünschte Ziel des Fahrers nur bedingt möglich ist. Die wahrscheinlichste Fahrtrichtung ist auch anhand von Blinkvorgängen erkennbar. Nachteilig ist aber, dass die Fahrzeuglenker in der Regel erst kurz vor dem Knotenpunkt oder beim Einordnen auf einen Abbiegefahrstreifen den Blinker betätigen. Für die Ausgabe von routenspezifische Signalinformationen reicht der Abstand zur LSA oftmals nicht mehr aus, um den gewünschten Effekt zu erzielen. In der vorliegenden Arbeit wurde daher ein anderer Ansatz verfolgt. Bei dem Ansatz werden Routenempfehlungen einer auf dem gleichen Endgerät, aber von der Assistenzapplikation unabhängig operierenden Navigationssoftware ausgelesen. Die der Assistenzapplikation weitergeleiteten Routeninformationen wurden mit den referenzierten Signaldaten verknüpft, um anschließend genau den richtigen Signalgeber einzubeziehen und richtungsbezogene Fahrerinformationen zu generieren. Ein Ansatz zur Überwachung, Filterung und Weiterverarbeitung von Routenempfehlungen einer unabhängig laufenden Navigationssoftware wurde erstmals in [RUDOLPH / HOYER-2013] vorgestellt. Das Verfahren wurde fortwährend weiterentwickelt. Umfangreiche Tests der aktuellen Version weisen die Machbarkeit und die Zuverlässigkeit des Ansatzes nach.

Es wird deutlich, dass eine möglichst fehlerfreie LSA-bezogene Fahrerassistenzfunktion auf dem Smartphone von vielen Faktoren abhängig ist. Die Entwicklung derartiger Assistenzfunktionen ist aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten zu anderen Komponenten nur im funktionierenden System realisierbar. Zudem ist die Erprobung einer noch in der Entwicklung befindlichen Applikation für ein kooperatives System im fließenden Verkehr mit Schwierigkeiten behaftet. Allein die im Realverkehr fehlende Reproduzierbarkeit der Eingangsdaten macht eine gezielte Fehlersuche bei der Softwareentwicklung nahezu unmöglich. Neben den zu befürchtenden Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit sind Erprobungsfahrten zeit- und damit kostenintensiv. Um fehlerhaft spezifizierte und implementierte Funktionen im Vorfeld zu identifizieren und zu beheben, ist es sinnvoll, die einzelnen Hard- und Softwarekomponenten eins zu eins in eine mikroskopische Verkehrssimulation einzubinden. Ein entsprechender Ansatz wurde u. a. in [OTTO / HOYER-2009] und in [OTTO-2011] vorgestellt. In dem sogenannten Devices-in-the-Loop-Ansatz (DiL-Ansatz) wurden alle infrastruktur- und fahrzeugseitigen benötigten Geräte (engl.: Devices), identisch dem später im Feldversuch eingesetzten Systemaufbau, in einer Testumgebung verknüpft. Sämtliche Funktionalitäten der Geräte und der Kommunikationspfade zwischen den Geräten entsprechen exakt dem späteren realen System. Allein der Verkehrsablauf wurde in der DiL-Testumgebung simuliert und in diesen Kreislauf (engl.: Loop) eingespeist. Da der Datenaustausch hier auf bidirektionalem Wege zwischen dezentralen infrastruktur- und fahrzeugseitigen Geräten erfolgte, musste dieser Ansatz für das im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzte und entwickelte zentralenbasierte kooperative System erweitert werden. Eine entsprechenden erweiterten Ansatz liefert die sogenannte Extendend-Devices-in-the-Loop-Testumgebung (xDiL-Testumgebung), welche im Rah-

men eigener Forschungsarbeiten entstand und für die Entwicklung der Fahrerassistenzfunktionen genutzt wurde. Neben angepassten, nunmehr standardisierten Kommunikationsprotokollen wie bspw. TPEG-TSI⁴⁷ wurden hier die zusätzlichen Funktionalitäten des Dienstbieters in einem Kontroll- und Kommunikationsmodul nachgebildet sowie ein Webserver implementiert. Die wichtigsten Prozesse innerhalb der xDiL-Testumgebung sollen anhand des Sequenzdiagramms in Abbildung 4.5 und des Systemaufbaus im Anhang F veranschaulicht werden. Das Kontroll- und Kommunikationsmodul ist direkt an die Simulationssoftware angebunden und extrahiert relevante Informationen aus der Verkehrssimulation und der Signalsteuerung. So werden von einem bestimmten Fahrzeug in der Simulation fortwährend kartesische Koordinaten zu GPS-Koordinaten umgewandelt und über WLAN an das Smartphone versendet. Aufgrund des mit dem Testfeld identischen Simulationsmodells kann das Smartphone nicht unterscheiden, ob es sich um reale oder simulierte Positionen handelt. Um die Signalisierungsdaten der stromabwärtigen LSA zu erhalten, muss das mobile Endgerät seine aktuellen Positionsdaten zusammen mit der Fahrtrichtung als Anfrage an den Webserver schicken (① in Abbildung 4.5). Dies erfolgt ebenfalls über WLAN. Sobald die Anfrage beim Webserver eingegangen ist, ruft das Kontroll- und Kommunikationsmodul anhand der gesendeten Positionsdaten weitere fahrzeug- und routenbezogene Informationen vom Simulationscomputer ab. Es werden ein Kartenauszug bis zur nächsten LSA und topologische Daten des Knotenpunkts wie bspw. mögliche Abbiegebeziehungen sowie die Schaltzeitpunkte aller Signalgruppen der jeweiligen LSA-Zufahrt extrahiert. In der Simulation wurden ausschließlich festzeitgesteuerte LSA berücksichtigt. Aus diesem Grund konnte auf eine Prognose der Schaltzeitpunkte verzichtet werden. Die extrahierten Daten werden zusammengefasst als Antwort im XML⁴⁸-Format an das Smartphone zurückgeschickt (② in Abbildung 4.5). Die Antworten müssen im Endgerät zur Generierung und Ausgabe von Fahrerinformationen entsprechend weiterverarbeitet werden. Beispielhaft umgesetzte Fahrerassistenzfunktionen werden in Abschnitt 4.4 vorgestellt.

⁴⁷ TPEG-TSI - "Transport Protocol Experts Group - Traffic Signal Information", Übertragung aktueller und zukünftiger LSA-Schaltzeiten

⁴⁸ XML - "Extensible Markup Language", erweiterbare Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdateien

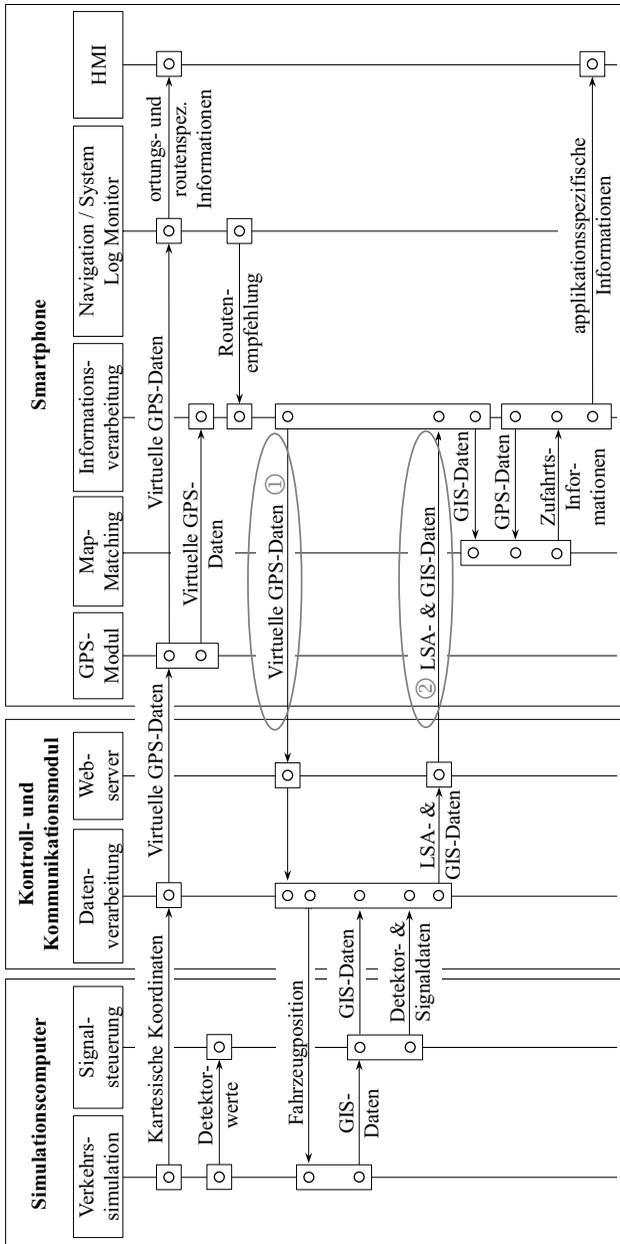


Abbildung 4.5: Sequenzdiagramm - xDiL

Wie die Untersuchungen in [OTTO-2011] und [RUDOLPH / LEITZKE / HOYER-2013] zeigen, sind der DiL- und der xDiL-Ansatz nützliche Werkzeuge zur Entwicklung von Fahrerassistenzfunktionen auf dem Endgerät. Die Reproduzierbarkeit von Fahrsituationen in der virtuellen Testumgebung ermöglicht überhaupt erst eine schnelle Fehlerbehebung. Es ist jedoch nicht möglich, alle Fehler wie bspw. wechselnde Verbindungsqualitäten in der Simulation nachzubilden. Aus diesem Grund kann nicht gänzlich auf Feldtests im realen Straßennetz verzichtet werden, wenngleich durch die Verwendung der genannten Testumgebung weniger Test- und Erprobungsfahrten notwendig sind. Abschließend ist zusammenzufassen, dass die Entwicklung von LSA-bezogenen Fahrerassistenzfunktionen aufgrund der hohen Komplexität sehr anspruchsvoll ist, sich der Aufwand jedoch durch die Verwendung der genannten Testumgebung auf ein erträgliches Maß reduzieren lässt.

4.4 Umsetzung und Erprobung der Fahrerassistenzfunktionen

Wie bereits beschrieben liegt die Grundidee der Fahrerassistenzfunktionen in der Bereitstellung von individuellen Geschwindigkeitsempfehlungen, welche die zukünftigen Signalzustände vorausliegender LSA berücksichtigen. Auf Basis der Signalisierungsdaten sollen emissionsreduzierte Fahrten über mehrere Lichtsignalanlagen ermöglicht werden. Die Abbildungen 4.6, 4.7 und 4.8 zeigen beispielhafte HMI-Varianten kooperativer Fahrerassistenzfunktionen. Diese entstanden im Ergebnis eigener Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für eine Smartphoneapplikation im Rahmen des UR:BAN-VV-Teilprojektes "Urbane Straße". Im Hintergrund ist jeweils die Karte einer unabhängig laufenden Navigations-App und die aktuelle Position (grüner Pfeil bei Fahrt bzw. Kreis bei Stillstand) zu sehen. Im Vordergrund ist die Fahrerassistenz-App im transparenten Stil angeordnet. Je nach der aktuellen Lage in der Grünen Welle werden im Vordergrund Fahrereinformationen als halbtransparente Texte und/oder Grafiken angezeigt.

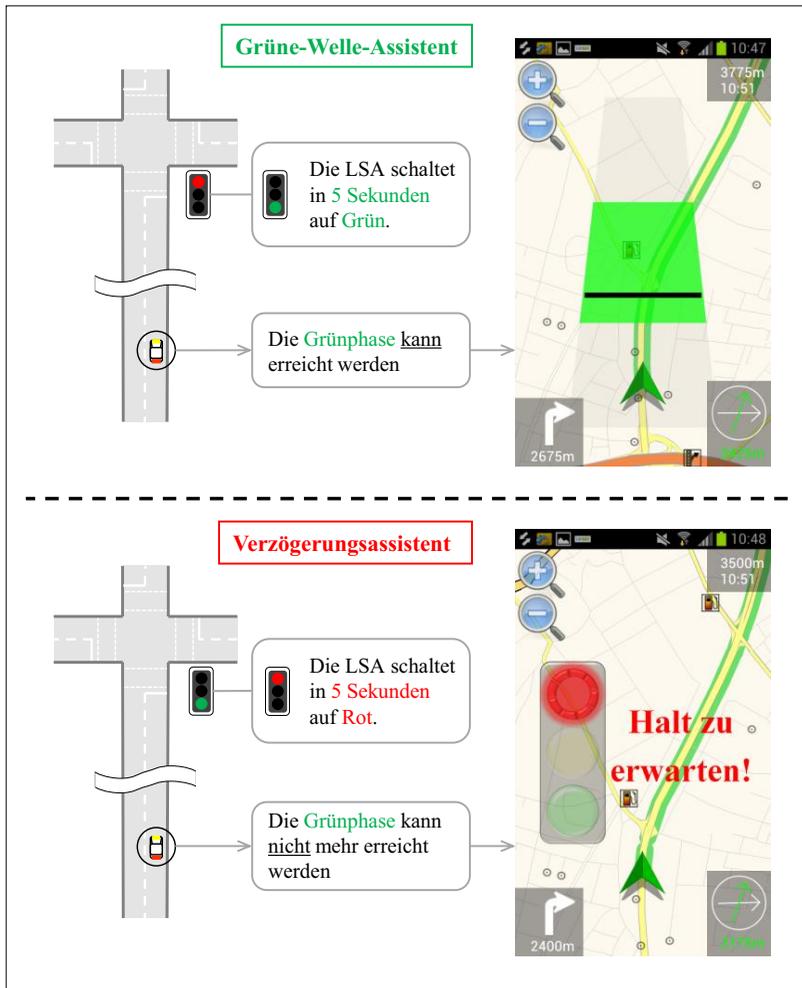


Abbildung 4.6: Grüne-Welle-Assistent und Verzögerungsassistent auf dem Smartphone

Im oberen Teil der Abbildung 4.6 ist der sogenannte Grüne-Welle-Assistent dargestellt. Das HMI zeigt u. a. einen Grünbandteppich, dessen Höhe sich aus der Grünzeit der stromabwärtigen LSA ergibt. Die Höhe bzw. Form des Teppichs verändert sich während der Zufahrt auf eine LSA nicht. Des Weiteren ist ein schwarzer Balken zu sehen, mit dem die aktuelle Lage des Fahrzeuges in der Grünen Welle verdeutlicht wird. Im Gegensatz zum Teppich behält der Balken seine Position nicht bei, sondern bewegt sich je nach aktueller Geschwindigkeit auf und ab. Die fortlaufende Berechnung der Posi-

tion des Balkens erfolgt unter Berücksichtigung des Abstandes zur nächsten Haltlinie, der gefahrenen Geschwindigkeit und des Grünzeitbeginns sowie des Grünzeitendes der stromabwärtigen LSA. Befindet sich der Positionsbalken außerhalb des grünen Bereichs, würde der Fahrer unter Beibehaltung seiner Geschwindigkeit während der Sperrzeit an der nächsten LSA ankommen. Der Fahrer müsste entweder beschleunigen (Balken steigt nach oben) oder abbremsen (Positionsbalken sinkt nach unten), um in den grünen Bereich zu gleiten. Dies verdeutlicht, dass mit dem Grüne-Welle-Assistenten indirekt ein Geschwindigkeitsbereich empfohlen wird, bei dessen Einhaltung die nächste LSA ohne Halt überquert werden kann. Der Assistent wird sofort deaktiviert, wenn der Fahrer die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreitet. Zudem wird die Grüne-Welle-Information nur angezeigt, wenn der berechnete Geschwindigkeitskorridor zwischen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und einer vorab festgelegten minimal akzeptierten Geschwindigkeitsgrenze liegt. Die Akzeptanzgrenze der Geschwindigkeitsempfehlung hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab [OTTO-2011]. Im Folgenden wird die minimale Akzeptanzgrenze mit 60 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit festgesetzt.

Befindet sich der zu empfehlende Geschwindigkeitskorridor unterhalb der minimal akzeptierten Geschwindigkeit, wird dem Fahrzeuglenker angedeutet, dass ein "Halt zu erwarten" ist. Der Grüne-Welle-Assistent wird hierbei vom sogenannten Verzögerungsassistenten abgelöst. Der Verzögerungsassistent wird auch aktiviert, wenn wie im unteren Teil der Abbildung 4.6 dargestellt, die Grünphase nicht mehr erreicht werden kann.

Bei dem hier vorgestellten Konzept können auch unsichere Grünzeitbereiche dargestellt werden. Diese unsicheren Bereiche resultieren dabei aus einer Schaltzeitprognose von verkehrabhängigen LSA [WEISHEIT-2014]. Sie beziehen sich dabei auf diskrete Werte der Grünwahrscheinlichkeitsverteilung und werden wie in Abbildung 4.7 dargestellt mit helleren Grüntönen bzw. durch höhere Transparenzgrade im Grünbandteppich repräsentiert (hier: zwei Stufen mit einer Grünwahrscheinlichkeit von 80 % und 95 %).

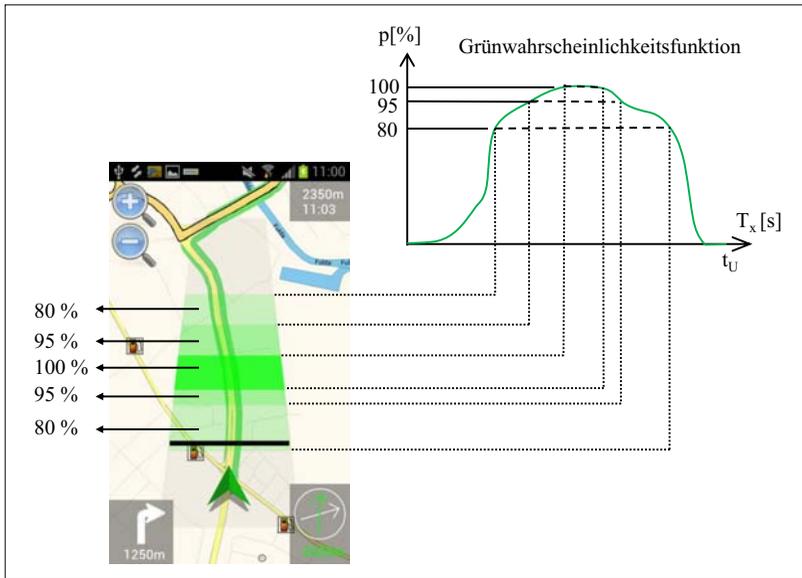


Abbildung 4.7: Darstellung von Unsicherheitsbereichen beim Grüne-Welle-Assistenten

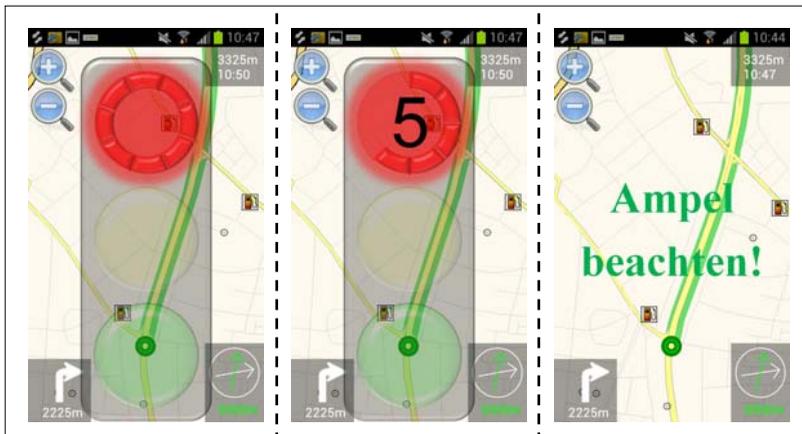


Abbildung 4.8: Restzeitinformationen auf dem Smartphone

Sobald das Fahrzeug vor der LSA zum Stillstand gekommen ist, werden Informationen zur verbleibenden Restrotzeit ausgegeben. Die Restzeitinformationen können, wie auf der linken Seite in Abbildung 4.8 dargestellt, mit einem Signalgeber visualisiert werden. Der

rote Bereich des Signalgebers beinhaltet einen abgesetzten Kreisring bestehend aus acht Segmenten. Beträgt die Rotzeit über acht Sekunden, rotiert dieser Ring. Das mittlere HMI in Abbildung 4.8 zeigt den Countdown, der ab einer Restrotzeit von acht Sekunden aktiviert wird. Während des Countdowns nehmen die Segmente im Kreisring sekundlich ab und die Restzeit wird in Sekunden durch eine Ziffer dargestellt. Ab einer verbleibenden Rotzeit von zwei Sekunden wird der Hinweis "Ampel beachten" gegeben (rechts in Abbildung 4.8). Die Restrotzeitinformation gibt dem motorisierten Verkehr die Möglichkeit einer manuellen Motorabschaltung. Die beispielhaften HMI geben einen ersten Eindruck über das Potenzial der Fahrerbeeinflussung im Hinblick auf die Umweltwirkungen. So kann auch ohne einen direkten Eingriff in die Fahrzeugsteuerung durch die individuelle Anpassung der Geschwindigkeit und durch das Ausschalten des Motors der Kraftstoffverbrauch sowie die Emissionen reduziert werden.

Da in der oben genannten Simulations- und Testumgebung nicht alle Fehler wie bspw. wechselnde Verbindungsqualitäten abgedeckt werden konnten, wurden auch Erprobungsfahrten sowie ein Feldtest im realen Straßenverkehr im Kassel und Düsseldorf durchgeführt. Die beiden Städte bildeten die Prüf- bzw. Testfelder des in UR:BAN-VV entwickelten zentralenbasierten kooperativen Systems. Auf ausgewählten Streckenabschnitten mit mehreren LSA konnten alle im Forschungsprojekt entwickelten Komponenten und Applikationen getestet und demonstriert werden. Während der Testfahrten wurden kontinuierlich Logdateien erstellt, welche die erhaltenen Signalisierungsdaten, die ausgegebenen Fahrerinformationen und Fahrtverlaufsdaten protokollierten. Durch die Auswertung der Protokolldateien der Test- und Erprobungsfahrten konnten weitere in der Simulationsumgebung nicht abgedeckte Fehlerquellen identifiziert und daraufhin weitere Programmoptimierungen vorgenommen werden. Ein nachfolgend durchgeführter Feldtest mit mehreren Testfahrern verdeutlichte die Zuverlässigkeit der Smartphoneapplikation und lieferte erste Anhaltspunkte über die Verhaltensweisen der Testfahrer im Hinblick auf die ausgegebenen Fahrerinformationen, welche an späterer Stelle der Arbeit aufgegriffen und diskutiert werden.

4.5 PVD-basierte Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen

Wie bereits beschrieben sendet das ausgestattete Fahrzeug mobil erfasste Daten (PVD) an die Verkehrszentrale bzw. an den Diensteanbieter, um im Gegenzug Signalisierungsinformationen zu erhalten. Die mobil erfassten Daten stammen aus der Fahrzeugortung und umfassen neben der aktuellen Position als geographische Breite und Länge sowie der Fahrtrichtung auch einen Zeitstempel der Anfrage sowie eine Identifikationsnummer. Daraus lassen sich Informationen wie der Abstand des Fahrzeuges zur nächsten Haltlinie

oder fahrzeugindividuelle Kenngrößen wie Reisezeit, Wartezeit, Anzahl der Halte oder Rückstaulänge ableiten. Infrastrukturseitig können diese individuellen Kenngrößen zur Abbildung und Bewertung des Verkehrsablaufes und zur Optimierung der Lichtsignalsteuerung verwendet werden. Inwieweit die mobil erfassten Daten zur Qualitätsanalyse von koordinierten Signalisierungen beitragen können, ist bislang weitgehend unerforscht und soll in den nachfolgenden Kapiteln untersucht werden.

Die mobil erfassten Daten, die in Abbildung 4.1 als PVD bezeichnet sind, werden in der Verkehrszentrale analog zu den LSA- und Geoinformationen in einer Datenbank gespeichert. Die PVD bilden zusammen mit den Daten aus dem Geoinformationssystem (GIS) sowie den tatsächlichen Schaltzeiten der LSA die Grundlage für die Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen. Die Qualitätsbewertung der Signalisierung ist der Schwerpunkt der nachfolgenden Kapitel.

4.6 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde die im Rahmen des UR:BAN-VV Teilprojektes “Urbane Straße“ entwickelte telematische Lösung eines zentralseitigen kooperativen Systems aufgegriffen und mit Blick auf die Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen in Teilen modifiziert. Wie auch bei den dezentralen kooperativen Systemen wurde bei der hier behandelten Lösung eine Win-Win-Situation angestrebt. Ein wesentlicher Aspekt lag dabei in der Gewinnung von mobil erfassten Daten, die erstmalig in die Bewertung koordinierter Lichtsignalsteuerungen einfließen sollen. Der Ansatz zeigt, dass beide Kommunikationspartner von dem gegenseitigen Datenaustausch profitieren. Anhand des Konzeptes sowie der Systemarchitektur lässt sich die bidirektionale Vernetzung der kooperativen Fahrzeuge und der zentralen Komponente erkennen. Ein im Verkehr fließendes Fahrzeug bzw. mitfahrendes Endgerät sendet Positionsdaten an die Zentrale, die zur Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen verwendet werden können. Im Gegenzug erhält das kooperative Fahrzeug respektive das Endgerät Signalisierungsdaten der stromabwärtigen LSA. Der Fahrer kann mit Hilfe der daraus abgeleiteten Informationen die Geschwindigkeit des Fahrzeuges so anpassen, dass Emissionen und der Kraftstoffverbrauch reduziert werden können. Dessen ungeachtet sind der verkehrliche Aspekt und das Potenzial von kooperativ gewonnenen Kenngrößen zur Qualitätsbewertung der Koordinierung genauer zu quantifizieren. Dies wird Gegenstand der nächsten Kapitel sein.

Der Einblick in die funktionalen und technischen Voraussetzungen zeigt, dass die Einführung solcher Systeme mit entsprechendem Aufwand möglich ist. Das zentralenbasierte kooperative System lässt sich bei Verwendung von Verkehrsrechnern ab 2006 aus infrastruktureller und kommunikationstechnischer Sicht in die bestehende Infrastruktur integrieren. Die technischen Voraussetzungen erfüllen über die Hälfte aller deutschen

Städte mit mehr als 50.000 Einwohnern. Ferner müssen die LSA an die Verkehrszentrale angebunden sein. Nur über diese direkte Verbindung können Informationen über den Signalstatus, den Wechsel der Signalzustände, die Detektoreignisse etc. gesammelt und im Rahmen der kooperativen Systeme zentralseitig weiterverwendet werden. Eine womöglich größere Herausforderung besteht beim Datenaustausch und in der zentralseitigen Daten- und Servicebereitstellung. Neben der Sammlung relevanter Infrastruktur- und Fahrzeugdaten müssen unter Anwendung von Schaltzeit- und Rückstauprognosen routenspezifische LSA-Daten generiert und zum fahrerseitigen Endgerät übertragen werden.

Die im Endgerät zu implementierenden Fahrerassistenzfunktionen zeichnen sich durch eine hohe Komplexität des Zusammenspiels verteilter Funktionen einschließlich der Sensoren sowie durch die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug aus. Im Hinblick auf deren Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr ist die Beherrschung dieser Komplexität während des Entwicklungsprozesses eine große Herausforderung. Die Fahrerassistenzfunktionen auf dem Endgerät sind auf den zeitlich genau abgestimmten Daten-Input anderer Komponenten angewiesen. Dank der Nutzung konventioneller Hardware (Smartphone) und Kommunikationstechniken (Mobilfunktechnologie) sowie einer Simulations- und Testumgebung (xDiL-Ansatz) konnten aufwendige Entwicklungsarbeiten der Fahrerassistenzfunktionen minimiert werden.

In der Untersuchung wurde deutlich, dass sich Smartphones aus technischer Sicht als Endgerät eines kooperativen Systems zur LSA-bezogenen Fahrerassistenz eignen. Durch die hohe Anzahl von Smartphone-Nutzern kann eine breite Masse potenzieller Anwender adressiert werden. Dies ist wiederum für den Straßenbaulastträger von Interesse, da ein städtisches Verkehrsmanagement im Hinblick auf die Analyse und Steuerung des Verkehrsablaufes erst ab einer bestimmten Anzahl an Anwendern profitiert (siehe Abschnitt 3.4). Demzufolge könnte dies ein Anreiz für den Straßenbaulastträger sein, in den notwendigen Ausbau der Infrastruktur zu investieren.

5 Verkehrliche Wirkungen der Fahrerbeeinflussung durch Assistenzfunktionen

5.1 Problemstellung

Die Ausführungen in Kapitel 4 haben gezeigt, dass sich das vorgestellte zentralenbasierte kooperative System unter gewissen Voraussetzungen mit vertretbarem Aufwand umsetzen lässt. Dabei wurde zunächst der Nutzen des informierten Fahrers herausgestellt. Vom wechselseitigen Datenaustausch soll allerdings auch der Infrastrukturbetreiber profitieren. Der Grundgedanke besteht darin, die von den entsprechend ausgestatteten Fahrzeugen übermittelten PVD zur Qualitätseinschätzung signalisierter Straßennetze heranzuziehen. Es sollen möglichst die in Abschnitt 2.4.6 erläuterten Bewertungsansätze nach dem HBS [FGSV-2009], nach Brilon und Schabel [BRILON / SCHNABEL-2003] sowie nach Robertson [ROBERTSON-1969] Anwendung finden. Hierbei sind im Wesentlichen folgende Dinge zu beachten:

1. Die PVD stammen ausschließlich von ausgestatteten Fahrzeugen. Die PVD bzw. die abgeleiteten Qualitätskenngrößen des Verkehrsablaufs stellen nur eine Zufallsstichprobe dar.
2. Die PVD-liefernden Fahrzeuge verfügen über die in Abschnitt 4.4 vorgestellten Fahrerassistenzfunktionen. Infolge dieser Funktionen können die ausgestatteten Fahrzeuge ein der Signalisierung angepasstes Bewegungsprofil aufweisen. Das geänderte Bewegungsprofil hängt dabei von der Verhaltensweise des Fahrzeugführers (Befolgungsgrad) bezüglich der ausgegebenen Geschwindigkeitsempfehlungen ab.
3. Die oben genannten Verfahren bewerten die koordinierte Signalisierung ausgewählter Streckenzüge über den dort vorhandenen Verkehrsablauf. Hierbei wird ebenfalls nur eine Teilmenge einer Grundgesamtheit wie bspw. eine bestimmte Anzahl an Messfahrten berücksichtigt. Die Messfahrten erfolgten bisher ohne die Verwendung der vorgestellten Assistenzfunktionen. Es ist unerforscht, ob sich die PVD, welche von Fahrzeugen mit entsprechenden Assistentenfunktionen stammen, als Input-Daten für die etablierten Verfahren eignen.

Die Ausführungen in Kapitel 2 zeigten, dass die etablierten Verfahren zur Bewertung von koordinierten LSA in erster Linie die Qualität des Verkehrsablaufes auf der untersuchten Strecke bewerten, um darauf aufbauend die Wirksamkeit einer Koordinierung abzuleiten. Die Effektivität der koordinierten Lichtsignalsteuerung wird also indirekt über den echten Verkehr bestimmt. Infolgedessen werden im vorliegenden Kapitel zunächst die Wirkungen der Fahrerbeeinflussung auf den Verkehrsablauf der gesamten Strecke analysiert. Im Fokus stehen die für die Koordinierungsbewertung relevanten Kenngrößen Anzahl der Halte, mittlere Reisegeschwindigkeit, durchschnittliche Wartezeit und der Performance Index.

5.2 Simulationsumgebung

5.2.1 Simulationssoftware und Untersuchungsszenarien

Zur Untersuchung der verkehrlichen Wirkungen einer Fahrerbeeinflussung, welche durch die Bereitstellung von Geschwindigkeitsempfehlungen erfolgt, wurden Simulationsuntersuchungen diverser Szenarien durchgeführt. Hierfür wurden die wesentlichen Bestandteile des zentralenbasierten kooperativen Systems in eine mikroskopische Simulationsumgebung auf Basis der Simulationssoftware VISSIM⁴⁹ 5.40 integriert. Über die offene VISSIM-COM-Schnittstelle⁵⁰ wurden die Simulationen mit einer externen Programmierumgebung⁵¹ gesteuert. In die eigens entwickelte mikroskopische Simulationsumgebung konnten somit die Ansätze der Fahrerbeeinflussung infolge der in Abschnitt 4.4 vorgestellten Fahrerassistenzfunktionen abgebildet werden. Dieses Vorgehen ermöglicht eine nachträgliche Qualitätsbewertung des Verkehrsablaufs respektive der verwendeten LSA-Koordinierung. Durch die kontinuierliche Dokumentation von Fahrtverlaufsdaten aller in der Simulation befindlichen Fahrzeuge können diverse Verkehrskenngrößen zur Beurteilung des Gesamtverkehrs berechnet werden. Zur Untersuchung des Einflusses des Fahrverhaltens der informierten Fahrer auf den Gesamtverkehr wurde der Verkehrsablauf auf fiktiven Streckenzügen mit zwei festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen simuliert. Dabei wurden die Streckenlänge bzw. die Abstände der Haltlinie variiert. Eine schematische Darstellung des Simulationsmodells mit einstreifiger Streckenführung ist Abbildung 5.1 zu entnehmen.

⁴⁹ VISSIM - "Verkehr in Städten - Simulationsmodell", Verkehrsfluss-Simulationssoftware der PTV Planung Transport Verkehr AG

⁵⁰ Die COM-Schnittstelle ist ein Zusatzmodul, welches die Nutzung einer externen Programmierumgebung erlaubt. Es können Aufgaben in VISSIM automatisiert werden, indem COM-Kommandos vom externen Programm aus gestartet werden [PTV-2011].

⁵¹ unter Anwendung von Microsoft Visual C# 2010

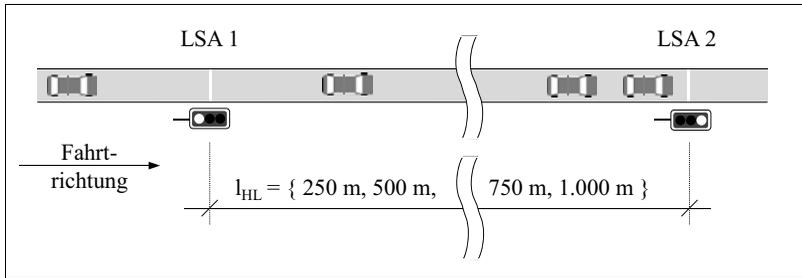


Abbildung 5.1: Simulationsmodell und Streckenszenarien

Insgesamt wurden vier Streckenszenarien mit Haltlinienabständen l_{HL} von 250 m, 500 m, 750 m sowie 1.000 m und mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h untersucht. Eine größere Ausdehnung der Streckenzüge ist nicht zwingend erforderlich, da Knotenpunktabstände über 1.000 m im innerstädtischen Straßennetz selten vorzufinden sind und zudem gemäß HBS empfohlen wird, diesen maximalen Abstand bei der Planung einer Koordinierung nicht zu überschreiten [FGSV-2009].

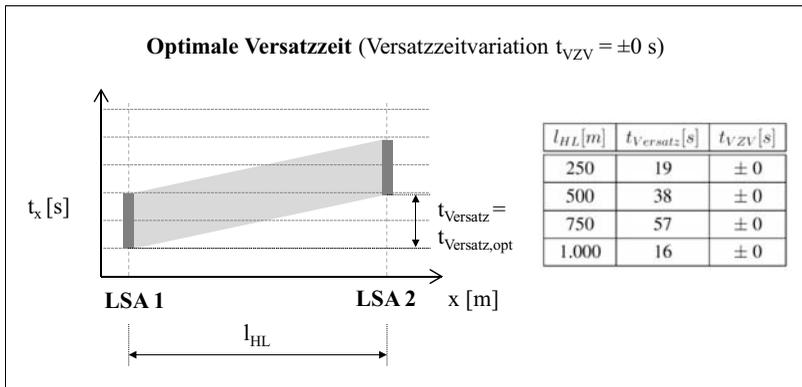


Abbildung 5.2: Optimale Versatzzeit

Die zwei in der Simulation untersuchten Lichtsignalanlagen sind mit identischer Umlaufzeit von 60 s und einer Freigabezeit von 20 s festzeitgesteuert. Zunächst wurde für jede der vier Streckenlängen die optimale Versatzzeit $t_{versatz,opt}$ unter Anwendung der Gleichung 2.4 berechnet. Die Progressionsgeschwindigkeit v_P beträgt 47,5 km/h, was 95 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit entspricht. Die planerische Konstruktion der optimalen Versatzzeit $t_{versatz,opt}$ sowie die einzelnen Werte sind in Abbildung 5.2 dargestellt.

Um verschiedene Güteklassen der Grünen Welle abbilden zu können, wurde der Freigabebereich an der zweiten LSA variiert. Hierbei wurde der Grünanfang in positive und in negative Richtung verschoben. Die Verschiebung der Grünzeiten wird auch als Versatzzeitvariation (VZV) bezeichnet, welche zum besseren Verständnis in Abbildung 5.3 dargestellt ist.

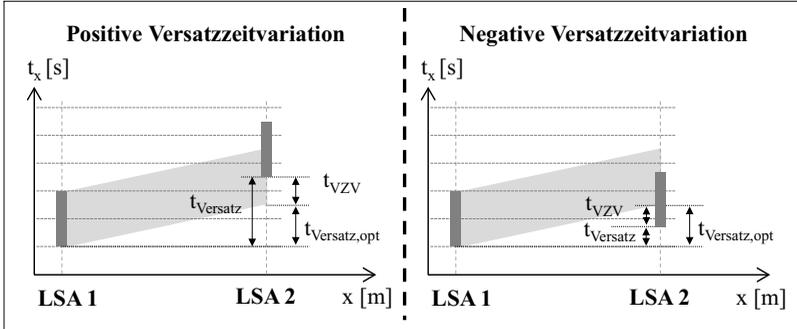


Abbildung 5.3: Positive und negative Versatzzeitvariation

Die tatsächliche Versatzzeit t_{Versatz} errechnet sich nach Gleichung 5.1.

$$t_{\text{Versatz}} = (t_{\text{Versatz,opt}} + t_{\text{VZV}}) \bmod t_U \tag{5.1}$$

Die Grünanfänge wurden schrittweise im Abstand von jeweils 3 s in die positive als auch in die negative Richtung verschoben. Daraus ergeben sich gemäß Tabelle 5.1 pro Streckenszenario 20 VZV-Szenarien.

Tabelle 5.1: VZV-Szenarien

VZV-Szenario		1	2	...	9	10	11	12	13	...	19	20
l_{HL} [m]	t_{VZV} [s]	-30	-27	...	-06	-03	± 00	+03	+06	...	+24	+27
250	t_{Versatz} [s]	49	52	...	13	16	19	22	25	...	43	46
500		8	11	...	32	35	38	41	44	...	2	5
750		27	30	...	51	54	57	60	3	...	21	24
1.000		46	49	...	10	13	16	19	22	...	40	43

Wie in den aufgeführten Grundlagen zur Planung der Koordinierung (Abschnitt 2.4.2) beschrieben, liegt die Grenze der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit der Koordinierung bei

einem maximalen Sättigungsgrad α von 85 % [FGSV-2010]. Dieser Wert soll der Simulationsuntersuchung als Standardparameter zugrunde liegen. Die Zuflussverkehrsstärke q_Z für den Streckenzug ergibt sich nach folgender Gleichung.

$$q_Z = \frac{t_{Gr} \cdot q_S \cdot \alpha}{t_U} \quad (5.2)$$

mit:

α ... Auslastungsgrad der Freigabezeit [-]

q_S ... Sättigungsverkehrsstärke [Fz/h]

q_Z ... Zuflussverkehrsstärke [Fz/h]

t_{Gr} ... Freigabezeit [s]

t_U ... Umlaufzeit [s]

Die Berechnung der Zuflussverkehrsstärke q_Z erfolgt mit dem Ziel, einen Auslastungsgrad α von 85 % zu erreichen. Für die in der Simulation vorliegenden Randbedingungen kann nach dem HBS zunächst ein Zeitbedarfswert τ_B von 1,8 s/Fz und eine Sättigungsverkehrsstärke q_S von 2000 Fz/h angenommen werden [FGSV-2009]. Ausgehend von diesen Annahmen ergibt sich die Zuflussverkehrsstärke q_Z zu 567 Fz/h, welche als Standardwert in allen Simulationsszenarien (SSZ) festgelegt wurde. Eine stichprobenartige Auswertung der Simulationsergebnisse hat gezeigt, dass sich in der Simulation ebenfalls ein mittlerer Zeitbedarfswert τ_B von ca. 1,8 s/Fz ergab. Durch die zusätzliche Variation der Verkehrsstärke konnte zudem aufgezeigt werden, dass sich mit der errechneten Zuflussverkehrsstärke q_Z von 567 Fz/h ein gesättigter, aber nicht übersättigter Verkehrsfluss einstellt. Neben der Standardbelastung wurden zwei weitere Auslastungsszenarien mit Sättigungsgraden von 25 % und 50 % betrachtet.

Zusätzlich zu den vier Streckenszenarien und zu den 20 VZV-Szenarien wurden insgesamt jeweils zwölf weitere Szenarien mit unterschiedlichen Ausstattungsraten β von 0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 10 %, 15 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 % untersucht. Die Ausstattungsrate ist der Anteil der informierten Fahrer, die über zusätzliches Wissen aus der kooperativen LSA verfügen.

Die Simulationsdauer betrug je Simulationslauf und Untersuchungsstrecke 4.000 s. Von der Gesamtsimulationszeit wurden 400 s zum Befüllen der Strecke genutzt, welche nicht in die Auswertung eingingen. Alle relevanten Verkehrskenngrößen konnten aus dem VISSIM-Fahrzeugprotokoll abgeleitet werden.

Unter Berücksichtigung aller Szenarien und der unterschiedlichen Ausstattungsraten wurden in Summe 2.880 Einzelsimulationen durchgeführt. Im Hinblick auf die nachfolgende Untersuchung wurde pro Szenario jeweils ein Wert für die entsprechenden Bewertungskenngrößen (Durchfahrten ohne Halt, mittlere Reisegeschwindigkeit etc.) simulativ ermittelt. Dieser stellt in den meisten Fällen einen gemittelten Wert über die gesamte Si-

des Grüne-Welle-Assistenten erhält der Fahrer den Hinweis über den Grüne-Welle-Geschwindigkeitskorridor (v_{RGE} bis v_{RGA}). Durch diese Empfehlung kann der Fahrer seine Geschwindigkeit anpassen und den unnötigen Halt vermeiden. Die Geschwindigkeitsanpassung erfolgt in der Simulation über die Änderung des Simulationsparameters Wunschgeschwindigkeit⁵² v_{Wunsch} . Hierfür wird für jedes ausgestattete Fahrzeug nach dem Passieren der ersten Haltlinie die passende Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der aktuellen Entfernung zur LSA und der bevorstehenden Signalisierung berechnet. Liegt die errechnete Geschwindigkeit über der minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung $v_{min,akz}$ und unterhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit v_{zul} , so wird die Wunschgeschwindigkeit v_{Wunsch} mit diesem Wert ersetzt. Andernfalls bleibt die jeweilige voreingestellte Wunschgeschwindigkeit bestehen.

Die Berechnung und Anpassung der Wunschgeschwindigkeit v_{Wunsch} des jeweiligen kooperativen Fahrzeugs erfolgt sekundlich. Die einzelnen Berechnungsschritte sollen im Folgenden erläutert werden. Das (Programm-)Ablaufdiagramm ist im Anhang H zu finden. Zunächst ist der räumliche Abstand des Fahrzeuges bis zur stromabwärtigen Haltlinie zu ermitteln. In der Realität ist hierfür ein Map-Matching durchzuführen. Bei der Simulation hingegen sind die Entfernungen $d_{Fz \rightarrow HL}$ durch eindimensionale Positionsangaben des Fahrzeuges x_{Fz} und der Haltlinie x_{HL} bezogen auf die Strecke relativ einfach nach Gleichung 5.3 zu berechnen.

$$d_{Fz \rightarrow HL} = x_{Fz} - x_{HL} \tag{5.3}$$

mit:

- $d_{Fz \rightarrow HL}$... Abstand des Fahrzeuges zur Haltlinie [m]
- x_{Fz} ... Position des Fahrzeuges [m]
- x_{HL} ... Position der Haltlinie [m]

Neben dem Abstand sind die verbleibende Restzeit bis zum nächsten Grünanfang t_{RGA} sowie die Restzeit bis zum nächsten Grünende t_{RGE} der stromabwärtigen LSA zu berechnen. Dabei ist der gegenwärtige Signalstatus zunächst irrelevant. Die Restzeiten errechnen sich über die aktuelle Umlaufsekunde t_x , über die Umlaufsekunde des Signalwechsels t_{GA} bzw. t_{GE} und über eine Restwertbildung mit der Umlaufzeit t_U .

$$t_{RGA} = (t_U + t_{GA} - t_x) \text{ mod } t_U \tag{5.4}$$

⁵² Jedem Fahrzeug wird vor der Einfahrt in das Netz eine bestimmte Wunschgeschwindigkeit unter Annahme einer Gleichverteilung im Bereich zwischen 48 und 58 km/h zugewiesen.

$$t_{RGE} = (t_U + t_{GE} - t_x) \bmod t_U \quad (5.5)$$

mit:

t_{RGA} ... Restzeit bis zum nächsten Grünanfang [s]

t_{RGE} ... Restzeit bis zum nächsten Grünende [s]

t_{GA} ... Umlaufsekunde für Grünanfang [s]

t_{GE} ... Umlaufsekunde für Grünende [s]

t_x ... aktuelle Umlaufsekunde [s]

t_U ... Umlaufzeit [s]

Im folgenden Schritt wird der Geschwindigkeitskorridor für die nächste Grünzeit ermittelt. Ausschlaggebend sind hier die errechneten Restzeiten bis zum nächsten Signalwechsel t_{RGA} bzw. t_{RGE} sowie die aktuelle Distanz bis zur nächsten Haltlinie $d_{Fz \rightarrow HL}$. Die Berechnung des Geschwindigkeitskorridors (v_{RGE} bis v_{RGA}) setzt einen freien Verkehrsfluss ohne Rückstauungen vor den LSA voraus. Diese Vorgehensweise wird anschließend diskutiert.

$$v_{RGE} = \frac{d_{Fz \rightarrow HL}}{t_{RGE}} \quad (5.6)$$

$$v_{RGA} = \frac{d_{Fz \rightarrow HL}}{t_{RGA}} \quad (5.7)$$

mit:

v_{RGA} ... Geschwindigkeit zum Erreichen des Grünanfangs [m/s]

v_{RGE} ... Geschwindigkeit zum Erreichen des Grünendes [m/s]

Unter gewissen Umständen kann es dazu kommen, dass die nächste Grünzeit nicht erreicht werden kann. Dies trifft insbesondere bei großen Distanzen bis zur stromabwärtigen LSA sowie bei bald endender Grünzeit zu. In diesem Fall liegt der ermittelte Geschwindigkeitsbereich (v_{RGE} bis v_{RGA}) über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit v_{zul} . Solange die Geschwindigkeit bis zum nächsten Grünende v_{RGE} größer als die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist, muss die Grünzeit des Folgeumlaufs und der dafür notwendige Geschwindigkeitskorridor ermittelt werden (① im Ablaufdiagramm im Anhang H). Die Berechnung erfolgt analog zur Gleichung 5.6 bzw. 5.7 mit der Bedingung, dass das Vielfache der Umlaufzeit n auf die Zeiten bis zum nächsten Signalwechsel t_{RGA} bzw. t_{RGE} addiert werden müssen.

$$v_{RGE} = \frac{d_{Fz \rightarrow HL}}{t_{RGE} + n \cdot t_U} \quad n \in \mathbb{N} \quad (5.8)$$

$$v_{RGA} = \frac{d_{Fz \rightarrow HL}}{t_{RGA} + n \cdot t_U} \quad n \in \mathbb{N} \quad (5.9)$$

mit:

n ... Vielfache der Umlaufzeit (Wiederholungsanzahl der While-Schleife, siehe ① im Ablaufdiagramm im Anhang H) [-]

Bis zu dieser Stelle wurde der aktuelle Signalstatus noch nicht berücksichtigt. Es besteht die theoretische Möglichkeit, dass sich die errechneten Geschwindigkeiten v_{RGE} bis v_{RGA} auf unterschiedliche Grünzeiten bzw. Umläufe berufen. In diesem Falle wäre v_{RGA} kleiner als v_{RGE} . Zur Korrektur ist v_{RGA} auf den vorherigen Umlauf zu beziehen und nach folgender Gleichung neu zu berechnen.

$$v_{RGA} = \frac{d_{Fz \rightarrow HL}}{t_{RGA} + (n - 1) \cdot t_U} \quad n \in \mathbb{N} \quad (5.10)$$

Im letzten Schritt muss die Wunschgeschwindigkeit v_{Wunsch} entsprechend Gleichung 5.13 neu festgelegt und der Simulation übergeben werden. Die Anpassung dieser Fahrzeuggeschwindigkeit muss mehrere Voraussetzungen erfüllen. Hierbei ist u. a. die Geschwindigkeitsgrenze zu berücksichtigen, die vom Fahrer nicht mehr akzeptiert wird. Diese Akzeptanzschwelle wird im Weiteren als minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung $v_{min,akz}$ bezeichnet.

Die in die Simulation zu übergebende Wunschgeschwindigkeit soll sich zunächst an der maximal möglichen Geschwindigkeit v_{max} orientieren. Es muss überprüft werden, ob v_{RGA} größer gleich als die minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung $v_{min,akz}$ und kleiner gleich als die zulässige Höchstgeschwindigkeit v_{zul} ist.

$$v_{max} = v_{RGA} \quad | \quad v_{min,akz} \leq v_{RGA} \leq v_{zul} \quad (5.11)$$

mit:

$v_{min,akz}$... minimal akzeptierte Geschwindigkeitsempfehlung [m/s]

Wenn der aktuelle Signalstatus bereits grün ist und die Grünphase unter Beibehaltung der aktuellen Geschwindigkeit erreicht werden kann, dann ist v_{RGA} negativ oder unendlich. In diesem Fall muss für die maximal mögliche Geschwindigkeit v_{max} die zulässige Höchstgeschwindigkeit v_{zul} angesetzt werden.

$$v_{max} = v_{zul} \quad | \quad v_{RGA} < 0 \vee v_{RGA} = \infty \quad (5.12)$$

Nach dieser Vorgehensweise könnten die kooperativen ausgestatteten Fahrzeuge nun die größtmöglich zulässige Geschwindigkeit als Wunschgeschwindigkeit zum Passieren der nächsten LSA ohne Stopp zugewiesen bekommen. Dies stellt allerdings nur eine stark vereinfachte und homogene Verhaltensweise der Fahrzeugführer dar. Grundsätzlich kann

davon ausgegangen werden, dass die Fahrer unterschiedlich auf die ausgegebenen Fahrempfehlungen reagieren und dass somit die tatsächlichen Geschwindigkeiten einer gewissen Streuung unterliegen. Darüber hinaus spielt auch die Darstellungsform bzw. das Konzept des HMI eine wesentliche Rolle. Zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit lagen keine eingehenden Untersuchungsergebnisse in Bezug auf die unterschiedlichen Verhaltensweisen des vorgestellten Grüne-Welle-Assistenten auf dem Smartphone vor. Eigens durchgeführte Feldtests mit den in Abschnitt 4.4 entwickelten Fahrerassistenzfunktionen zeigten jedoch, dass sich die Testfahrer nach einer gewissen Nutzungsdauer tendenziell an der größtmöglichen Geschwindigkeit orientierten. Das Ergebnis ist aufgrund eines geringen Stichprobenumfangs nicht repräsentativ. Trotzdem liefern die empirischen Beobachtungen einen ersten Anhaltspunkt. Aus diesem Grund wurden letztendlich 95 % des maximal ermittelten Geschwindigkeitswertes v_{max} in die Simulation als Wunschgeschwindigkeit v_{Wunsch} übertragen.

$$v_{Wunsch} = 0,95 \cdot v_{max} \quad (5.13)$$

Die Akzeptanzgrenze der Geschwindigkeitsempfehlung $v_{min,akz}$ hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Letztendlich lässt sich diese Grenze wegen der unterschiedlichen Fahrertypen und deren Verhaltensweisen nicht verallgemeinern. In einigen Projekten wie bspw. in TRAVOLUTION wurden bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h eine minimale Geschwindigkeitsempfehlung von 30 km/h ausgegeben, um die nicht ausgerüsteten Fahrzeuge nicht übermäßig zu behindern [BRAUN et al.-2009]. In Anlehnung an diese Annahmen wurde für die nachfolgende simulative Untersuchung die minimale Akzeptanzgrenze zu 60 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit als vorläufiger Standardwert festgesetzt. Die größtmögliche implizite Geschwindigkeitsempfehlung entspricht der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Die in der Fahrzeugsimulation angewiesene Wunschgeschwindigkeit liegt demnach im Bereich zwischen 30 und 50 km/h. Die Auswahl der ausgestatteten Fahrzeuge erfolgt nach einem Zufallsprinzip. Durch den externen Eingriff in den Simulationsablauf ist die Simulation auch bei identischer Startzufallszahl nur bei der gleichen Auswahl der kooperierenden Fahrzeuge mit identischem Ablauf wiederholbar.

Rückstaulängen

Verschiedene Untersuchungen jüngster Forschungsprojekte haben gezeigt, dass bei der Anzeige einer Geschwindigkeitsempfehlung auch die aktuelle Rückstaulänge an entsprechender Lichtsignalanlage zu berücksichtigen ist. So reicht es nicht aus, allein auf Basis anstehender Signalzeiten und aktueller Haltlinienentfernungen Verhaltensempfehlungen zu generieren [MENIG-2008; SANTA et al.-2014]. Rückstaus vor LSA können zur Folge

haben, dass die empfohlene Geschwindigkeit gar nicht erreicht bzw. nicht beibehalten werden kann. Abbildung 5.5 verdeutlicht die Problematik.

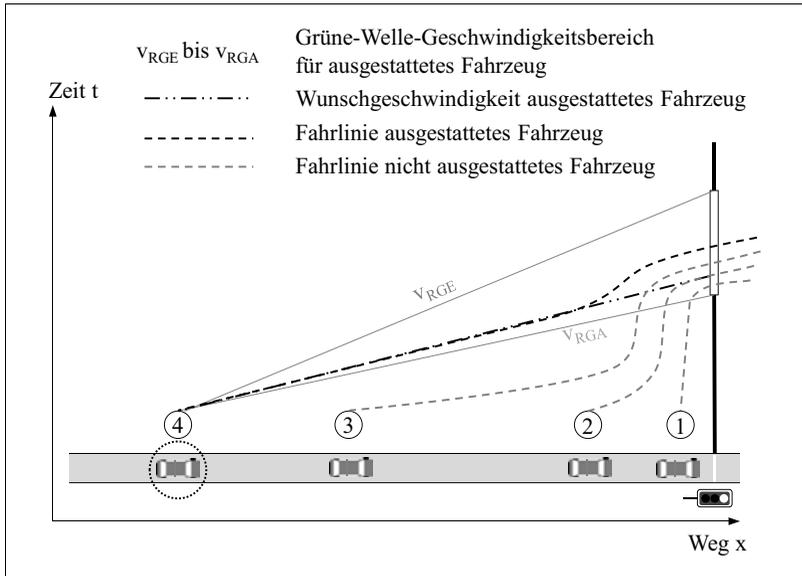


Abbildung 5.5: Fahrlinien mit beeinflussten und unbeeinflussten Fahrzeugen

Die ersten drei Fahrzeuge ①, ② und ③ verursachen einen Rückstau. Das nachfolgende kooperative bzw. kooperierende Fahrzeug ④ kann seine präferierte Wunschgeschwindigkeit nur bis zum Stauende einhalten und muss trotz der Befolgung der Fahrempfehlung zumindest abbremsen. Eine Berücksichtigung des Rückstaus hätte eine Verkleinerung der oberen Grenze des Geschwindigkeitskorridors (v_{RGA}) zur Folge. Bei langen Rückstaus wird es aber auch umso wahrscheinlicher, dass die optimale Geschwindigkeit nicht mehr zwischen der minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung $v_{min,akz}$ und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit v_{zul} liegt und infolgedessen keine Beeinflussung stattfindet. In diesem Falle würde sich das kooperative Fahrzeug ohnehin auf den Rückstau zu bewegen und ggf. zum Stillstand kommen. Bei kürzeren Rückstaus lässt sich erkennen, ob der gesamte Geschwindigkeitsbereich der Fahrerempfehlung unter den tatsächlich vorliegenden verkehrlichen Bedingungen sinnvoll sein kann. Es wird deutlich, dass die Verhaltensweisen verschiedener Fahrertypen und insbesondere die Reaktion auf die ausgegebenen Fahrempfehlungen eine entscheidende Rolle spielt. Die Ausführungen zeigen, dass der tatsächliche Einfluss der Rückstaulänge nur schwer quantifizierbar ist. Weiterhin lagen zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit keine Informationen über prognostizierte Rückstaulängen vor. Dies liegt nicht zuletzt an der mangelnden Datengrundla-

ge für die einzelnen Schätzverfahren. Das Verfahren in [MÜCK-2002] verwendet bspw. Daten von Induktivschleifendetektoren, die nicht an allen LSA vorhanden sind. Andere Schätzverfahren nutzen Daten von speziell ausgerüsteten Fahrzeugen [COMERT / CETIN-2009; PRIEMER-2010; NEUMANN-2011]. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit dieser sogenannten Floating Car Data (FCD)⁵³ kann auch hier nicht davon ausgegangen werden, dass der Rückstau an sämtlichen Zufahrten hinreichend genau vorausgesagt werden kann. Die Fahrer müssten bei fehlerhaft oder unzureichend prognostizierten Rückstaulängen ohnehin die Empfehlung hinterfragen und intuitiv reagieren. Aus den genannten Gründen verzichtet die Arbeit bewusst auf die Berücksichtigung der Rückstaulänge.

5.3 Ausstattungsrate

Die verkehrlichen Auswirkungen der informierten und zugleich beeinflussten Fahrer wurden mithilfe der oben genannten Szenarien mit jeweils zwölf unterschiedlichen Ausstattungsrate β simulativ untersucht. Dabei wurden alle möglichen Koordinierungsgrade durch die Variation der Versatzezeiten berücksichtigt (Abschnitt 5.2.1). Zur Abdeckung eines breiten Spektrums von verschiedenen Verkehrssituationen erfolgte die Auswahl der ausgestatteten Fahrzeuge nach einem Zufallsprinzip. Es ist beispielsweise entscheidend, an welcher Stelle im Pulk sich das ausgestattete Fahrzeug befindet. Zum Erhalt einer umfassenden Aussage wurde jedes Szenario mit mehr als 60 Umläufen simuliert. Einen Überblick über die Ergebnisse und über die funktionalen Zusammenhänge zwischen den Bewertungskenngrößen und der Ausstattungsrate β liefert Abbildung 5.6. Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf einen einstreifigen Streckenzug mit einem Haltlinienabstand von 500 m und einem Auslastungsgrad α von 85 %. Die minimal akzeptierte Geschwindigkeit $v_{min,akz}$ der beeinflussten Fahrzeuge wurde auf 60 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (= 30 km/h) festgelegt. Für jede Ausstattungsrate β wurde die jeweilige Bewertungskenngröße über alle 20 VZV-Szenarien gemittelt. Anhand des ersten Diagrammes lässt sich gut erkennen, dass die Durchfahrten ohne Halt mit zunehmender Ausstattungsrate β ansteigen. Das Bestehen eines funktionalen Zusammenhangs wurde anhand einer Korrelationsanalyse geprüft. Hier zeigte sich, dass sich der Zusammenhang aufgrund eines hohen Determinationskoeffizienten R^2 am besten über eine quadratische Funktion beschreiben lässt. Für die Korrelationsanalyse wurde festgelegt, dass die Korrelationsfunktion den ersten und letzten Punkt im Diagramm ($\beta = 0\%$ und $\beta = 100\%$) schneiden muss. Der maximale Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt D ergibt sich bei Vollausrüstung ($\beta = 100\%$). Daher kann dieser Punkt auch als Scheitelpunkt $S(-d|e)$ der quadratischen Funktion (Gleichung 5.14) verstanden werden.

⁵³ vergleichbar mit den in der Arbeit bezeichneten Probe Vehicle Data (PVD)

$$y = a \cdot (x + d)^2 + e \quad (5.14)$$

mit:

$S(-d|e)$... Koordinaten des Scheitelpunktes

Aus dieser Überlegung ergibt sich die im oberen linken Diagramm in Abbildung 5.6 angegebene Funktionsgleichung einer Parabel. Die Ermittlung der Funktionsgleichung ist im Anhang I aufgeführt.

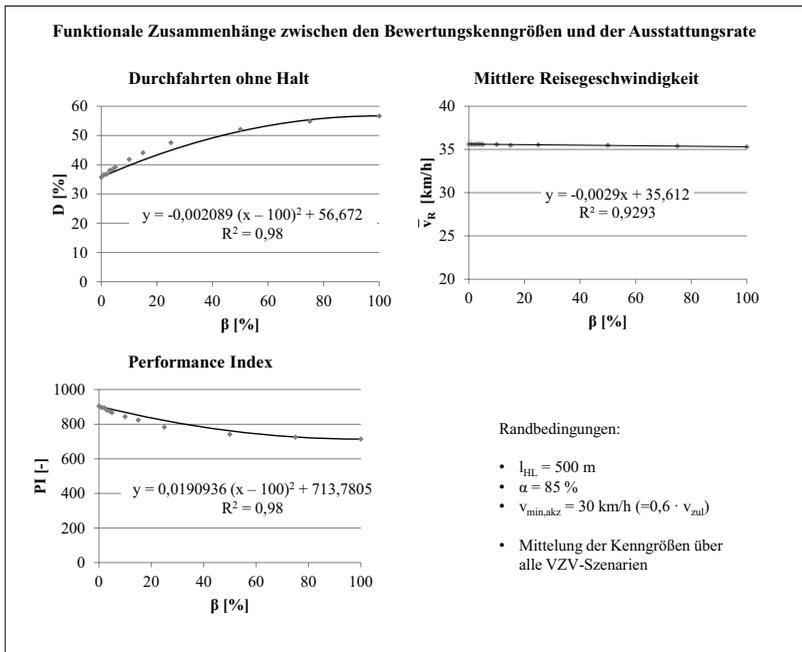


Abbildung 5.6: Einfluss der Ausstattungsrate auf die Bewertungskenngrößen

Zwischen den Kenngrößen folgt dementsprechend der Zusammenhang einer quadratischen Funktion mit relativ geringer Krümmung. Dabei wirkt sich die Beeinflussung von Fahrzeugen positiv auf die Gesamtzahl der Durchfahrten ohne Halt aus. Bei geringen Ausstattungsraten β bis 5 % erhöht sich der Anteil der Durchfahrten ohne Halt D im Vergleich zum unbeeinflussten Verkehrsablauf ($\beta = 0$ %) um bis ca. 3,4 %. Dieser vermeintlich geringe Wert ist aufgrund der Berücksichtigung aller Koordinierungsgrade mit guten, schlechten und gebrochenen Koordinierungen als sehr positiv zu werten. Bei einer maximalen Ausstattungsrate β von 100 % können im Mittel 20 % mehr Fahrzeuge den

signalisierten Querschnitt ohne Halt passieren. Auf die mittlere Reisegeschwindigkeit hat die Ausstattungsrate β hingegen nahezu keinen Effekt. Wie dem rechten Diagramm der Abbildung 5.6 zu entnehmen ist, liegen die Punkte auf dem gleichen Niveau. Die Regressionsanalyse zeigt einen linearen Zusammenhang ohne nennenswerten Anstieg. Demnach ist es unerheblich, ob und wie viele Fahrzeuge ausgestattet sind. Die mittlere Reisegeschwindigkeit betrug über alle VZV-Szenarien durchschnittlich ca. 35 km/h.

Im unteren Diagramm der Abbildung 5.6 ist der funktionale Zusammenhang zwischen der Ausstattungsrate β und des Performance Index PI dargelegt. Der Performance Index PI nach Gleichung 2.8 (S. 34) ist ein gewichteter Mittelwert aller Wartezeiten und Halte. Die Analyse berücksichtigt dabei die in [SCHNABEL / LÄTZSCH / BRÜCKNER-2001] vorgeschlagenen Parametereinstellungen. Hier wurde auf Basis von gemessenen Kraftstoffverbräuchen ein Zeitäquivalenzwert für einen Halt gebildet. Die Berechnung ergab bei normaler Fahrweise einen Zeitäquivalenzwert von ca. 60 s pro Halt. Dieser Wert entspricht der Zeit, *“in der ein Kraftfahrzeug im Leerlauf die dem Zyklusmehrverbrauch entsprechende Menge Kraftstoff verbraucht“* [SCHNABEL / LÄTZSCH / BRÜCKNER-2001]. Somit wurden die Gewichtungsfaktoren G_W zu 1 Fz^{-1} und G_H zu 60 s/Fz festgesetzt. Da die simulative Untersuchung zunächst nur den Kfz-Verkehr berücksichtigt, konnte auch der Faktor für die verschiedenen Fahrzeuge mit 1 belegt werden. Mit steigender Anzahl beeinflusster Fahrer sinkt der Performance Index PI . Dies ist mit einer effektiveren Steuerung bzw. mit weniger Halten und geringeren Wartezeiten gleichzusetzen. Für die Korrelationsanalyse gelten ähnliche Bedingungen wie bei der Analyse des Prozentwertes der Durchfahrten ohne Halt D . Das Minimum der Funktionen wird bei einer Ausstattungsrate β von 100 % erreicht. Der weitere vorzugebende Schnittpunkt der Korrelationsfunktion entspricht dem Wert an der Stelle $\beta = 0 \%$. Unter Berücksichtigung dieser Voraussetzungen ergaben sich die in im unteren Diagramm der Abbildung 5.6 angegebene Funktionsgleichung einer Parabel mit einer recht flachen Krümmung.

5.4 Versatzeitvariation

Mit den gezeigten Diagrammen in Abbildung 5.6 lassen sich keine Rückschlüsse auf die Auswirkungen der Fahrerbeeinflussung auf die Kenngrößen D , \bar{v}_R und PI unter Berücksichtigung von verschiedenen Versatzeiten ziehen. So bleibt es zunächst unklar, unter welchen Voraussetzungen bestimmte Effekte erzielt werden. Aus diesem Grund zeigen die folgenden Abbildungen die Verläufe der jeweiligen Bewertungskenngrößen über alle Versatzeiten unter Berücksichtigung der Ausstattungsrate. Auf der Abszisse ist die Versatzeitvariation t_{VZV} und auf der Ordinate der Wert der entsprechende Qualitätskenngröße abgetragen.

was bei einem zyklischen Umlauf von 60 s einer negativen Versatzzeitvariation zwischen - 30 s und 0 s entspricht.

Im Gegensatz dazu sind die Kurven der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R , wie in Abbildung 5.8 zu sehen ist, über den gesamten VZV-Bereich annähernd deckungsgleich. Bei gleichbleibender Signalisierung hat die Fahrerbeeinflussung bei einem Auslastungsgrad α von 85 % über alle Koordinierungsgrade hinweg weder positive noch negative Einflüsse auf die durchschnittliche Reisezeit und somit auf die erzielte mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R .

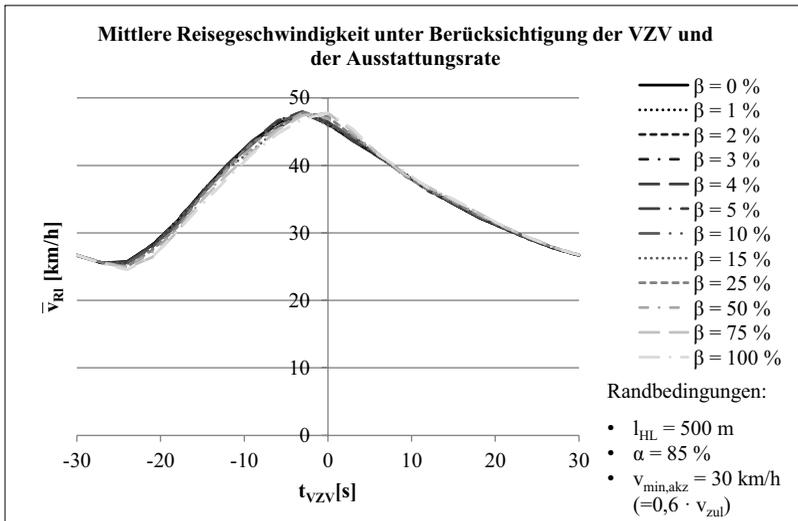


Abbildung 5.8: Mittlere Reisegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate

Im Diagramm in Abbildung 5.9 sind die Kurvenscharen des Performance Index PI in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate und von der Versatzzeitvariation visualisiert. Die Kurvenverläufe lassen im Wesentlichen das gleiche Fazit wie die Untersuchung der Durchfahrten ohne Halt zu. Die Fahrerbeeinflussung entfaltet ihr Potenzial vor allem im positiven Bereich bis ca. $t_{VZV} = + 30$ s. Hier nimmt der Performance Index PI mit steigender Ausstattungsrate ab, welches einer Verbesserung gleichzusetzen ist. Im negativen VZV-Bereich ($t_{VZV} < 0$ s) kommen die Fahrzeuge zwangsläufig zum Halten, weil die Fahrerbeeinflussung aufgrund der Unterschreitung der minimal akzeptierten Geschwindigkeit $v_{min,akz}$ aufgehoben wird.

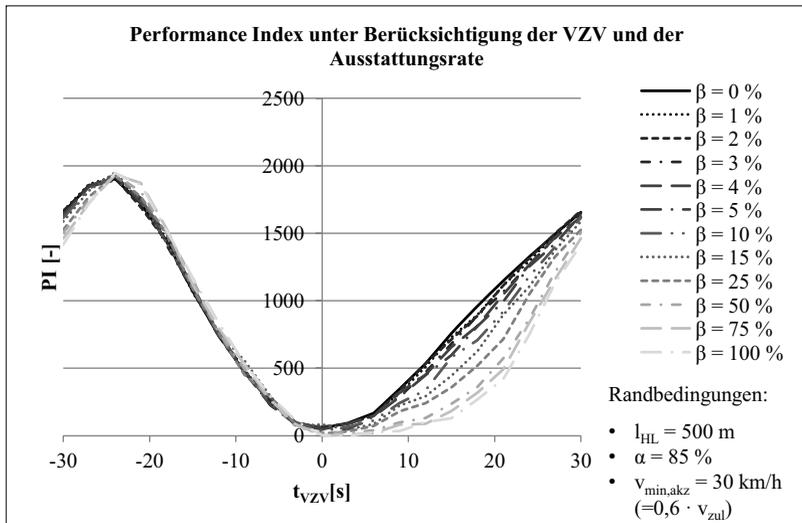


Abbildung 5.9: Performance Index in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate

5.5 Haltlinienabstand

Die nachfolgenden Diagramme in Abbildung 5.10 geben einen Überblick über den Einfluss des Haltlinienabstands l_{HL} auf die Bewertungskenngrößen D , \bar{v}_R und PI . Es wird deutlich, dass die Werte der Kenngrößen von den Haltlinienabständen l_{HL} abhängig sind. Dies trifft insbesondere für die Durchfahrten ohne Halt D in Verbindung mit hohen Ausstattungsraten β zu. Der Anstieg und die Krümmung der Kurven steigt mit zunehmender Streckenlänge l_{HL} . Bei kurzen Haltlinienabständen l_{HL} unter 250 m lassen sich durch die Fahrerbeeinflussung im Mittel nur wenige Halte vermeiden. Selbst bei einer Vollausrüstung ($\beta = 100 \%$) verbessert sich die Durchfahrtsrate ohne Stopp D über alle Koordinierungsgrade im Mittel um maximal 7,5 %. Bei doppelt so großem Haltlinienabstand ($l_{HL} = 500 \text{ m}$) sind es gemäß polynomischer Regressionsfunktion bereits 22,5 %. Ab einer Streckenlänge l_{HL} von 1.000 m ist es unter den genannten Randbedingungen sogar möglich, annähernd alle Halte zu vermeiden. Dieser Sachverhalt wird im nächsten Absatz beschrieben. Auch bei weniger beeinflussten Fahrern spielt die Streckenlänge l_{HL} eine nicht unwesentliche Rolle. Bei einer 10 %-en Ausstattungsrate β liegt das Einsparpotenzial je nach Streckenlänge l_{HL} zwischen einem und elf Prozent.

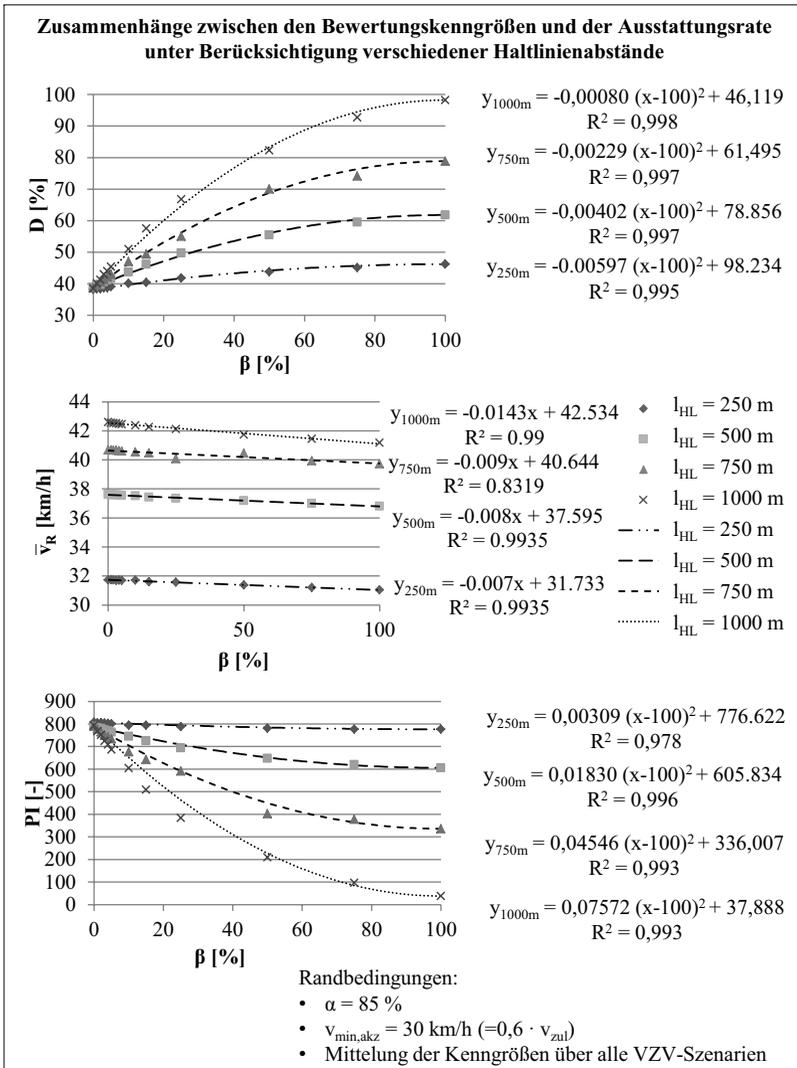


Abbildung 5.10: Einfluss des Haltlinienabstands auf die Werte der Kenngrößen

Der Einfluss des Haltlinienabstands l_{HL} soll anhand der Abbildung 5.11 erläutert werden. Der Fahrer erhält Geschwindigkeitsempfehlungen lediglich innerhalb des Geschwindigkeitskorridors, welcher durch die Grenzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit v_{zul} und der minimal akzeptierten Geschwindigkeit $v_{min,akz}$ vorgegeben ist. Der Geschwin-

digkeitskorridor kann als Anstiegswinkel der in Abbildung 5.11 dargestellten Linien von $v_{min,akz}$ zu v_{zul} verstanden werden. Demzufolge ergibt sich bei steigenden Haltlinienentfernungen auch ein größerer zeitlicher Bereich, in dem die Grünzeit der zu überquerenden stromabwärtigen LSA liegen kann. Voraussetzung ist eine ungehinderte Fahrt ohne Halt. Die innerhalb dieses zeitlichen Bereichs liegende Freigabezeit bestimmt folglich die Grenzen der zu empfehlenden Geschwindigkeiten, mit denen eine Fahrerbeeinflussung stattfinden kann.

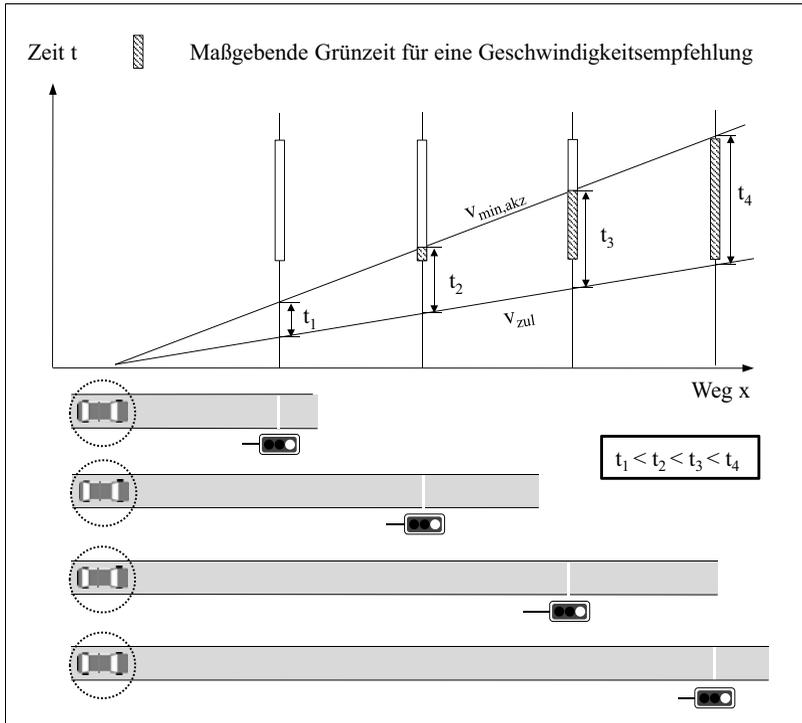


Abbildung 5.11: Einfluss des Haltlinienabstands auf die Fahrerbeeinflussung

Die Streckenlänge spielt im Hinblick auf die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R eine untergeordnete Rolle. Die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R bleibt, wie im mittleren Diagramm der Abbildung 5.10 zu erkennen, mit steigender Anzahl informierter Fahrer annähernd konstant. Allerdings wird auch deutlich, dass die durchschnittliche Reisegeschwindigkeiten \bar{v}_R auch ohne beeinflusste Fahrer ($\beta = 0$) bei unterschiedlichen Haltlinienabständen l_{HL} nicht identisch sind. Je größer der Haltlinienabstand l_{HL} ist, desto höher ist tendenziell die erreichte mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R . Dies muss insbesondere bei der

Bewertung der Koordinierung berücksichtigt werden und soll an anderer Stelle diskutiert werden.

Bei näherer Betrachtung des mittleren Diagrammes in Abbildung 5.10 fällt auf, dass die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R sogar mit ansteigender Ausstattungsrate β leicht absinkt. Das hängt damit zusammen, dass die empfohlene und später im Programm sekundlich angewiesene Wunschgeschwindigkeit v_{Wunsch} der ausgestatteten Fahrzeuge höchstens 95 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit v_{zul} entspricht. Die vom Simulationsprogramm standardmäßig festgelegte Wunschgeschwindigkeit v_{Wunsch} liegt jedoch darüber⁵⁴. Die Problematik ist in Abbildung 5.12 aufgezeigt. Hier sind beispielhafte Fahrlinien in zwei Zeit-Weg-Diagrammen dargestellt. Im oberen Diagramm sind alle Fahrzeuge unbeeinflusst. Hier fahren alle Fahrzeuge im Durchschnitt mit leicht überhöhter Geschwindigkeit und können daher den zweiten Querschnitt ohne Halt überqueren. Im unteren Diagramm ist Fahrzeug ③ mit entsprechenden Assistenzfunktionen ausgestattet. Die Wunschgeschwindigkeit v_{Wunsch} des Fahrzeugs ③ wird auf 47,5 km/h ($= 0,95 \cdot v_{Wunsch}$) herabgesetzt. Dieser Wert ergibt sich aus dem in Bezug auf die Grüne-Welle-Informationen angenommenen Fahrverhalten (siehe Abschnitt 5.2.2). Das Fahrzeug ③ bewegt sich also im Vergleich zum oberen Diagramm mit einer geringeren durchschnittlichen Geschwindigkeit. Daher kommt es an LSA 2 zwischen dem Passieren des Fahrzeugs ② und ③ zu einem ungenutzten Grünzeitbereich. Die Geschwindigkeitsverringerung des beeinflussten Fahrzeugs ③ hat zur Folge, dass auch die nachfolgenden Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit reduzieren müssen. Aufgrund des ungenutzten Grünzeitbereichs erreichen die Fahrzeuge ⑤ und ⑥ den Querschnitt an LSA 2 nicht mehr bei Grün und kommen folglich zum Stehen. In der Simulation kam es in einigen VZV-Szenarien vor, dass Fahrzeuge abgebremst wurden, obwohl sie auch mit ihrer vorab festgelegten Wunschgeschwindigkeit v_{Wunsch} die Haltlinie ohne Halt hätten passieren können. Dadurch kann es gegebenenfalls auch zu den genannten Kapazitätseinbußen der LSA kommen. Es besteht jedoch noch großer Forschungsbedarf bezüglich der tatsächlichen Verhaltensweise der informierten Fahrer. Insbesondere bei direktem Sichtkontakt zum Signalgeber stellt sich die Frage, ob der informierte Fahrer auch bei einem grün zeigenden Signal tatsächlich seine Geschwindigkeit reduzieren würde.

Wie dem unteren Diagramm in Abbildung 5.10 zu entnehmen ist, scheint die BewertungsgröÙe PI erwartungsgemäß ebenfalls stark vom Abstand der signalisierten Querschnitte l_{HL} abhängig zu sein. Je größer der Haltlinienabstand l_{HL} , desto geringer und somit besser ist tendenziell der Performance Index PI . Die Unterschiede werden genau wie bei den Durchfahrten ohne Halt D mit steigender Ausstattungsrate β immer größer. Bei einer Streckenlänge l_{HL} von 250 m können im Schnitt nur wenig Halte und Wartezeiten vermieden werden. Der Performance Index PI ändert sich kaum. Bei größeren

⁵⁴ Die Spanne der zugeordneten Wunschgeschwindigkeit reicht von 48 bis 58 km/h.

Abständen und höheren Ausstattungsraten β fällt der Performance Index PI um ein Vielfaches kleiner aus.

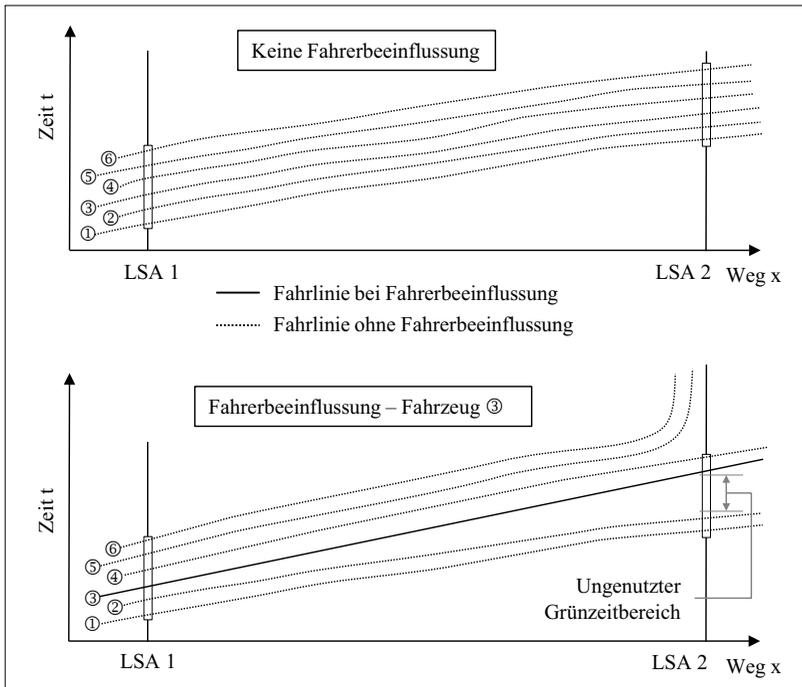


Abbildung 5.12: Negative Auswirkung der Fahrerbeeinflussung

5.6 Auslastungsgrad

Nachfolgend soll der Einfluss des Auslastungsgrads α untersucht werden. Es gilt hierbei zu klären, ob die Fahrerbeeinflussung unter verschiedenen Belastungen unterschiedliche Effekte erzielt. Hierzu wurden neben der Standardbelastung zwei weitere Szenarien mit Auslastungen von 25 % und 50 % analysiert. Die ermittelten Bewertungs- und Verkehrskenngrößen sind analog zu den obigen Untersuchungen in einem Diagramm in Abbildung 5.13 dargestellt.⁵⁵

Die Kurvenverläufe in Abbildung 5.13 verdeutlichen, dass eine Verringerung des Auslastungsgrads α eine Verbesserung sämtlicher Werte zur Folge hat. Auch ohne das Vorhandensein von beeinflussten Fahrern steigen beispielsweise die Durchfahrten ohne Halte D

⁵⁵ Die zugehörigen Werte sind in Tabelle I.1 im Anhang I aufgeführt.

um ca. 4,4 %, wenn der Sättigungsgrad α von 85 auf 50 % abnimmt. Die Werte schwanken jedoch über die Ausstattungsrate β kaum. Das wiederum bedeutet, dass die Wirkung der Fahrerbeeinflussung im Hinblick auf die Prozentsätze der Durchfahrten ohne Halt D bei nicht übersättigten Verkehrsverhältnissen ($\alpha \leq 85$ %) nahezu unabhängig vom Auslastungsgrad α ist. Über alle Auslastungsgrade α werden annähernd die gleichen Effekte (Einsparpotenzial von Halten) erzielt. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R , welche im Mittel ebenfalls um vier Prozentpunkte steigt und über die Ausstattungsrate β kaum schwankt. Die Unterschiede der PI-Werte fallen bei der Verringerung des Sättigungsgrads α von 85 % auf 50 % mit einer durchschnittlichen Verbesserung von 15,6 % hingegen größer aus. Eine geringere Belastung hat naturgemäß auch eine kürzere Rückstaulänge an der LSA zur Folge. Dadurch vermindern sich auch die Wartezeiten, die wiederum den deutlichen Abfall des PI begründen. Da die Graphen der Korrelationsfunktionen der untersuchten Auslastungsgrade α verhältnismäßig identisch zueinander verlaufen, scheint die Wirkung der Fahrerbeeinflussung auch im Hinblick auf den Performance Index PI bei nicht übersättigten Verkehrsverhältnissen ($\alpha \leq 85$ %) weitgehend unabhängig von dem Auslastungsgrad α zu sein.

Die Analyse von noch geringeren Belastungen mit einem Sättigungsgrad α von 25 % bekräftigen die oben diskutierten Analyseergebnisse. Die Fahrerbeeinflussung erzielt bei unterschiedlichen Belastungen bis zu einer Auslastung von 85 % fast identische Effekte. Zwar werden die Werte von D , PI und \bar{v}_R mit sinkendem Auslastungsgrad α allesamt besser, jedoch nehmen die Unterschiede bei steigender Anzahl an ausgestatteten Fahrzeugen weder ab noch zu. Damit ist nachgewiesen, dass die Wirkung der Fahrerbeeinflussung im Hinblick auf die Bewertungskenngrößen bei verschiedenen Belastungsszenarien unterhalb der Sättigungsgrenze annähernd identisch ist.

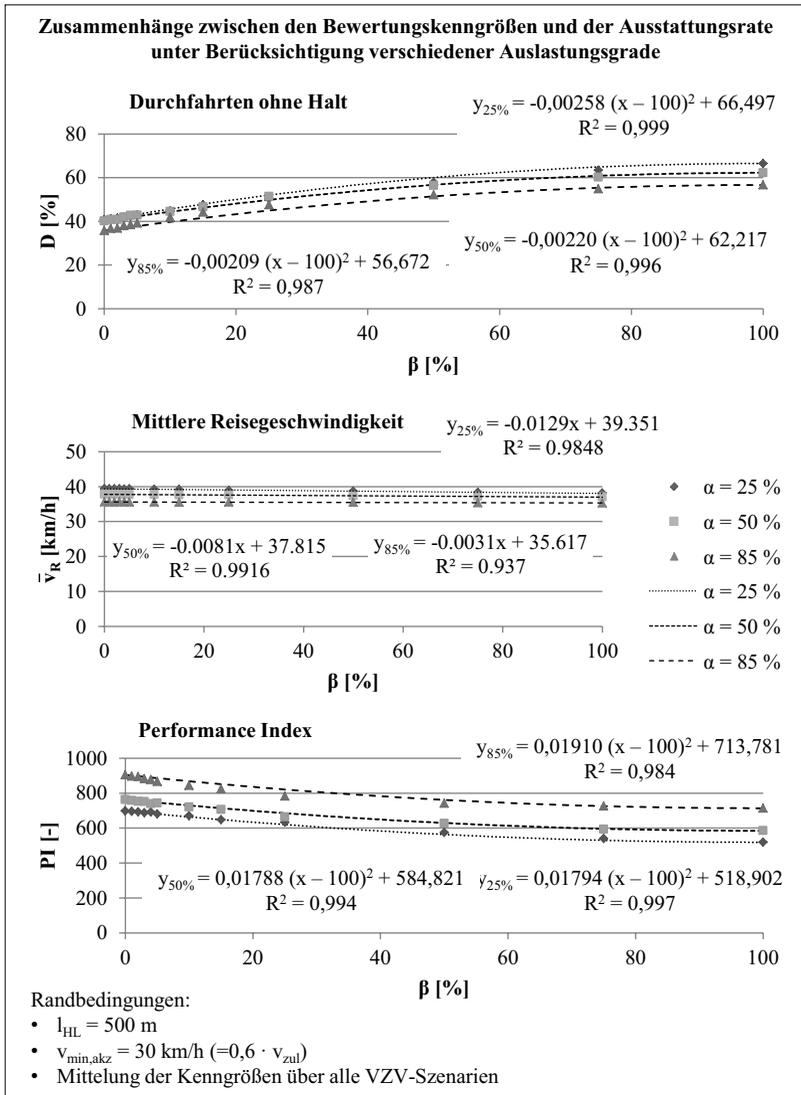


Abbildung 5.13: Einfluss des Auslastungsgrads auf die Bewertungskenngrößen

5.7 Zwischenfazit

In den Ergebnissen der durchgeführten Wirkungsanalyse wird deutlich, dass die Fahrerbeeinflussung durchaus einen erheblichen Einfluss auf den Verkehr der gesamten Strecke hat. Das macht sich insbesondere bei hohen Ausstattungsraten bemerkbar. Allerdings ist die verkehrliche Wirkung der Fahrerbeeinflussung auch bei einer geringen Anzahl an informierten Fahrern nicht zu vernachlässigen. Zur Untersuchung wurden insbesondere die Bewertungskenngrößen zur Beurteilung der Koordinierung wie die Durchfahrten ohne Halt D , die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R sowie der Performance Index PI nach Robertson verwendet. Neben der Ausstattungsrate β wurden weitere Einflussfaktoren untersucht, die sich womöglich auf das Ergebnis und somit auf den Wert der genannten Kenngrößen auswirken. Hierzu zählen die Versatzeitvariation t_{VZV} , der Haltlinienabstand l_{HL} und der Auslastungsgrad α .

Der Anteil der Durchfahrten ohne Halt D wird maßgeblich durch die Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge beeinflusst. Grundsätzlich gilt: Je höher die Ausstattungsrate β , desto mehr Halte lassen sich vermeiden. Dabei spielt auch die vorliegende Versatzeit eine wesentliche Rolle. Insbesondere bei ungünstiger Koordinierung im Bereich der positiven Versatzeitvariation trat eine Erhöhung der Durchfahrtsquote ohne Halt D auf. Dieser positive Effekt nimmt mit steigenden Haltlinienabständen weiterhin zu.

Die Fahrerbeeinflussung hat hingegen nahezu keinen Effekt auf die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R . Bis zu einem Auslastungsgrad α von 85 % ist es unerheblich, wie viele Fahrzeuge ausgestattet sind. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei den untersuchten Festzeitsteuerungen unabhängig von etwaigen Geschwindigkeitsanpassungen im Schnitt annähernd die gleiche Zeit für das Passieren des gesamten Streckenabschnitts benötigt wird. Die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R wird maßgeblich von der Versatzeit bzw. die Koordinierungsgüte bestimmt. Auch der Haltlinienabstand hat einen wesentlichen Einfluss auf die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R , denn tendenziell sind mit zunehmenden Haltlinienabständen auch höhere mittlere Reisegeschwindigkeiten \bar{v}_R zu erreichen.

Die Ergebnisse der Untersuchung der verkehrlichen Wirkung unter Berücksichtigung des Performance Index PI untermauern die Aussage, dass die Fahrerbeeinflussung ihr Potenzial vor allem im positiven Bereich der Versatzeitvariation entfaltet. Der PI -Wert nimmt hier mit steigender Ausstattungsrate deutlich ab. Der positive Effekte wird auch hier mit steigenden Haltlinienabständen verstärkt.

Die genannten verkehrlichen Wirkungen der Fahrerbeeinflussung erzielen bei unterschiedlichen Belastungen fast identische Effekte. Zwar werden die Werte von D , PI und \bar{v}_R mit sinkendem Auslastungsgrad α allesamt besser, jedoch nehmen die Unterschiede

bei steigender Anzahl an ausgestatteten Fahrzeugen weder ab noch zu. Damit ist nachgewiesen, dass die Wirkung der Fahrerbeeinflussung im Hinblick auf die Bewertungskenngrößen bei verschiedenen Belastungsszenarien unterhalb der Sättigungsgrenze annähernd identisch ist.

Im Hinblick auf die Verwendung der Kenngrößen zur Bewertung der Koordinierung bei fahrerbeeinflussenden kooperativen Systemen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Fahrerbeeinflussung hat wesentliche Auswirkungen auf den Verkehrsablauf der gesamten Strecke. Dies trifft bereits bei geringen Ausstattungsraten β zu. So können bspw. auch wenig informierte Fahrzeuge dazu beitragen, die Gesamtzahl aller Halte zu verringern.
- Die Kenngröße Durchfahrtsquote ohne Halt D scheint unter dem Aspekt, dass beeinflusste Fahrer vorhanden sind, nur noch bedingt für die Bewertung einer Koordinierung geeignet zu sein. Je höher die Ausstattungsrate β , desto weniger Halte sind zu verzeichnen. Es scheint, als können auch schlechte Koordinierungen unter Anwendung des HBS-Verfahrens eine gute Bewertung erhalten. An dieser Stelle werden die Unterschiede zwischen den Begriffen Grüne Welle und Koordinierung im Hinblick auf die Bewertung deutlich. Mit den fahrzeuggenerierten Daten wird letztendlich der Verkehrsablauf bzw. unter Verwendung der Kenngröße Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halte D die Grüne Welle bemessen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse über die Grüne Welle oder anhand anderer abgeleiteter Informationen über den Verkehrsablauf werden Rückschlüsse auf die Koordinierungsqualität gezogen.
- Der Performance Index PI ist aus den gleichen Gründen nur bedingt für die Bewertung einer Koordinierung verwendbar. Der PI -Wert ist ebenso relativ stark von der Anzahl beeinflusster Fahrzeuge abhängig.
- Da sich die mittleren Reisegeschwindigkeiten \bar{v}_R mit zunehmender Ausstattungsrate β kaum ändern, scheint sie unter der Berücksichtigung des beeinflussten Verkehrsablaufes und eines maximalen Auslastungsgrads α von 85 % am ehesten als Bewertungskenngröße für die Koordinierung geeignet zu sein. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass mit zunehmenden Haltlinienabständen l_{HL} tendenziell auch höhere mittlere Reisegeschwindigkeiten \bar{v}_R erreicht werden. Dies ist bei der Bewertung der Koordinierung unbedingt zu berücksichtigen.

6 Qualitätsbewertung mittels fahrzeuggenerierter Daten

6.1 Vorbemerkungen

Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, sollen in dem vorgestellten kooperativen Ansatz die PVD zur Qualitätseinschätzung signalisierter Straßennetze verwendet werden. Im vorliegenden Kapitel 6 wird untersucht, wie die Daten aufgebaut sein müssen und inwiefern bestehende Bewertungsverfahren anwendbar sind. Zur Klärung dieser Fragen werden die Ergebnisse der verkehrlichen Wirkungsanalyse aufgegriffen. Neben diesen Erkenntnissen ist besonders zu berücksichtigen, dass die herangezogenen PVD von beeinflussten Fahrzeugen stammen. Die bestehenden Verfahren zur Qualitätseinschätzung der Koordinierung basieren hingegen auf Daten des fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufs. Aus diesem Grund werden die anhand der PVD bewerteten Koordinierungsqualitäten kritisch hinterfragt. Die Resultate der Qualitätseinschätzung werden mit dem beeinflussten und mit dem unbeeinflussten Verkehrsablauf verglichen. Prinzipiell kann dies mithilfe der in Kapitel 5 vorgestellten Simulationen erfolgen. Auf Grundlage der bestehenden Bewertungsverfahren werden nachfolgend die Struktur, die Inhalte und die zeitlichen Restriktionen der PVD festgelegt. Darauf aufbauend werden die PVD aus den bestehenden Simulationsdatensätzen extrahiert und die notwendigen verkehrlichen Kenngrößen ermittelt. Dadurch kann im Anschluss die Anwendbarkeit der etablierten Bewertungsverfahren und deren Aussagefähigkeit beurteilt werden. In dem vorliegenden Kapitel sollen insbesondere folgende Fragen beantwortet werden.

1. Eignen sich die aus dem zentralenbasierten kooperativen System gewonnenen PVD als Eingangsdaten für bestehende Bewertungsverfahren zur Qualitätseinschätzung von koordinierten Lichtsignalanlagen?
2. Liefern die bestehenden Bewertungsverfahren unter Anwendung der kooperativ gewonnenen Messgrößen annähernd gleiche Ergebnisse?
3. Sind die anhand der PVD ermittelten Koordinierungsqualitäten repräsentativ und entspricht das Bewertungsergebnis dem Ergebnis, welches auf Grundlage eines unbeeinflussten Verkehrsablaufs hätte erzielt werden können?

6.2 Mindestanforderungen an die verwendeten PVD

Bei dem vorgestellten kooperativen System senden Fahrzeuge ihre aktuellen Positions- und Richtungsdaten an eine zentralseitige Infrastrukturkomponente, um im Gegenzug Signalinformationen über die stromabwärtige Lichtsignalanlage zu erhalten. Die fahrzeuggenerierten Daten sollen in die Bewertung der Koordinierung einfließen. Die PVD müssen dabei so oft abgesetzt werden, dass eine Qualitätseinschätzung koordinierter Lichtsignalsteuerungen möglich ist. Gleichmaßen gilt es, die Fahrerassistenzfunktionen mit ausreichend Daten zu versorgen. Darüber hinaus ist die Kommunikation auf ein angemessenes Mindestmaß zu reduzieren. Die Gründe hierfür liegen insbesondere beim Verarbeitungsaufwand des Dienstansbieters. Jede Übertragung hat zur Folge, dass die zentrale Einheit die PVD entgegennehmen, verarbeiten und entsprechende Signalisierungs- und Geoinformationen als Antwort zurückschicken muss. Je mehr Anfragen und je höher die Ausstattungsrate, desto größer ist die benötigte Rechenleistung. Die in Abschnitt 4.4 (Seite 58) beschriebenen Feldtests haben gezeigt, dass in der Regel ein einmaliger Datenaustausch im Zulauf an eine LSA zur Generierung der genannten Fahrerinformationen genügt. Für die Koordinierungsbewertung ist die Übermittlung von nur einem Datenpaket pro Zulauf auf eine LSA jedoch nicht ausreichend. Die Mindestanforderungen an die PVD ergeben sich daher aus den bestehenden Verfahren zur Bewertung koordinierter Lichtsignalsteuerungen. Wie in Abschnitt 2.4.6 (S. 30) erläutert, berufen sich die Verfahren im Wesentlichen auf die drei Bewertungskriterien Anzahl der Halte, durchschnittliche Reisegeschwindigkeit und Wartezeit. Diese Kenngrößen können grundsätzlich auch anhand der kooperativ gewonnenen PVD ermittelt werden. Hierbei ist die Übertragung bei folgenden Ereignissen bzw. an folgenden Positionen zwingend erforderlich:

1. Halt vor einer Haltlinie
2. Überfahrt einer Haltlinie
3. Ausfahrt aus dem Knotenpunkt

In der Literatur sind keine einheitlichen Angaben zur Definition bzw. zu den Schwellwerten eines Halts zu finden. In dieser Arbeit wird eine Unterschreitung der Geschwindigkeit von $v \leq 1 \text{ m/s}$ als Halt definiert. Die PVD werden demnach immer übertragen, wenn das kooperationsfähige Fahrzeug im Bereich einer Zufahrt annähernd zum Stillstand kommt. Die Dauer des Beschleunigungsvorganges und die Verweildauer sind unerheblich. Sobald das Fahrzeug eine Haltlinie überfahren hat, wird eine neue Anfrage mit jeweils aktuellen Positions- und Richtungsdaten gestellt. Um später die Signalgruppe bzw. die Abbiegebeziehung identifizieren zu können, ist eine erneute PVD-Übertragung beim Verlassen des Knotenpunkts erforderlich. Dieses Ereignis wird 200 m nach Haltlinienüberfahrt ausgelöst. Einen Überblick über die Standorte der PVD-Übertragungen liefert Abbildung 6.1. Für die Ermittlung weiterer verkehrlicher Kenngrößen zur Qualitätsbewertung koordinierter Lichtsignalsteuerungen müssen die gesendeten Daten neben den Positions- und

Richtungsinformationen auch einen Zeitstempel sowie ein Wiederkennungsmerkmal in Form einer Fahrt-ID enthalten. Die mit der Anfrage gesendeten PVD beinhalten im vor-gestellten System

- einen Zeitstempel t_{PVD} ,
- die aktuellen GPS-Koordinaten (Breite und Länge (x_{PVD}, y_{PVD})),
- die gegenwärtige Fahrtrichtung (Heading) h_{PVD} ,
- die aktuelle Geschwindigkeit v_{PVD} und
- eine Fahrt-ID κ .

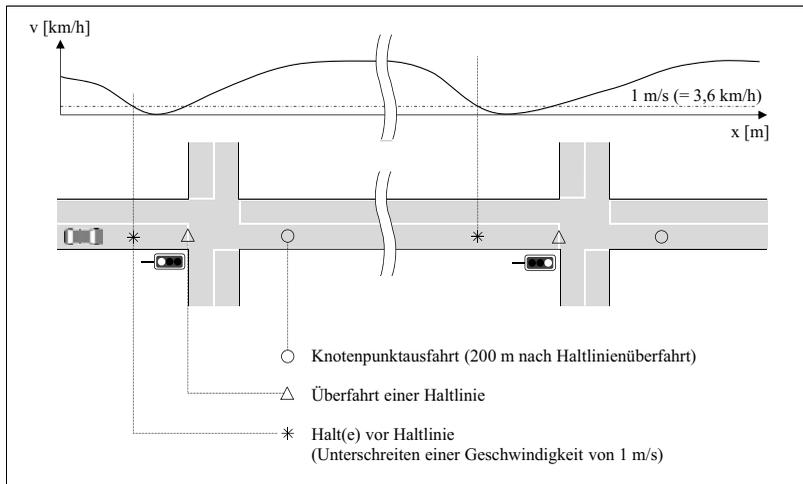


Abbildung 6.1: Positionen für PVD-Übertragung

Mithilfe der Fahrt-ID κ lassen sich die Zugehörigkeiten der PVD untereinander feststellen. Damit kann jede PVD einer bestimmten Fahrt zugeordnet werden. Die ID wird nach jedem Programmstart neu generiert. Das Programm startet nach jedem neuen Fahrtbeginn. Eine Rückverfolgung zum Smartphone, zum Fahrzeugtyp oder sogar zu personenbezogenen oder persönlichen Daten ist ausgeschlossen. Die PVD können daher als anonymisiert betrachtet werden.

6.3 Ermittlung verkehrlicher Kenngrößen aus PVD

Zur Bewertung der koordinierten Lichtsignalsteuerung müssen die einzeln übertragenen PVD weiterverarbeitet werden. Da die Anfragen einen Zeitstempel t_{PVD} und ein Wiedererkennungsmerkmal κ beinhalten, lässt sich beispielsweise die Reisezeit t_R zwischen

zwei gestellten Anfragen nach folgender Gleichung ermitteln.

$$t_{R,i \rightarrow j}(\kappa) = t_{PVD,j}(\kappa) - t_{PVD,i}(\kappa) \quad (6.1)$$

mit:

$t_{R,i \rightarrow j}(\kappa)$... Reisezeit zwischen Position i und j der Fahrt κ [s]

$t_{PVD,j}(\kappa)$... PVD-Zeitstempel an Position j [s]

$t_{PVD,i}(\kappa)$... PVD-Zeitstempel an Position i [s]

Die Wartezeit t_W wird in der vorliegenden Arbeit als die Zeitdauer vom ersten Halt des Fahrzeuges (Unterschreiten einer Geschwindigkeit von 1 m/s) innerhalb einer Zufahrt eines signalisierten Knotenpunkts bis zum Passieren der nachfolgenden Haltlinie definiert. Die Wartezeit t_W beinhaltet somit auch alle Aufrückvorgänge innerhalb des Staubereiches. Unter Verwendung der Gleichung 6.1 und der entsprechenden PVD ergibt sich die Wartezeit t_W zu:

$$t_W(\kappa) = t_{PVD,Hlu}(\kappa) - t_{PVD,Halt}(\kappa) \quad (6.2)$$

mit:

$t_W(\kappa)$... Wartezeit des Fahrzeugs κ [s]

$t_{PVD,Hlu}(\kappa)$... PVD-Zeitstempel bei Überfahrt der Haltlinie [s]

$t_{PVD,Halt}(\kappa)$... PVD-Zeitstempel bei Halt vor der Haltlinie [s]

Zur Ermittlung der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R muss die reale Entfernung zwischen zwei gemeldeten PVD bekannt sein. Da aber nur GPS-Koordinaten übertragen werden, muss die reale Entfernung nachträglich ermittelt werden. Auf Grundlage eines Map-Matchings sind die übertragenen Fahrzeugpositionen zentralseitig auf eine digitale Straßenkarte zu projizieren. Mit einem zugrunde liegenden Knoten-Kanten-Modell lassen sich Fahrverläufe und gefahrene Entfernungen zwischen zwei Punkten $d_{i \rightarrow j}(\kappa)$ bestimmen. Infolge der in Abschnitt 6.2 begründeten PVD-Übertragungen ist jede befahrene Kante direkt identifizierbar, so dass prinzipiell auf einen umfangreichen Georeferenzierungs- und Routensuchalgorithmus verzichtet werden kann. Die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R eines Fahrzeugs mit der Fahrt κ berechnet sich nach folgender Gleichung.

$$\bar{v}_{R,i \rightarrow j}(\kappa) = \frac{d_{i \rightarrow j}(\kappa)}{t_{PVD,j}(\kappa) - t_{PVD,i}(\kappa)} = \frac{d_{i \rightarrow j}(\kappa)}{t_{R,i \rightarrow j}(\kappa)} \quad (6.3)$$

mit:

$$\begin{aligned}\bar{v}_{R,i \rightarrow j}(\kappa) & \dots \text{Reisegeschwindigkeit Fahrzeugs } \kappa \text{ [m/s]} \\ d_{i \rightarrow j}(\kappa) & \dots \text{Wegstrecke zwischen Position i und j [s]}\end{aligned}$$

Die Anzahl der Halte einer Fahrt $n_{\text{Halte}}(\kappa)$ lässt sich direkt aus den PVD ermitteln. Der Wert gibt an, wie oft ein Fahrzeug zum Quasi-Stillstand durch Unterschreiten des Geschwindigkeitsschwellwertes von 1 m/s im Bereich einer Zufahrt gekommen ist.

Neben den Kriterien für die bestehenden Bewertungsverfahren lassen sich weitere verkehrliche Kenngrößen aus den PVD ableiten. Ausgehend von der individuellen Wunschgeschwindigkeit v_{Wunsch} und der ermittelten Reisezeit t_R aus Gleichung 6.1 lässt sich beispielsweise auch die Verlustzeit $t_{Verlust}$ berechnen. Da die individuellen Wunschgeschwindigkeiten v_{Wunsch} der Fahrer grundsätzlich kaum ermittelbar sind, wird in der vorliegenden Arbeit für die Wunschgeschwindigkeit v_{Wunsch} die zulässige Höchstgeschwindigkeit angesetzt. Die Verlustzeit $t_{Verlust}$ wird in der Arbeit demnach als die zeitliche Differenz zwischen der tatsächlichen Fahrtzeit t_R und der Zeit der freien Fahrt mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit v_{zul} im Streckenabschnitt definiert.

$$t_{Verlust,i \rightarrow j}(\kappa) = t_{R,i \rightarrow j}(\kappa) - \frac{x_{i \rightarrow j}(\kappa)}{v_{zul,i \rightarrow j}} \quad (6.4)$$

mit:

$$\begin{aligned}t_{Verlust,i \rightarrow j}(\kappa) & \dots \text{Verlustzeit der Fahrt } \kappa \text{ zwischen Position i und j [s]} \\ v_{zul,i \rightarrow j} & \dots \text{zulässige Höchstgeschwindigkeit auf dem Streckenabschnitt [s]}\end{aligned}$$

Bei Anwendung des oben genannten Map-Matching-Verfahrens lässt sich weiterhin die Rückstaulänge d_{Stau} in der Zufahrt zum Zeitpunkt der Ankunft des ausgestatteten Fahrzeugs bestimmen. Hierbei ist die Position bei der Meldung "Halt vor Haltlinie" $x_{Halt}(\kappa)$ zu verorten. Zusammen mit der Position der Haltlinie x_{HL} kann der Abstand bis zum nächsten Knotenpunkt und somit die Rückstaulänge d_{Stau} nach folgender Gleichung berechnet werden.

$$d_{Stau}(\kappa) = x_{HL} - x_{Halt}(\kappa) \quad (6.5)$$

mit:

$$\begin{aligned}d_{Stau}(\kappa) & \dots \text{Rückstaulänge bei Ankunft des Fahrzeugs } \kappa \text{ [m]} \\ x_{HL} & \dots \text{Position der Haltlinie [m]} \\ x_{Halt}(\kappa) & \dots \text{Position des Halts vor der Haltlinie [m]}\end{aligned}$$

6.4 Qualitätsbewertung der Referenzszenarien

6.4.1 Qualitätsstufen

Wie in Kapitel 5 beschrieben, hat die Bereitstellung von individuellen Grüne-Welle-Informationen einen wesentlichen Einfluss auf den Verkehrsablauf der gesamten Strecke. Es bleibt fraglich, in welchem Maße sich der veränderte bzw. beeinflusste Verkehr auf die Bewertung einer Koordinierung unter Anwendung etablierter Verfahren auswirkt. Um die Unterschiede quantifizieren zu können, werden nachfolgend zunächst die Referenzszenarien, denen ein fahrerseitig unbeeinflusster Verkehrsablauf (keine Fahrerbeeinflussung) zugrunde liegt, nach den bestehenden Verfahren bewertet. Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den unterschiedlichen Bewertungsmethoden gegenübergestellt, um eventuell vorhandene Differenzen herauszufinden. Hierzu wurden alle in Abschnitt 5.2.1 spezifizierten Simulationsszenarien mit einer Ausstattungsrate β von 0 % und einem Auslastungsgrad α von 85 % einer Bewertung mit dem HBS-Verfahren und mit der Brilon/Schnabel-Methode unterzogen (siehe Abschnitt 2.4.6, S. 30 ff.). In Summe wurden 240 Szenarien mit unterschiedlichen Streckenlängen und Versatzzeiten untersucht. Die Koordinierung wurde dabei über alle Fahrzeuge beurteilt. Aus diesem Grund flossen die Informationen sämtlicher Fahrzeuge in die Bewertung ein. Die Bewertungsergebnisse sind in Abbildung 6.2 dargestellt.

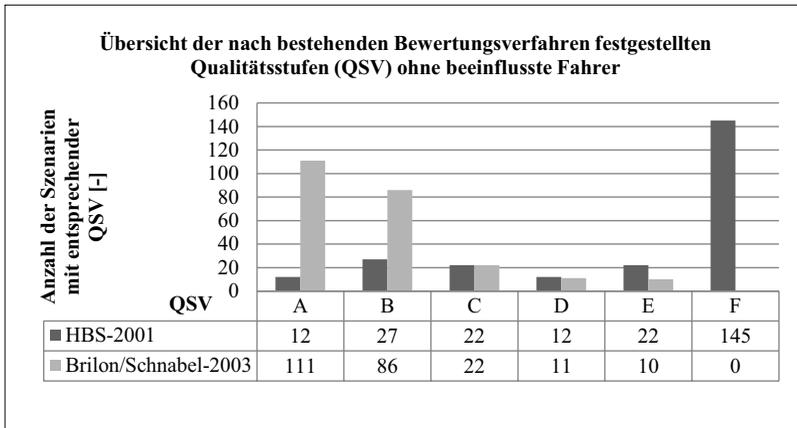


Abbildung 6.2: Übersicht der festgestellten Qualitätsstufen unter Berücksichtigung eines fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufs

Das Histogramm zeigt deutliche Unterschiede in der Anzahl der jeweils festgestellten Qualitätsstufen. Nach dem HBS-Verfahren weisen 167 Szenarien eine unwirksame bzw.

nicht vorhandene Koordinierung (QSV E oder QSV F) auf. Dementsprechend besteht aus Sicht des HBS nur in rund einem Drittel aller Fälle eine funktionierende Koordinierung, wobei nur 39 Szenarien die QSV A oder die QSV B aufweisen. Die Bewertung derselben Szenarien nach der Brilon/Schnabel-Methode offenbart ein vollkommen anderes Resultat. Hiernach gibt es 230 Szenarien, bei denen eine Koordinierung (QSV A bis QSV D) grundsätzlich vorhanden ist, wobei über 80 % aller Szenarien zumindest eine gute Koordinierung (mind. QSV B) bescheinigt bekamen. Nur in 10 Fällen war nach der Brilon/Schnabel-Methode die Koordinierung wirkungslos.

Die Abbildung 6.3 liefert einen Vergleich der Ergebnisse von 240 Szenarien unter Anwendung beider Bewertungsverfahren. Auf den Achsen sind die sechs QSV des HBS-Verfahrens und der Brilon/Schnabel-Methode aufgetragen. Für jedes Szenario wurde jeweils eine QSV ermittelt und in Relation zueinander in der Matrix eingetragen. Je dunklere die Kachel in der Matrix ist, desto häufiger tritt die entsprechende QSV-Relation auf. Es ist deutlich zu erkennen, dass dunklere Kacheln am unteren und am rechten Rand vorzufinden sind. Die meisten Koordinierungen weisen gemäß der Brilon/Schnabel-Methode eine gute bis sehr gute Qualität auf. Nach dem HBS-Verfahren wird ihnen aber eine deutlich schlechtere QSV zugewiesen. Das macht sich auch durch die schwarze Kachel auf der rechten Seite bemerkbar. Ungefähr ein Drittel aller untersuchten Szenarien weist nach der Brilon/Schnabel-Methode die QSV B und nach dem HBS die QSV F auf.

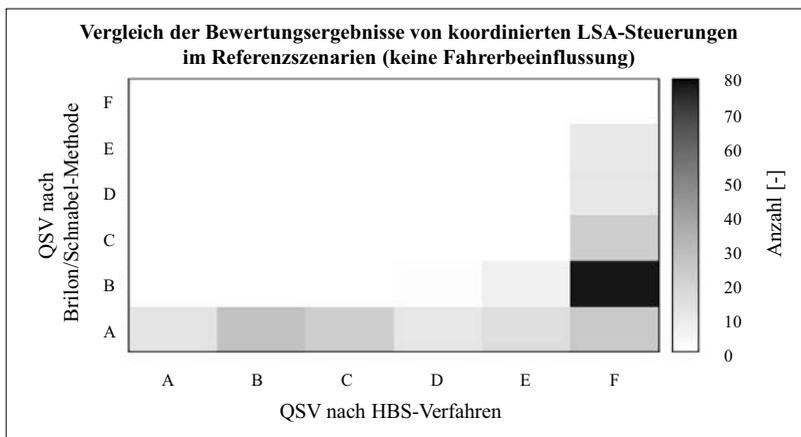


Abbildung 6.3: Ergebnisse der Koordinierungsbewertung unter Berücksichtigung eines fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufs

Obwohl die festgestellten Unterschiede in der Bewertung nicht repräsentativ sind und sie offensichtlich nicht für alle real existierende Straßenzüge zutreffen, liefern sie einen ersten Anhaltspunkt über das mögliche Ausmaß der Abweichungen. So kommt es bspw.

nur selten vor, dass eine Koordinierung nach beiden Verfahren die gleiche Qualitätsstufe aufweist. Ferner gibt es keinen Fall, in dem eine koordinierte LSA-Steuerung nach dem HBS als wirksam (QSV A bis D) und nach Brilon/Schnabel als unwirksam (QSV E bis F) interpretiert wurde. Die simulativ gewonnenen Erkenntnisse decken sich zum Teil mit Untersuchungsergebnissen realer Befahrungen, bei denen Testfahrten in zehn Straßenzügen mit jeweils mindestens acht Knotenpunkten durchgeführt wurden [WIETHOLT-2009]. Auch hier fiel die ermittelte Qualitätsstufe nach der Brilon/Schnabel-Methode in der Regel deutlich besser aus.

6.4.2 Durchfahrten ohne Halt

In Abbildung 6.4 sind die Ergebnisse der Prozentsätze der Durchfahrten ohne Halt D in Abhängigkeit von der Versatzeitvariation t_{VZV} getrennt nach den einzelnen Haltlinienabständen für die Szenarien mit einer Ausstattungsrate β von 0 % und einem Auslastungsgrad α von 85 % dargestellt. Die Versatzeiten wurden, wie in Abschnitt 5.2.1 erwähnt, schrittweise um 3 s erhöht bzw. verringert. Die Werte dazwischen wurden im dargestellten Liniendiagramm interpoliert.

Das Diagramm zeigt weitgehend gleichartige Verläufe. Die Maxima der Kurven liegen mit kleinen Abweichungen im Bereich der optimalen Versatzeit ($t_{VZV} = 0$ s) und die Durchfahrtsquote ohne Halt D beträgt augenscheinlich zwischen 90 und 100 %. Es ist auffällig, dass das Maximum mit steigendem Haltlinienabstand abnimmt und sich etwas nach links verlagert. Bei einem Haltlinienabstand von 250 m kommen bei optimaler Abstimmung der Freigabezeiten annähernd alle Fahrzeuge ohne Halt über den signalisierten Querschnitt. Bei einem Abstand von 1.000 m kommt hingegen jedes zehnte Fahrzeug zum Stehen. Die Abnahme erklärt sich durch die zunehmende Pulkauflösung bei längeren ungehinderten Fahrten und untermauert die HBS-Aussage, dass Koordinierungen nur bis maximal 1.000 m wirksam sind. Je kleiner die zu überwindende Strecke, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Fahrzeuge auch als geschlossener Pulk am Signalisierungsquerschnitt eintreffen. Bei zunehmender Streckenlänge werden insbesondere langsamere Fahrzeuge wie Lastkraftwagen zurück gelassen, die als Folge während der Sperrzeit am Knotenpunkt bzw. Haltlinie ankommen und einen Stillstand erleiden. Der restliche Verlauf der Kurvenscharen bedarf aufgrund der annähernd gleichen Erscheinung weniger Erklärung. Die Abweichung der Kurven untereinander sind gering. Mit fortwährender Variation der Versatzeiten sinken logischerweise die Durchfahrten ohne Halt D . Im Vergleich zur negativen Versatzeitvariation t_{VZV} , scheint die positive Versatzeitvariation t_{VZV} einen größeren Einfluss auf die Durchfahrten ohne Halt D zu haben. Dies wird durch den schnelleren Abfall der Kurven im positiven Bereich der Versatzeitvariation t_{VZV} deutlich.

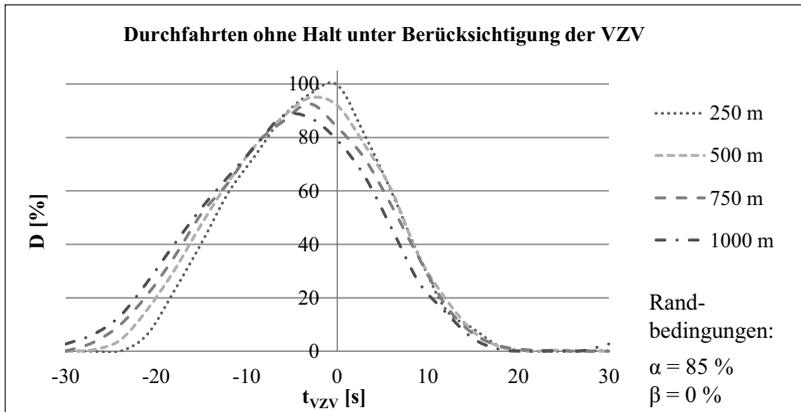


Abbildung 6.4: Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt in Abhängigkeit von der VZV unter Berücksichtigung eines fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufs

6.4.3 Mittlere Reisegeschwindigkeit

Abbildung 6.5 zeigt analog zu dem oben dargestellten Diagramm den Verlauf der mittleren Reisegeschwindigkeiten \bar{v}_R unter Berücksichtigung verschiedener Versatzeiten und Haltlinienabstände. Die unterschiedlichen Verläufe der Kurven verdeutlichen, dass die Haltlinienabstände l_{HL} einen großen Einfluss auf die mittleren Reisegeschwindigkeiten \bar{v}_R haben. Insbesondere bei schlecht abgestimmten Freigabezeiten macht sich dies bemerkbar. Während bei einer guten Koordinierung fast alle Fahrzeuge den gesamten Streckenabschnitt im Durchschnitt mit annähernd der zulässigen Höchstgeschwindigkeit v_{zul} von 50 km/h durchfahren können, werden bei schlechten Koordinierungen deutlich geringere Geschwindigkeiten erreicht. Dies ist indirekt auch auf die stattfindenden Halte und die damit verbundenen Wartezeiten zurückzuführen. Es scheint logisch, dass bei schlechten Koordinierungen Wartezeiten entstehen und somit die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R abnimmt. Dies ist jedoch bei langen Streckenabschnitten nicht so gravierend. Bei schlechten Koordinierungen bspw. bei $t_{VZV} \approx -25$ s kann ein 1.000 m langer Abschnitt im Mittel immerhin noch mit ca. 35 km/h befahren werden. Bei einem Haltlinienabstand l_{HL} von 250 m liegt die mittlere Reisegeschwindigkeit hingegen nur noch bei ca. 18 km/h. Auch das ist weniger erklärungsbedürftig, denn auf einem längeren Streckenabschnitt kann de facto länger mit höheren Geschwindigkeiten gefahren werden.

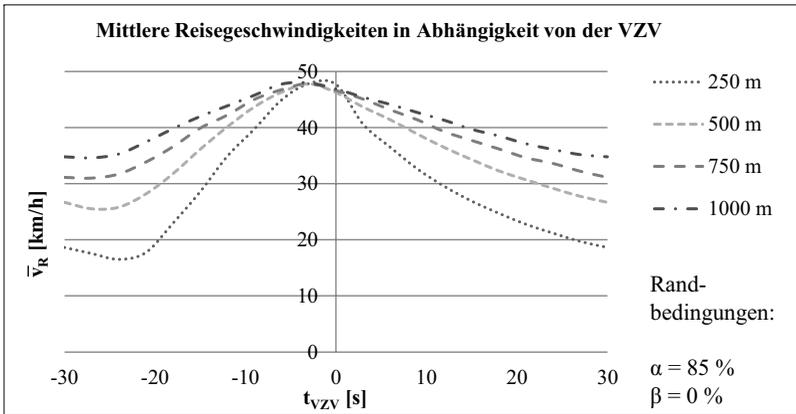


Abbildung 6.5: Mittlere Reisezeiten in Abhängigkeit von der VZV unter Berücksichtigung eines fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufs

An dieser Stelle lassen sich die in Abschnitt 6.4.1 beschriebenen Unterschiede in den ermittelten Qualitätsstufen erklären. Wie beschrieben sinkt die mittlere Reisegeschwindigkeit bei einer Streckenlänge von 1.000 m nicht unter 35 km/h ab. Demzufolge weisen auch Simulationsszenarien mit schlechten bzw. gar nicht vorhandenen LSA-Koordinierungen nach der Brilon/Schnabel-Methode sehr gute Qualitätsstufen zwischen QSV A und B auf. Die schlechteste QSV F ($\bar{v}_R < 15 \text{ km/h}$) wird auch bei den kleineren Haltlinienabständen nie erreicht. Selbst Reisegeschwindigkeiten zwischen 15 und 20 km/h, welche den Bereich der QSV E widerspiegeln, treten nur in seltenen Fällen und nur bei einem Haltlinienabstand von 250 m auf. Somit wird deutlich, dass neben den Versatzeiten auch die Haltlinienabstände einen erheblichen Einfluss auf das Bewertungsergebnis nach der Brilon/Schnabel-Methode haben.

6.4.4 Performance Index

In Abbildung 6.6 sind die Ergebnisse der simulativ ermittelten Werte des Performance Index PI für alle Versatzeiten und Haltlinienabstände dargestellt. Auf eine durchaus denkbare Gewichtung der Streckenlänge wurde aufgrund der Vergleichbarkeit mit Ergebnissen anderer Verfahren verzichtet. Letztendlich soll die Qualität der Koordinierung auch unabhängig von den Abständen zwischen zwei signalisierten Querschnitten sein. Die Zwischenwerte der Versatzeitvariationen wurden auch hier interpoliert. Somit ergeben sich die in Abbildung 6.6 gezeigten Kurvenscharen. Die Kurven liegen wie im Diagramm 6.4 relativ nah beieinander. Es kann geschlussfolgert werden, dass die Streckenlänge nur geringen bzw. keinen Einfluss auf den PI-Wert hat. Die Minima der Kurven, welche die

beste Lösung widerspiegeln, liegen im Bereich der optimalen Versatzzeit ($t_{VZV} = 0$ s). Die Maxima sind bei der negativen Versatzzeitvariation von -25 bis -20 s zu verzeichnen. Dadurch ist der Anstieg der Kurven auf der linken Seite größer als auf der rechten. Die negative Versatzzeitvariation hat im Vergleich zur positiven Variation offensichtlich einen größeren Einfluss auf das Ergebnis.

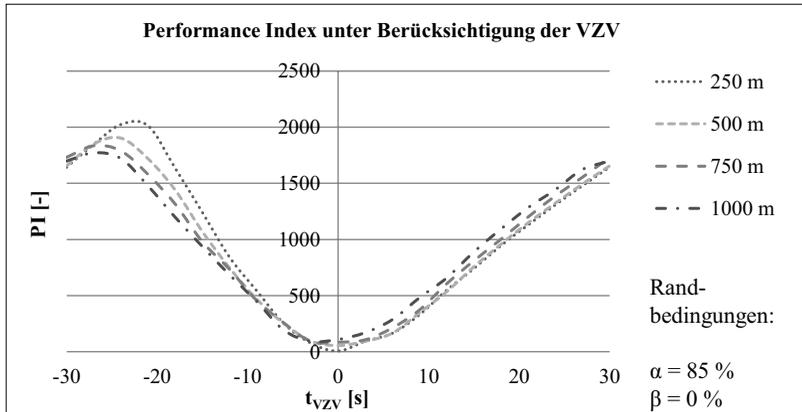


Abbildung 6.6: *PI in Abhängigkeit von der VZV unter Berücksichtigung eines fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufs*

6.4.5 Zwischenfazit

Ziel der durchgeführten Voruntersuchung war es, die Ergebnisse verschiedener Qualitätsbewertungsmethoden gegenüberzustellen und eventuell vorhandene Differenzen aufzuspüren. Zur Abdeckung des gesamten Qualitätsspektrums wurden sämtliche Koordinierungsgrade durch eine Vielzahl von Szenarien mit variierenden Versatzzeiten simuliert. Durch die Erfassung bewertungsrelevanter Verkehrskenngrößen war es im Anschluss möglich, die bestehenden Verfahren nach dem HBS [FGSV-2009], nach Brilon/Schnabel [BRILON / SCHNABEL-2003] und nach Robertson [ROBERTSON-1969] anzuwenden, um den in den Simulationen jeweils zugrunde gelegten Koordinierungen einer Qualitätseinschätzung zu unterziehen. Die Untersuchung offenbarte gravierende Unterschiede in den festgestellten Qualitätsstufen, die sich sogar mit steigendem Haltlinienabstand vergrößerten. Nach der Brilon/Schnabel-Methode gab es nur wenige Szenarien, in denen eine unwirksame Koordinierung zugrunde liegt. Der überwiegende Teil wurde mit den QSV A oder QSV B, also mit "sehr gut" oder "gut", bewertet. Nach dem HBS-Verfahren weist die Mehrzahl aller Szenarien hingegen eine eher schlechte Qualität auf, wodurch die Koordinierung nachweislich nicht vorhanden ist. Zur Identifizierung der Differenzen

in den Bewertungsergebnissen wurden die maßgebenden Bewertungskenngrößen genauer untersucht. Bei einer optimalen Koordinierung konnten alle Fahrzeuge die Haltlinie ohne Stopp überqueren. Bei schlechter Abstimmung der Freigabezeiten kamen hingegen alle Fahrzeuge zum Stehen. Infolgedessen konnte die gesamte Spanne der "Prozentsätze der Durchfahrten ohne Halt" und somit alle Qualitätsstufen abgedeckt werden. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, ob dies auch bei einem fahrerseitig beeinflussten Verkehrsablauf zutrifft. Wie bereits in der verkehrlichen Wirkungsanalyse in Kapitel 5 aufgezeigt wurde, kann bei einer beeinflussten Fahrweise die Anzahl der Halte, welche der HBS-Bewertung zugrunde liegt, deutlich reduziert werden. Die Auswirkungen auf die Koordinierungsbewertung wird in den folgenden Abschnitten untersucht.

Die mittlere Reisegeschwindigkeit schien unter dem Aspekt des beeinflussten Fahrens als Bewertungskenngröße der Koordinierung besonders geeignet zu sein (Abschnitt 5.7). Die Untersuchung verschiedener Streckenlängen unter Berücksichtigung eines unbeeinflussten Verkehrsablaufes relativiert diese Aussage. So werden bei längeren Streckenzügen grundsätzlich höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten erreicht. Die Streckenlänge fließt allerdings bei der Brilon/Schnabel-Methode nicht mit ein. Aus diesem Grund fällt die Bewertung womöglich bei kürzeren Haltlinienabständen tendenziell schlechter aus als bei längeren Abschnitten. Das Ausmaß soll ebenfalls in den nachfolgendem Abschnitt analysiert werden.

Der Performance Index *PI* nach Robertson erwies sich als probates Mittel, um die Ergebnisse verschiedener Szenarien untereinander zu vergleichen. Die Haltlinienabstände haben nur einen geringen Einfluss auf den ermittelten *PI*-Wert. Nachteilig ist jedoch, dass der Performance Index *PI* als alleinstehender Wert keine Bedeutung hat. Er erzielt erst mit dem Vergleich verschiedener Steuerungslösungen einen Nutzen. Da bei dem Verfahren nach Robertson keine Klasseneinteilung bspw. in Qualitätsstufen vorgesehen ist, bleibt der Performance Index *PI* bei der nachfolgenden Untersuchung unberücksichtigt.

6.5 Bewertung der Koordinierung mittels PVD

Die bis hier durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass PVD als Eingangsdaten für die bestehenden Verfahren grundsätzlich verwendbar sind. Im Rahmen der in Abschnitt 6.2 spezifizierten Mindestanforderung wurde der Inhalt und die Übertragungen der PVD so festgelegt, dass prinzipiell jede verkehrliche Bewertungskenngröße des jeweiligen Verfahrens ermittelt werden kann. Im Hinblick auf die PVD-gestützte Bewertung der Koordinierung stellt sich an dieser Stelle die Frage, inwiefern die mit den PVD ermittelten Ergebnisse mit denen der Referenz, also den Ergebnissen der Bewertung unter

Berücksichtigung eines unbeeinflussten Verkehrsablaufes, übereinstimmen. Bei der Klärung der Fragestellung ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die PVD liefernden Fahrzeuge ggf. ihren Fahrtverlauf der Koordinierung angepasst haben. Selbst wenn die PVD den vorliegenden beeinflussten Verkehrsablauf mit einer gewissen statistischen Signifikanz wiedergeben können, bedeutet dies nicht, dass auch gleichzeitig die daraus abgeleitete Koordinierungsqualität repräsentativ ist. Denn wie bereits mehrfach herausgestellt wurde, wird die Koordinierung bei allen Verfahren indirekt über den Verkehrsablauf unter Verwendung von Bewegungskenngrößen eines bestimmten Messfahrzeuges oder aller Fahrzeuge in der Zufahrt bewertet. Ein durch die Bereitstellung von individuellen Grüne-Welle-Informationen angepasster Verkehrsablauf bedeutet also nicht zwangsläufig, dass auch eine gute Koordinierung vorliegt. Die Problematik soll anhand der Szenarien mit einem Haltlinienabstand von 500 m, einem Auslastungsgrad von 85 % und einer Versatzzeitvariation von neun Sekunden erläutert werden. Die zugehörigen Kenngrößen sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Tabelle 6.1: Diskrepanzen bei der Bewertung mit und ohne Fahrerbeeinflussung

Szenario	β [%]	Bewertungsgrundlage	n_{Fz} [-]	HBS			Brilon/Schnabel	
				n_{Halte} [-]	D [%]	QSV	\bar{v}_R [km/h]	QSV
1*	0	alle Fahrzeuge	567	365	35,6	F	38,7	B
2**	5	alle Fahrzeuge	567	301	46,9	F	38,7	B
		ausgestattete Fahrzeuge	28***	5	82,1	C	38,3	B

* Referenzszenario ($\beta = 0$ %) \rightarrow unbeeinflusster Verkehrsablauf

** Berücksichtigung beeinflusster Fahrer ($\beta = 5$ %) \rightarrow beeinflusster Verkehrsablauf

*** Stichprobenumfang (5 % aller 567 Fahrzeuge) = Anzahl PVD-Fahrzeuge

Bei einem völlig unbeeinflussten Verkehrsablauf ($\beta = 0$ %, Referenzszenario) konnten, wie in Tabelle 6.1 dargestellt, nur 202 von 567 Fahrzeugen den relevanten Querschnitt ohne Stopp passieren. Das entspricht einer Durchfahrtsquote ohne Halt D von 35,6 %. Bei einem beeinflussten Verkehrsablauf mit einer Ausstattungsrate von fünf Prozent wurden insgesamt 64 Halte vermieden, so dass die Durchfahrten ohne Halt um ca. elf Prozent auf 46,9 % anstiegen. In beiden Fällen würde die Koordinierung nach den HBS-Schwellwerten der Tabelle 2.2 (S. 31) mit der schlechtesten Qualitätsstufe (QSV F) bewertet. Von den insgesamt 28 ausgestatteten (PVD)-Fahrzeugen mussten allerdings nur fünf Fahrzeuge halten. Die aus den PVD abgeleitete Durchfahrtsquote ohne Halt D beträgt dementsprechend 82,1 % und fällt damit deutlich besser aus, als die tatsächlich maß-

gebende Quote von 35,6 % im unbeeinflussten Verkehrsablauf. Unter der ausschließlichen Verwendung der kooperativ gewonnenen PVD würde die gleiche Koordinierung die QSV C zugewiesen bekommen und wäre aus Sicht des unbeeinflussten Verkehrsablaufes viel besser bewertet.

Die mittleren Reisegeschwindigkeiten \bar{v}_R divergieren gemäß der in Tabelle 6.1 aufgeführten Werte hingegen kaum. Sowohl im beeinflussten als auch im unbeeinflussten Verkehrsablauf beträgt die durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit über alle Fahrzeuge 38,7 km/h. Die aus den PVD berechnete mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R ist nur marginal geringer. Dementsprechend ist keine Abweichung in den festgestellten Qualitätsstufen erkennbar. Die Koordinierungsqualität scheint auch mithilfe der PVD ohne nennenswerte Abweichung zu den maßgebenden Ergebnissen unter Berücksichtigung eines unbeeinflussten Verkehrsablaufes feststellbar zu sein.

Dessen ungeachtet ist eine große Diskrepanz zwischen den Qualitätseinschätzungen der Bewertungsverfahren untereinander zu verzeichnen. In dem Beispiel in Tabelle 6.1 liegt bei Berücksichtigung eines unbeeinflussten Verkehrsablaufes nach dem HBS-Verfahren eine unwirksame Koordinierung (QSV F) und nach der Brilon/Schnabel-Methode eine gute Koordinierung (QSV B) vor. Es kann allerdings keine allgemeingültige Aussage getroffen werden, welche festgestellte QSV zutreffender ist. Um einen Streckenzug mit koordinierten LSA ausreichend zu bewerten, sollten sowohl der Anteil der Durchfahrten ohne Halt D als auch die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R verwendet werden [WIETHOLT-2009].

HBS-Verfahren

Folgend werden die mittels PVD festgestellten Bewertungskenngrößen mit den Kenngrößen im Referenzszenario, dem ein unbeeinflusster Verkehrsablauf zugrunde liegt, getrennt nach der Ausstattungsrate verglichen und deren Abweichungen ermittelt. Die Differenz zwischen der mittels PVD festgestellten und der im Referenzszenario vorhandenen Durchfahrtsquote ohne Halt lässt sich in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate β nach folgender Gleichung berechnen.

$$E_D(\beta) = D_{oFb,alle} - D_{mFb,PVD}(\beta) \quad (6.6)$$

mit:

- $E_D(\beta)$... Differenz zwischen der PVD-ermittelten und der im Referenzszenario vorhandenen Durchfahrtsquote ohne Halte in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate β
- $D_{oFb,alle}$... Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt im Referenzszenario (ohne Fahrerbeeinflussung, Ermittlung über alle Fahrzeuge)
- $D_{mFb,PVD}(\beta)$... Prozentsatz der mittels PVD ermittelten Durchfahrten ohne Halt in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate β (mit Fahrerbeeinflussung)

Bei einer negativen Differenz $E_D(\beta)$ ist der mittels PVD festgestellte Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt größer als der für die Bewertung maßgebende Wert der Durchfahrtsrate im Referenzszenario. In diesem Fall würde die Koordinierung unter Verwendung der PVD im Vergleich zum Referenzfall tendenziell besser bewertet werden. Um einen Überblick über das Ausmaß der Unterschiede über mehrere Szenarien zu erhalten, wurden die Differenzen $E_D(\beta)$ getrennt nach den Ausstattungsraten β zusammengetragen und statistisch aufbereitet. Die wichtigsten Informationen über die Verteilung kann der Boxplot-Darstellung in Abbildung 6.7 entnommen werden. Die Ausdehnung der Box (Rechteck) beschreibt den sogenannten Interquartilsabstand, in dem sich die mittleren 50 % aller Daten befinden [SACHS / HEDDERICH-2006]. Diese Werte liegen zwischen dem unteren (25 %-) und dem oberen (75 %-) Quartil. Das untere Quartil ist durch den Beginn der Box und das obere Quartil ist durch das Ende der Box wiedergegeben. Mit den Antennen (sogenannte Whisker) werden die außerhalb des Interquartilsabstands liegenden Werte dargestellt. Die Länge der Whisker wird als Erfahrungswert aus der explorativen Datenanalyse mit dem maximal 1,5-fachen Wert des Interquartilsabstands festgelegt [TUKEY-1977]. Die Punkte über- oder unterhalb der Whisker sind Ausreißer und der schwarze Balken innerhalb der Box ist der Median. Als weitere nützliche Information wurde den Boxplots in Abbildung 6.7 auch der arithmetische Mittelwert (Stern) hinzugefügt.

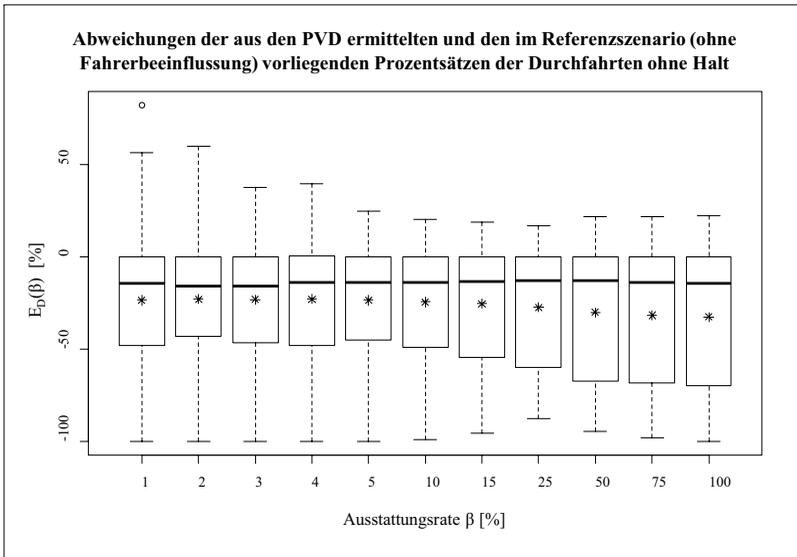


Abbildung 6.7: Abweichung der Durchfahrten ohne Halt

Die Boxplots zeigen signifikante Abweichungen in den ermittelten Prozentsätzen der Durchfahrten ohne Halt. Der Interquartilsabstand reicht in fast allen Fällen von 0 bis -50 %. Der Median beträgt bei sämtlichen Ausstattungsraten etwa -15 % und das arithmetische Mittel liegt sogar noch etwas unter diesem Wert (zwischen -23 und -33 %). Das bedeutet, dass die mittels PVD errechneten Prozentwerte demnach viel größer ausfallen als die Werte im unbeeinflussten Verkehrsablauf. Die deutliche Ausprägung der Interquartilsabstände und der Whisker verdeutlichen zudem eine starke Schwankung der Werte um den Mittelwert. So kommt es in einigen Fällen vor, dass die mit den PVD ermittelte Durchfahrtsquote ohne Halt doppelt so groß ist wie die vorhandene Rate im unbeeinflussten Verkehrsablauf. Aufgrund der großen Streuung lassen sich die Differenzen nicht verallgemeinern. Damit ist auch eine Rückrechnung auf die maßgebende Durchfahrtsquote des Referenzfalls nicht ohne Weiteres möglich.

In Abbildung 6.8 sind die Ergebnisse der Qualitätseinschätzung nach dem HBS-Verfahren dargestellt. Die Darstellung liefert einen Vergleich der unterschiedlichen Qualitätseinschätzungen. Für jedes der ausgewerteten Simulationsszenarien wurde die Qualitätsstufe über die PVD sowie die QSV unter Berücksichtigung eines unbeeinflussten Verkehrsablaufs (Referenzszenario) ermittelt und in Relation zueinander gesetzt. Je dunkler die Kachel, desto häufiger tritt dieses Ergebnis auf. Die dunkleren Kacheln befinden sich am linken und oberen Teil der Darstellung. Demnach wird die Koordinierung in den meisten Szenarien unter Anwendung der PVD im Hinblick auf den maßgebenden Wert

im Referenzszenario zu gut bewertet. So wurde beispielsweise in ca. 450 Fällen die beste Qualitätsstufe (QSV A) ermittelt, obwohl aus Sicht des unbeeinflussten Verkehrs eine unwirksame Koordinierung (QSV E bzw. QSV F) zugrunde lag.

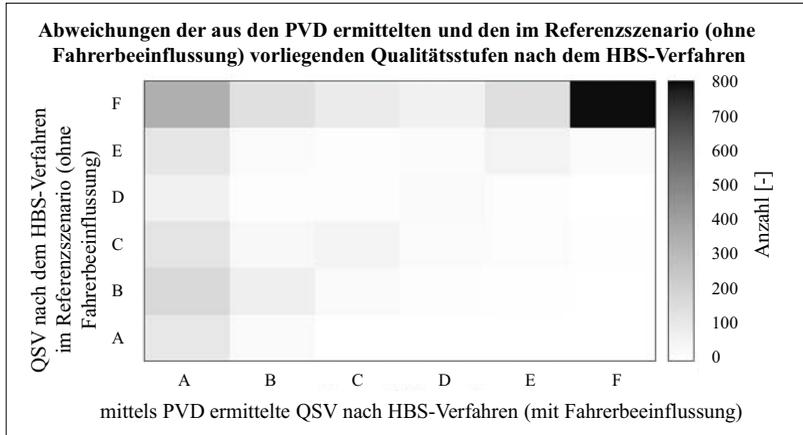


Abbildung 6.8: Abweichungen der festgestellten Qualitätsstufen nach dem HBS-Verfahren

Die Ergebnisabweichung hängt im Wesentlichen von dem zugrunde liegenden Koordinierungsmaß ab. So können bei einer guten Koordinierung die meisten Fahrzeuge den zweiten signalisierten Querschnitt ohne Halt passieren. Die Koordinierung würde sowohl über die PVD als auch über alle Fahrzeuge im Referenzszenario mit der gleichen (guten) Qualitätsstufe bewertet werden. Bei einem eher schlechten Koordinierungsmaß können ausgestattete Fahrzeug ggf. Halte vermeiden. Die Abweichung der Prozentsätze $E_D(\beta)$ ist dabei stark von den gegebenen Randbedingungen abhängig. So ist es entscheidend, wo sich das ausgestattete Fahrzeug im Pulk befindet und wie schnell es fahren müsste, um in der Grünen Welle zu schwimmen. Liegt diese Geschwindigkeit unter dem minimal akzeptierten Grenzwert, ist die Fahrerbeeinflussung hinfällig und das Fahrzeug verhält sich wie im unbeeinflussten Zustand. Demnach schwanken auch die Unterschiede in den jeweils durch die verschiedenen Verfahren festgestellten QSV. Eine Rückrechnung bzw. Ableitung der tatsächlich vorliegenden Qualitätsstufe des jeweiligen Referenzszenarios ist nicht ohne Weiteres möglich.

Brilon/Schnabel-Methode

Analog zu den obigen Untersuchungen werden nachfolgend die Abweichungen zwischen den mittels PVD ermittelten und den im Referenzszenario vorhandenen durchschnittli-

chen Geschwindigkeiten sowie die abgeleiteten Ergebnisse nach der Brilon/Schnabel-Methode analysiert. Die Differenz der mittleren Reisegeschwindigkeiten $E_{\bar{v}_R}(\beta)$ berechnet sich nach folgender Gleichung.

$$E_{\bar{v}_R}(\beta) = \bar{v}_{R,oFb,alle} - \bar{v}_{R,mFb,PVD}(\beta) \quad (6.7)$$

mit:

- $E_{\bar{v}_R}(\beta)$... Differenz zwischen der PVD-ermittelten und der im Referenzszenario vorhandenen mittleren Reisegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate β
- $\bar{v}_{R,oFb,alle}$... mittlere Reisegeschwindigkeit im Referenzszenario (ohne Fahrerbeeinflussung, Ermittlung über alle Fahrzeuge)
- $\bar{v}_{R,mFb,PVD}(\beta)$... über PVD ermittelte mittlere Reisegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate β (mit Fahrerbeeinflussung)

Die Abbildung 6.9 gibt in Anlehnung an die bisherigen Untersuchungen einen Überblick über ermittelten Geschwindigkeitsabweichungen. Im Gegensatz zu den Durchfahrten ohne Halt weicht die mittels PVD berechnete Reisegeschwindigkeit im Schnitt nur wenig vom maßgebenden Wert im Referenzszenario, dem ein unbeeinflusster Verkehrsablauf zugrunde liegt, ab. Besonders auffallend ist, dass der Median bei allen Ausstattungsraten ca. 0,5 km/h und der arithmetische Mittelwert ca. 1,0 km/h beträgt. Die mittleren 50 % aller Werte liegen i.d.R. zwischen -0,2 und 1,7 km/h. Der Interquartilsabstand hat demnach eine mittlere Spannweite von nur ca. 2 km/h. Auch die verhältnismäßig geringe Ausdehnung der Whisker bestätigt, dass die Werte nur wenig um die Mittelwerte streuen. Anders als bei den Durchfahrten ohne Halt sind jedoch bei allen untersuchten Ausstattungsraten ein paar Ausreißer zu verzeichnen. Diese reichen von -15 km/h bis hin zu 21 km/h.

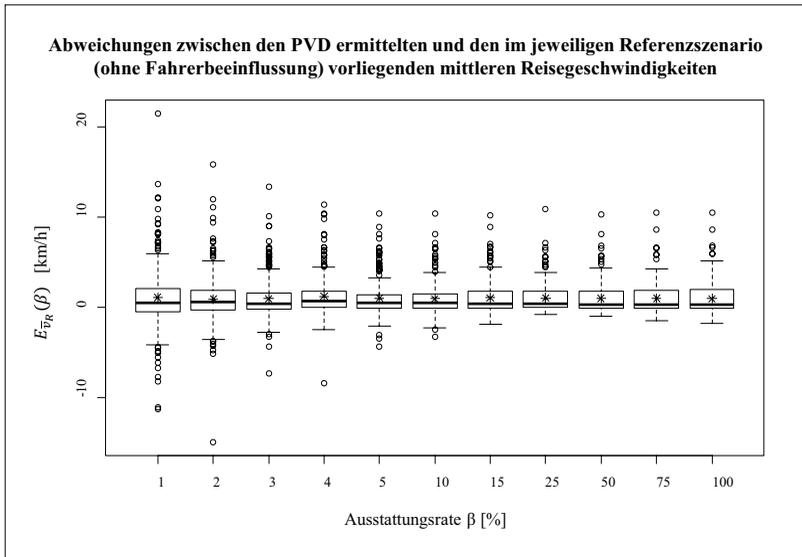


Abbildung 6.9: Abweichungen zwischen den PVD-ermittelten und den im jeweiligen Referenzszenario vorliegenden mittleren Reisegeschwindigkeiten

Welche Auswirkungen die Abweichungen auf das Ergebnis der ermittelten Qualitätsstufe hat, zeigt die Abbildung 6.10. Die hier dargestellten Abweichungen der nach der Brilon/Schnabel-Methode festgestellten QSV zeigen einen treppenförmigen Verlauf. Dies verdeutlicht eine große Übereinstimmung der mittels PVD ermittelten und der im Referenzfall vorliegenden Qualitätsstufe. Damit ist nachgewiesen, dass sich die PVD grundsätzlich als Eingangsdaten für das Verfahren eignen. Die direkt aus den PVD abgeleitete Koordinierungsqualität der Brilon/Schnabel-Methode ist als repräsentativ anzusehen und spiegelt die tatsächlich vorhandene Qualität des Referenzszenarios wider. Dem entgegen steht die allgemein sehr positiv ausfallende Bewertung der Koordinierung. Wie der Darstellung in Abbildung 6.10 zu entnehmen ist, gibt die Brilon/Schnabel-Methode weder unter Verwendung der PVD noch unter Berücksichtigung aller Fahrzeuge im unbeeinflussten Verkehrsablauf einen Hinweis auf eine schlechte bzw. unwirksame Koordinierung.

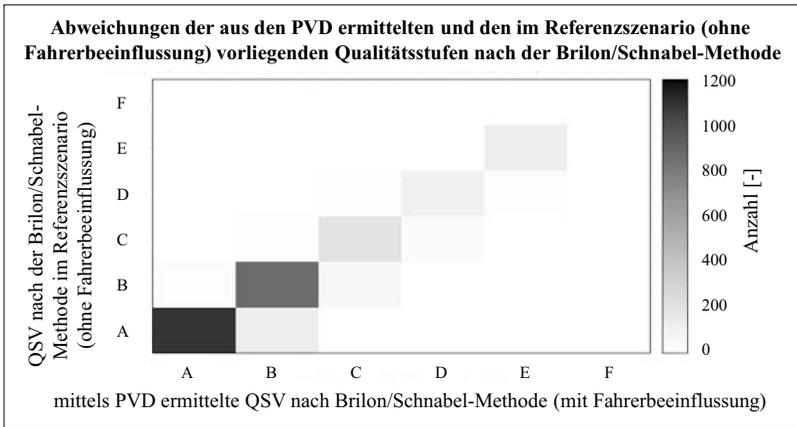


Abbildung 6.10: Abweichungen der festgestellten Qualitätsstufen nach der Brilon/Schnabel-Methode

6.6 Zwischenfazit

Die in diesem Kapitel 6 diskutierten Untersuchungsergebnisse verdeutlichen, dass die fahrzeugbezogenen Daten (PVD) grundsätzlich zur Qualitätseinschätzung signalisierter Straßennetze verwendet werden können. Die Datenübertragung der ausgestatteten Fahrzeuge wurde so festgelegt, dass aus den mitgelieferten PVD prinzipiell jede Kenngröße der etablierten Bewertungsverfahren nach dem HBS [FGSV-2009], nach Brilon und Schnabel [BRILON / SCHNABEL-2003] sowie nach Robertson [ROBERTSON-1969] ausgerechnet werden kann. Die durchgeführten simulativen Untersuchungen mit verschiedenen topologischen und signaltechnischen Gegebenheiten bescheinigen diese Aussage.

Es wurde ferner untersucht, in welchem Maße sich der infolge der Bereitstellung von individuellen Grüne-Welle-Informationen veränderte bzw. beeinflusste Verkehr auf die Bewertung einer Koordinierung unter Anwendung etablierter Verfahren auswirkt. Um die Unterschiede quantifizieren zu können, wurden zunächst die Referenzszenarien, denen ein unbeeinflusster Verkehr zugrunde liegt, unter Anwendung bestehender Verfahren bewertet. Nachfolgend wurden die Ergebnisse der unterschiedlichen Bewertungsmethoden gegenübergestellt, um eventuell vorhandene Differenzen herauszufinden. Hierzu wurden alle in Abschnitt 5.2.1 spezifizierten Simulationsszenarien mit einer Ausstattungsrate β von 0 % und einem Auslastungsgrad α von 85 % einer Bewertung mit dem HBS-Verfahren und mit der Brilon/Schnabel-Methode unterzogen (siehe Abschnitt 2.4.6, S. 30 ff.). Die Ergebnisse bildeten den Referenzdatensatz für die anschließende Beurteilung unter Verwendung der PVD. Bei der Bewertung der Koordinierungen des Re-

ferenzszenarios offenbarten sich bereits gravierende Unterschiede zwischen den mittels Brilon/Schnabel-Methode und den mittels HBS-Verfahren festgestellten Qualitätsstufen. Infolge der schrittweisen Variation der Versatzzeit am zweiten signalisierten Querschnitt konnte aus planerischer Sicht prinzipiell jede mögliche Variante und somit jedes Koordinierungsmaß abgedeckt werden. Die Ergebnisse der Bewertung anhand des HBS-Verfahrens deckten das gesamte Qualitätsspektrum ab, wobei die Mehrzahl aller Szenarien mit den schlechtesten QSV bewertet wurden. Demnach liegt den meisten Szenarien eine weitgehend unwirksame Koordinierung zugrunde. Nach der Brilon/Schnabel-Methode gibt es hingegen keine Hinweise auf eine unwirksam koordinierte Steuerung. Die LSA-Koordinierungen wurden mehrheitlich mit den QSV A und QSV B, also mit "sehr gut" und "gut", beurteilt.

Im Anschluss an die Bewertung der Referenzszenarien wurde die jeweils zugrunde liegende Koordinierung unter Anwendung der PVD beurteilt. Anders als bei den Referenzfällen flossen hier nur die Daten der ausgestatteten Fahrzeuge in die Bewertung ein. Grundlage der Untersuchung waren die oben beschriebenen Simulationsergebnisse resultierend aus verschiedenen Ausstattungsgraden, Versatzzeiten, Streckenlängen und Auslastungsgraden. Die ausgewerteten Ergebnisse wurden mit dem Referenzdatensatz, also mit den maßgebenden Ergebnissen der Bewertung des unbeeinflussten Verkehrsablaufes, verglichen. Hier zeigte sich, dass sich der direkt ermittelte Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt unter Verwendung der PVD nicht als Qualitätskenngröße eignet. Dies spiegelt sich auch in den Qualitätsbeurteilungen nach dem HBS-Verfahren wider. Die Abweichungen zwischen den PVD-ermittelten und den jeweiligen im Referenzszenario vorliegenden QSV sind zum Teil enorm. Ein systematischer Fehler konnte nicht festgestellt werden. Infolgedessen ist eine einfache Rückrechnung zum eigentlichen Kennwert bzw. eine Ableitung zur maßgebenden QSV nicht möglich.

Die mittlere Reisegeschwindigkeit scheint auf den ersten Blick auch beim Vorliegen eines beeinflussten Verkehrsablaufes als Qualitätsindikator geeignet zu sein. Dies wird durch die verhältnismäßig geringe Abweichung der mittels PVD ermittelten durchschnittlichen Geschwindigkeit zum Referenzwert deutlich. Auch die nach der Brilon/Schnabel-Methode abgeleiteten Koordinierungsqualitäten geben die tatsächlich vorhandene Qualität des Referenzszenarios wieder. Infolge der schrittweisen Variation der Versatzzeit am zweiten signalisierten Querschnitt konnte prinzipiell jede mögliche Variante und somit jedes Koordinierungsmaß abgedeckt werden. Demzufolge sollten bei einer Koordinierungsbewertung aus planerischer Sicht auch alle möglichen Qualitätsstufen vorkommen. Nach der Brilon/Schnabel-Methode wiesen allerdings fast keine Szenarien schlechte Koordinierungsqualitäten (schlechter als QSV D) auf. Zudem ist eine große Diskrepanz zwischen den nach der Brilon/Schnabel-Methode und den nach HBS-Verfahren festgestellten Koordinierungsqualitäten zu verzeichnen.

Ein weiterer Nachteil besteht im Einfluss der Haltlinienabstände. Je länger die Strecke,

desto höher ist tendenziell die mittlere gefahrene Geschwindigkeit. Dies macht sich auch in den Ergebnissen der Brilon/Schnabel-Methode bemerkbar. Je größer der Abstand zwischen zwei Haltlinien, desto besser werden die Bewertungsergebnisse.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass kein etabliertes Verfahren unter Verwendung der direkt aus den PVD abgeleiteten Bewertungskenngrößen zuverlässige und repräsentative Ergebnisse liefern würde. Daher sind die bestehenden Verfahren bei einem beeinflussten Verkehrsablauf nur eingeschränkt anwendbar.

7 Multivariates Bewertungsverfahren

7.1 Vorbemerkungen

Die Untersuchungen in Kapitel 6 haben gezeigt, dass sich die bisher angewendeten Verfahren nur bedingt eignen, um die Koordinierungsqualität mittels PVD angemessen zu bewerten. Der direkt aus den PVD abgeleitete Anteil der Durchfahrten ohne Halt D weicht zum Teil erheblich von dem im Referenzszenario errechneten und zugleich maßgeblichen Wert ab. Die deutlichen Differenzen machen sich folglich auch in den auseinanderdriftenden Qualitätsbeurteilungen bemerkbar. Aufgrund der Fahrerbeeinflussung kommt es nicht selten vor, dass vermeintlich schlecht bzw. gar nicht koordinierte Lichtsignalanlagen über die PVD mit der QSV A, also "sehr gut", bewertet werden. Für die Bewertung unter Verwendung der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R ist die beeinflusste Fahrweise hingegen weniger ausschlaggebend. Hier zeigten sich nur geringe Abweichungen in den Bewertungsergebnissen. Da die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R jedoch relativ stark vom Haltlinienabstand l_{HL} abhängt, scheint eine Beurteilung allein über diesen Kennwert ebenfalls wenig aussagekräftig zu sein. Aus diesen Gründen wird im vorliegenden Kapitel 7 ein im Rahmen eigener Forschungsarbeiten entwickeltes Bewertungsverfahren vorgestellt, welches die beiden Bewertungskenngrößen Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt D und die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R aufgreift sowie wesentliche Einflussfaktoren wie bspw. den Haltlinienabstand l_{HL} mit einbezieht. Infolge der gleichzeitigen Berücksichtigung mehrerer zusammenhängender Variablen kann dieser Ansatz auch als multivariates Bewertungsverfahren bezeichnet werden.

Das entwickelte Verfahren greift das im HBS verwendete Sechs-Stufen-Konzept mit dem entsprechenden Qualitätsindikator sowie die zugehörigen Schwellwerte auf. Begründet wird dies durch die Abdeckung des gesamten QSV-Spektrums, welche im Kapitel 6 festgestellt wurde. Hier wurden sämtliche Koordinierungsgrade durch eine Vielzahl von Szenarien mit variierenden Versatzeiten simulativ untersucht. Aus planerischer Sicht wurde also jede mögliche Variante und somit jedes Koordinierungsmaß in die Untersuchung einbezogen. Die Bewertungsergebnisse unter Anwendung des HBS-Verfahren deckten im Gegensatz zur Brilon/Schnabel-Methode ebenfalls das gesamte QSV-Spektrum ab. Die im HBS aufgeführten Schwellwerte sind aus diesem Grund auch in dem multivariaten Verfahren als Bewertungsgrundlage zugrunde gelegt.

Da die genannte Abdeckung des QSV-Spektrums jedoch nur unter der Bedingung eines unbeeinflussten Verkehrsablaufes zutrifft, liefert das HBS-Verfahren unter Verwendung kooperativ gewonnener Daten keine repräsentativen Ergebnisse. Das multivariate Verfahren versucht daher, den sich theoretisch im unbeeinflussten Verkehrsablauf ergebenden Anteil der Durchfahrten ohne Halt D anhand der PVD abzuschätzen. Die Abschätzung erfolgt mit Hilfe der direkt aus den PVD ermittelten Kenngrößen. Der mittels PVD abgeleitete Prozentwert der Durchfahrten ohne Halt D wird hierbei in Abhängigkeit von der ebenfalls aus den PVD ermittelten mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R und der Haltlinienentfernung l_{HL} abgemindert bzw. korrigiert. Der Korrekturfaktor bzw. der Grad der Abminderung hängt demnach von den genannten Einflussfaktoren ab und wurde als Funktion in Abhängigkeit von der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R und des Haltlinienabstands l_{HL} beschrieben. Diese Korrekturfunktion wurde über eine Annäherung an die simulativ ermittelten Prozentwerte der Durchfahrten ohne Halt D der Referenzszenarien bestimmt. Die Ermittlung der Korrekturfunktion wird in den nächsten Abschnitten beschrieben.

7.2 Verfahrensentwicklung

7.2.1 Datengrundlage

Die Grundlage für die Verfahrensentwicklung bildeten die ausgewerteten Daten der in Kapitel 5 durchgeführten Simulationsuntersuchungen. Hier wurde eine Vielzahl von Szenarien mit unterschiedlichen Haltlinienabständen l_{HL} , Versatzeitvariationen t_{VZV} , Auslastungsgraden α und Ausstattungsraten β simuliert. Für die Verfahrensentwicklung wurden zunächst Szenarien mit einem Auslastungsgrad von $\alpha = 85\%$ berücksichtigt. Die Untersuchung schloss zwölf Szenarien mit diversen Ausstattungsraten β ein. Darüber hinaus wurden für jede Ausstattungsrate alle 20 Szenarien mit unterschiedlichen Versatzeitvariationen t_{VZV} mit einbezogen. Für jedes der vier Streckenszenarien mit variierenden Haltlinienabständen l_{HL} ergaben sich Daten von 240 ausgewerteten Einzelsimulationen. Der gesamte Stichprobenumfang umfasste in Summe 960 Szenarien. Für jedes Szenario wurden die wesentlichen Kenngrößen extrahiert und in tabellarischer Form zusammengestellt. Ein Auszug ist in Tabelle 7.1 zu finden.

Tabelle 7.1: Auszug der Datengrundlage zur Verfahrensentwicklung

Nr.	α [%]	l_{HL} [m]	t_{VZV} [s]	β [%]	$D_{mFB,PVD}$ [%]	$\bar{v}_{R,PVD}$ [%]
1	85	250	-30	0	0,2	18,7
2	85	250	-27	0	0	17,5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
21	85	250	-30	1	0	18,2
22	85	250	-27	1	0	18,2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
239	85	250	24	100	0	21,2
240	85	250	27	100	0	19,6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
261	85	500	-30	1	0	26,7
262	85	500	-27	1	0	23,4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
959	85	1000	24	100	94,3	36,4
960	85	1000	27	100	95,5	35,5

7.2.2 Korrelationsanalysen

Zur Ermittlung der Korrekturfunktionen musste zunächst überprüft werden, ob es einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt D und der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R gibt. Hierzu wurden alle Szenarien mit unbeflusstem Verkehrsablauf sowie alle Szenarien mit Fahrerbeeinflussung gleichermaßen berücksichtigt. Die entsprechenden Werte wurden getrennt nach den untersuchten Streckenlängen in zweidimensionale Darstellungen überführt. Abbildung 7.1 zeigt das Ergebnis exemplarisch am Beispiel der Szenarien mit einem Haltlinienabstand l_{HL} von 500 m. Auf der Abszissenachse ist die mittlere Geschwindigkeit \bar{v}_R und auf der Ordinatenachse der Prozentwert der Durchfahrten ohne Halt D abgetragen. Die sich in den Referenzszenarien einstellenden Prozentwerte D wurden anhand der Fahrtverlaufsdaten sämtlicher Fahrzeuge ermittelt. Die PVD stammen hingegen nur von den ausgestatteten Fahrzeugen, welche ein der Signalisierung angepasstes Fahrprofil aufweisen können.

Das Bestehen eines funktionalen Zusammenhangs wurde anhand einer Korrelationsanalyse geprüft. Hier zeigte sich, dass sich der Zusammenhang aufgrund eines hohen Determinationskoeffizienten R^2 am besten anhand einer quadratischen Funktion ($y = ax^2 + bx + c$) beschreiben lässt. Die Korrelationsanalysen ergaben die in Abbildung 7.1 visualisierten

quadratischen Funktionen. Die zugehörigen Funktionsgleichungen sind im Anhang J aufgeführt.

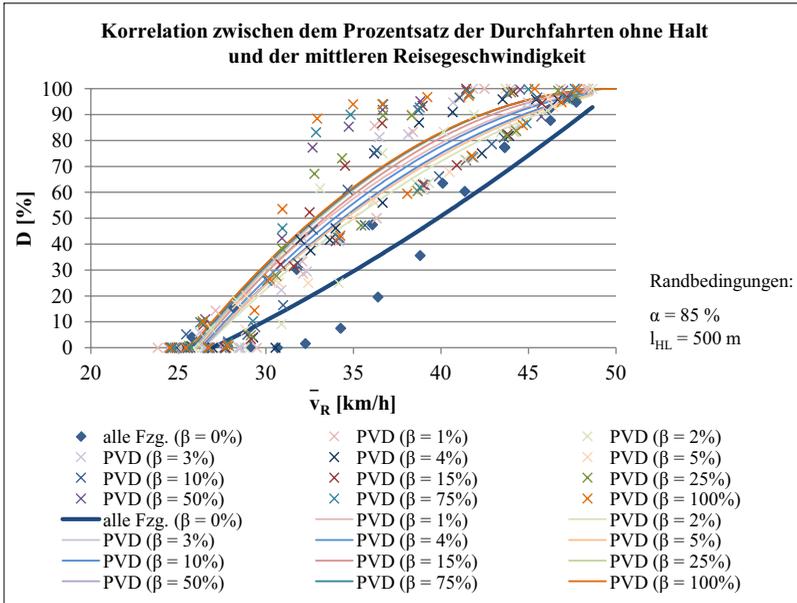


Abbildung 7.1: Korrelation zwischen D und \bar{v}_R , $\alpha = 85 \%$, $l_{HL} = 500 \text{ m}$

Der im Anhang J aufgeführte Determinationskoeffizient R^2 ist in allen Fällen größer als 0,84. Bei Ausstattungsraten β unter 10 % liegt das Bestimmtheitsmaß R^2 sogar über 0,90. Dies verdeutlicht einen Zusammenhang trotz leichter Streuungen. In den Abbildungen J.1 bis J.4 im Anhang J sind die Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen von Szenarien mit anderen Streckenlängen zu finden. Es zeigte sich, dass der Determinationskoeffizient R^2 auch deutlich kleiner als die hier angegebenen Werte werden kann. Insgesamt schwankte R^2 jedoch mit zunehmenden Haltlinienabstand l_{HL} und mit steigender Ausstattungsrate β . Ein tendenzieller Verlauf des Bestimmtheitsmaßes ist nur bedingt feststellbar. Da R^2 durchschnittlich größer als 0,85 ist, kann der Zusammenhang zwischen dem Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt D und der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R auch bei anderen Streckenlängen grundsätzlich bestätigt werden.

7.2.3 Ermittlung der Korrekturfunktionen

Die in Abbildung 7.1 visualisierten Korrelationsfunktionen zeigen eindeutige Kurvenverläufe. Während die Kurve der Referenzszenarien ($\beta = 0 \%$) eine positive Krümmung

annimmt, weisen die Kurven des beeinflussten Verkehrsablaufs eine negative Krümmung auf. Letztendlich stellt der jeweilige vertikale Abstand der Kurven untereinander den idealisierten Grad der Abminderung dar. Dabei ergibt sich der diskrete Wert des Gewichtungsbzw. Abminderungsfaktors $f_{PVD}(\beta, \bar{v}_R)$ aus der Division der entsprechenden Werte der Korrelationsfunktion an der Stelle \bar{v}_R . Der jeweilige Abminderungsfaktor $f_{PVD}(\beta, \bar{v}_R)$ kann anhand der Gleichung 7.1 berechnet werden.

$$f_{PVD}(\beta, \bar{v}_R) = \frac{D_{oFb,alle,Kf}(\bar{v}_R)}{D_{mFb,PVD,Kf}(\beta, \bar{v}_R)} \quad (7.1)$$

mit:

- $f_{PVD}(\beta, \bar{v}_R)$... Wert des Abminderungsfaktors in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate β und der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R
- $D_{oFb,alle,Kf}(\bar{v}_R)$... Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt im unbeeinflussten Verkehrsablauf auf Basis der Korrelationsfunktion in Abhängigkeit von \bar{v}_R
- $D_{mFb,PVD,Kf}(\beta, \bar{v}_R)$... Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt nach PVD auf Basis der Korrelationsfunktion in Abhängigkeit von \bar{v}_R und β

Für die Ableitung der Korrekturfunktionen wurden die Werte der Abminderungsfaktoren an mehreren Stellen berechnet und einer weiteren Korrelationsanalyse unterzogen. Hierbei musste beachtet werden, dass der Abminderungsfaktor nicht negativ und nicht größer als 1 sein darf. Der Wertebereich war demnach $0 \leq f_{PVD}(\beta, \bar{v}_R) \leq 1$. Die Graphen der Korrekturfunktionen mussten den Punkt $P(\bar{v}_R \cdot 100/v_{zul} = 100 \mid f_{PVD}(\beta, \bar{v}_R) = 1)$ schneiden. Weiterhin war zu berücksichtigen, dass eine Fahrerbeeinflussung nur bis zur minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung stattfindet. Im vorliegenden Fall beträgt diese 30 km/h, was 60 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit v_{zul} entspricht. Liegt die mittlere Reisegeschwindigkeit unterhalb dieser Grenze, ist davon auszugehen, dass den ausgestatteten Fahrzeugen keine Geschwindigkeitsempfehlungen vorlagen und sie sich deshalb wie im unbeeinflussten Modus fortbewegten. Aus diesem Grund wurde der Wert von $D_{mFb,PVD}$ nur abgemindert, wenn die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R überhalb der minimal akzeptierten Geschwindigkeitsempfehlung lag. Der zugrunde gelegte Definitionsbereich liegt zwischen 30 km/h und 50 km/h.

Es wurden alle Quotientenwerte an den Stellen \bar{v}_R berechnet, die auch tatsächlich in den Simulationen auftraten. Die Wertepaare wurden tabellarisch zusammengetragen und in ein Koordinatensystem übertragen. Die Ordinate gibt in diesem Fall den entsprechenden Wert des Gewichtungsfaktors $f_{PVD}(\beta, \bar{v}_R)$ wieder. In Abbildung 7.2 sind die Graphen der durch die Korrelationsanalyse ermittelten Korrekturfunktionen am Beispiel der Szenarien

mit einem 500 m langen Haltlinienabstand und einem Auslastungsgrad von 85 % dargestellt. Tabelle 7.2 beschreibt die zugehörigen Funktionen mathematisch. In den Abbildungen J.5 bis J.8 im Anhang J sind die Ergebnisse der anderen Streckenszenarien dargestellt. Da die Korrekturfaktoren bereits vorab über die Werte der Korrelationsfunktionen berechnet wurden, lässt sich der funktionale Zusammenhang zwischen \bar{v}_R und $f_{PVD}(\beta, \bar{v}_R)$ auch hier wieder mit einer quadratischen Funktion beschreiben. Die Determinationskoeffizienten R^2 fallen dementsprechend hoch aus und nähern sich dem Wert 1 an.

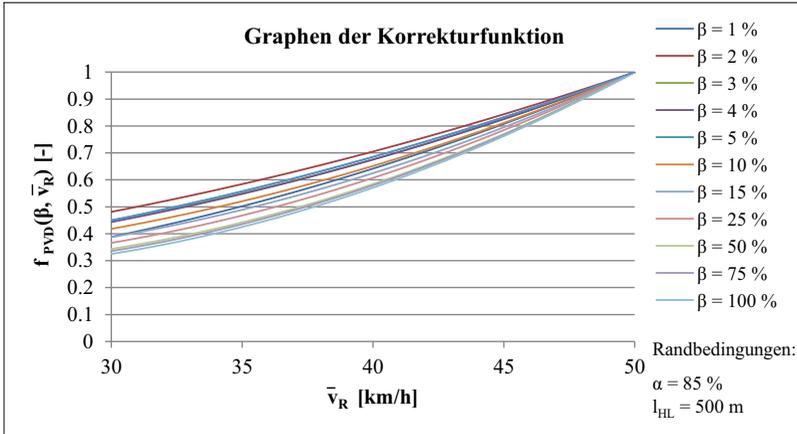


Abbildung 7.2: Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 500\text{ m}$

Tabelle 7.2: Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 500\text{ m}$

β [%]	Korrekturfunktionen	R^2
1	$y(x) = 0,000522 \cdot (x - 50)^2 + 0,041030 \cdot (x - 50) + 1,00$	0,997
2	$y(x) = 0,000354 \cdot (x - 50)^2 + 0,033011 \cdot (x - 50) + 1,00$	0,999
3	$y(x) = 0,000490 \cdot (x - 50)^2 + 0,037319 \cdot (x - 50) + 1,00$	0,998
4	$y(x) = 0,000461 \cdot (x - 50)^2 + 0,037061 \cdot (x - 50) + 1,00$	0,998
5	$y(x) = 0,000393 \cdot (x - 50)^2 + 0,035386 \cdot (x - 50) + 1,00$	0,998
10	$y(x) = 0,000572 \cdot (x - 50)^2 + 0,040535 \cdot (x - 50) + 1,00$	0,998
15	$y(x) = 0,000686 \cdot (x - 50)^2 + 0,044363 \cdot (x - 50) + 1,00$	0,997
25	$y(x) = 0,000756 \cdot (x - 50)^2 + 0,046817 \cdot (x - 50) + 1,00$	0,997
50	$y(x) = 0,000872 \cdot (x - 50)^2 + 0,050254 \cdot (x - 50) + 1,00$	0,996
75	$y(x) = 0,000883 \cdot (x - 50)^2 + 0,050875 \cdot (x - 50) + 1,00$	0,996
100	$y(x) = 0,000915 \cdot (x - 50)^2 + 0,052040 \cdot (x - 50) + 1,00$	0,996

7.3 Vereinfachung und Anwendung des Verfahrens

Die Abbildungen J.5 bis J.8 im Anhang J zeigen eine hohe Kongruenz der Kurven. Die Graphen der Korrekturfunktionen liegen bei allen Streckenszenarien nah beieinander. Daraus lässt sich ableiten, dass die Ausstattungsrate β in Bezug auf den Abminderungsfaktor eine untergeordnete Rolle spielt. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, die Ergebnisse für jedes Streckenszenario zu vereinheitlichen und nur eine Funktion bzw. nur einen Graphen auszugeben. Die Ermittlung der Funktion kann analog zu der oben genannten Vorgehensweise erfolgen. Jedoch müssen bei der Korrelationsanalyse die Wertepaare aller Ausstattungsraten zusammen betrachtet und demzufolge nur eine Korrelationsfunktion pro Streckenszenario (Gleichung 7.2 bis 7.5) ermittelt werden. Die Vereinfachung hat den Vorteil, dass das Verfahren auch ohne Kenntnis der Ausstattungsrate β angewendet werden kann.

$$f_{PVD,l_{HL}=250m}(\bar{v}_R) = 0,000255 \cdot (\bar{v}_R - 50)^2 + 0,020009 \cdot (\bar{v}_R - 50) + 1,00 \quad (7.2)$$

$$f_{PVD,l_{HL}=500m}(\bar{v}_R) = 0,000607 \cdot (\bar{v}_R - 50)^2 + 0,3042621 \cdot (\bar{v}_R - 50) + 1,00 \quad (7.3)$$

$$f_{PVD,l_{HL}=750m}(\bar{v}_R) = 0,000796 \cdot (\bar{v}_R - 50)^2 + 0,058278 \cdot (\bar{v}_R - 50) + 1,00 \quad (7.4)$$

$$f_{PVD,l_{HL}=1000m}(\bar{v}_R) = 0,000548 \cdot (\bar{v}_R - 50)^2 + 0,072349 \cdot (\bar{v}_R - 50) + 1,00 \quad (7.5)$$

Letztendlich basiert das hier vorgestellte multivariate Verfahren auf dem Bewertungsschema des HBS 2001. Die Koordinierung wird ebenso über den Qualitätsindikator Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt beurteilt. Auf eine Änderung des bewährten Sechsstufen-Schemas und der zugehörigen Schwellwerte wurde bewusst verzichtet. Der Infrastrukturbetreiber respektive der Verkehrsingenieur hat so die Möglichkeit, die gewonnenen Ergebnisse nach altbekannter Vorgehensweise zu interpretieren und entsprechende Maßnahmen abzuleiten. Die Anwendung gleicher Schwellwerte dient einer Vergleichbarkeit, so dass die Ergebnisse der multivariaten Methode den Ergebnissen der herkömmlichen Bewertung des fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufes gegenübergestellt werden können. Eine Bewertung unter der Verwendung der PVD nach dem gleichen Prinzip liefert andere Ergebnisse als bei der herkömmlichen Bewertung unter Berücksichtigung eines unbeeinflussten Verkehrsablaufs. Der direkt aus den PVD ermittelte Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt D fällt im Vergleich zum unbeeinflussten Verkehr höher aus. Das multivariate Verfahren berücksichtigt als weitere Faktoren die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R und den Haltlinienabstand l_{HL} , da diese Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf das Bewertungsergebnis haben. Mit Hilfe dieser Einflussfaktoren kann der Anteil der Durchfahrten ohne Halt D geschätzt werden, der sich theoretisch im unbeeinflussten Verkehrsablauf einstellen würde. Der abgeschätzte bzw. korrigierte Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt D_{korrr} kann nach der folgenden Korrekturgleichung (Gleichung 7.6)

berechnet werden.

$$D_{korr} = D_{mFb,PVD} \cdot f_{PVD} \quad (7.6)$$

mit:

D_{korr} ... abgeschätzter bzw. korrigierter Wert des Prozentsatzes der Durchfahrten ohne Halt

$D_{mFb,PVD}$... Prozentsatz der mittels PVD ermittelten Durchfahrten ohne Halt

f_{PVD} ... Abminderungsfaktor

Der abgeminderte bzw. korrigierte Wert D_{korr} soll dabei bestenfalls dem Wert entsprechen, der sich theoretisch im unbeeinflussten Verkehrsablauf ergeben würde ($D_{oFb,alle}$). Der Wert des Abminderungsfaktors f_{PVD} ist dabei von der Haltlinienentfernung l_{HL} und von der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R abhängig. Entspricht die Distanz der Haltlinien einer der für die Verfahrensentwicklung verwendeten Größen (250, 500, 750 oder 1000 m) kann der Abminderungsfaktor f_{PVD} direkt anhand der Gleichungen 7.2 bis 7.5 bestimmt werden. Alternativ ist eine Ermittlung über die zugehörigen Graphen im Diagramm der Abbildung 7.3 möglich. Die Qualität der Koordinierung ist mit dem korrigierten Wert D_{korr} nach dem bewährten Schema des HBS (Tabelle 2.2, S. 31) zu beurteilen.

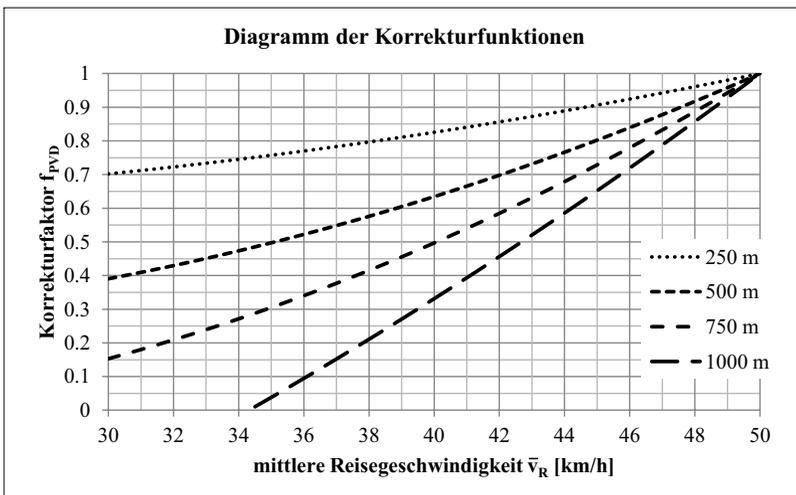


Abbildung 7.3: Zusammenfassung der vereinfachten Korrekturfunktionen

Der horizontale Abstand der Kurven spiegelt den in Abschnitt 5.5 (S. 81) erläuterten

Zusammenhang zwischen der Fahrerbeeinflussung und des Haltlinienabstands l_{HL} wider. Je weiter die Haltlinien voneinander entfernt sind, desto wahrscheinlicher ist Bereitstellung von dynamischen Grüne-Welle-Informationen. Die damit einhergehende Fahrerbeeinflussung hat zur Folge, dass die Anzahl der Durchfahrten ohne Halt mit steigendem Haltlinienabstand l_{HL} zunimmt. Die anhand der PVD ermittelte Durchfahrtsquote ohne Halt $D_{mFb,PVD}$ ist demnach bei höheren Haltlinienabständen mehr abzumindern, als bei Strecken mit kleineren Haltlinienabständen. Je weiter die Haltlinien voneinander entfernt sind, desto geringer ist also der anzusetzende Korrekturfaktor f_{PVD} . Die Graphen im Diagramm der Abbildung 7.3 beziehen sich auf die untersuchten Haltlinienabstände von 250 m, 500 m, 750 m und 1.000 m. Zur Ermittlung des Korrekturfaktors f_{PVD} für andere Haltlinienabstände ist zwischen dem nächst kleineren und größeren Wert zu interpolieren. Das Verfahren wurde auf Grundlage vorab definierter Signalzeitenpläne, Versatzzeiten und Streckenlängen entwickelt. Die Grünzeitdauer t_{Gr} betrug an beiden festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen 20 s und die Umlaufzeit t_U 60 s. An dieser Stelle bleibt noch ungeklärt, ob und inwiefern das Verfahren für Strecken mit Haltliniendistanzen außerhalb der genannten Grenzen und für Signalisierungen mit anderen Freigabezeitanteilen angewendet werden kann.

Der direkt aus den PVD ermittelte Wert $D_{mFb,PVD}$ ist nur abzumindern, wenn die mittlere Reisegeschwindigkeit der ausgestatteten Fahrzeuge \bar{v}_R in den gezeigten Grenzen zwischen 30 und 50 km/h liegt. Ist die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R kleiner als die angenommene Akzeptanzgrenze von 60 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, kann davon ausgegangen werden, dass den Fahrzeugen keine Geschwindigkeitsempfehlung vorlagen und sie sich demzufolge analog der unbeeinflussten Fahrzeuge fortbewegten. Zudem fällt die Durchfahrtsrate ohne Halt $D_{mFb,PVD}$ bei niedrigen Geschwindigkeiten vorwiegend gering aus, so dass der Wert nicht weiter abgemindert werden muss.

7.4 Aussagefähigkeit

Nachfolgend soll das Beurteilungsvermögen des multivariaten Verfahrens hinsichtlich der Koordinierung überprüft werden. Für die Überprüfung bietet es sich an, die Ergebnisse des multivariaten Verfahrens mit den Referenzergebnissen des unbeeinflussten Verkehrsablaufes zu vergleichen und deren Abweichungen herauszustellen. Als Datengrundlage dienen dieselben simulativ ermittelten Daten, die schon für die Ermittlung der Korrekturfunktionen verwendet wurden. Hierbei handelt es sich um Datensätze von 960 verschiedenen Szenarien mit einem Auslastungsgrad α von 85 %. Zunächst werden die Abweichungen zwischen den ermittelten Prozentwerten der Durchfahrten ohne Halt der Referenzszenarien $D_{oFb,alle}$ und den aus den PVD ermittelten Werten $D_{mFb,PVD}$ untersucht. Anschließend werden die aus dem HBS-Verfahren und aus dem multivariaten Verfahren resultierenden Qualitätsstufen gegenübergestellt.

ber ausfallen als die Werte im unbeeinflussten Verkehrsablauf. Die enorme Ausprägung des Interquartilsabstands und der Whisker verdeutlichen eine große Streuung der Werte. Wie auf der rechten Seite in Abbildung 7.4 zu sehen ist, können die Abweichungen E_D zwischen den Prozentwerten der Durchfahrten ohne Halt der Referenzszenarien $D_{oFb,alle}$ und den mittels des multivariaten Verfahrens ermittelten Werten D_{korr} deutlich reduziert werden. Nach der Korrektur beträgt sowohl der Median als auch das arithmetische Mittel fast 0 %. Der IQR wird mit einer Spannweite von 19 % (4 bis -15 %) um mehr als die Hälfte verkleinert. Dies ist als positives Resultat zu werten und verdeutlicht das Potenzial des multivariaten Verfahrens. Der korrigierte Prozentwert der Durchfahrten ohne Halt D_{korr} entspricht in weiten Teilen dem Wert, der sich theoretisch im unbeeinflussten Verkehrsablauf ergeben würde ($D_{oFb,alle}$). Das gute Resultat wird geringfügig durch die Ausprägungen der Whisker sowie durch die Ausreißer in positiver Richtung relativiert. Die Antennenlängen sind zwar in Summe kürzer als vor der Korrektur, allerdings sind sie nicht klein genug, um die Werte über- bzw. unterhalb des IQR vernachlässigen zu können. Es weichen immer noch einige Werte um bis zu 50 % vom Referenzwert $D_{oFb,alle}$ ab, was sich womöglich auch in der Beurteilung der zugrunde liegenden Koordinierung bemerkbar macht.

In Abbildung 7.5 sind die Ergebnisse der Qualitätseinschätzung nach dem Sechs-Stufen-Schema unter Anwendung des HBS-Verfahrens dargestellt. Die Darstellung liefert wie in Abschnitt 6.5 einen Vergleich der unterschiedlichen Qualitätseinschätzungen. In Ergänzung zur obigen Untersuchung werden die klassifizierten Qualitätsbewertungsurteile vor und nach der Korrektur des Prozentwertes der Durchfahrten ohne Halt gegenübergestellt. Im oberen Teil sind die Ergebnisse vor der Korrektur und im unteren Teil sind die Ergebnisse nach der Korrektur abgebildet. Auf der Abszissenachse sind analog zu den bisherigen Darstellungen die anhand der PVD ermittelten Qualitätsstufen und auf der Ordinatenachse die QSV der Referenzszenarien abgetragen. Die sich im unbeeinflussten Verkehrsablauf ergebende QSV stellt die Referenz dar. Anhand der oberen Grafik lässt sich erkennen, dass ohne die Korrektur des Bewertungskennwertes die mit PVD festgestellten QSV stark vom Referenzergebnis abweichen. Die dunkleren Kacheln lassen sich am linken und oberen Teil der Darstellung finden. Demnach wird die Koordinierung bei vielen Szenarien unter Anwendung der PVD ohne die Korrektur der Durchfahrtsrate besser bewertet als im Referenzfall mit unbeeinflusstem Verkehr. Im Ergebnis der Anwendung des multivariaten Verfahrens sind die Qualitäturteile nunmehr weitgehend übereinstimmend.

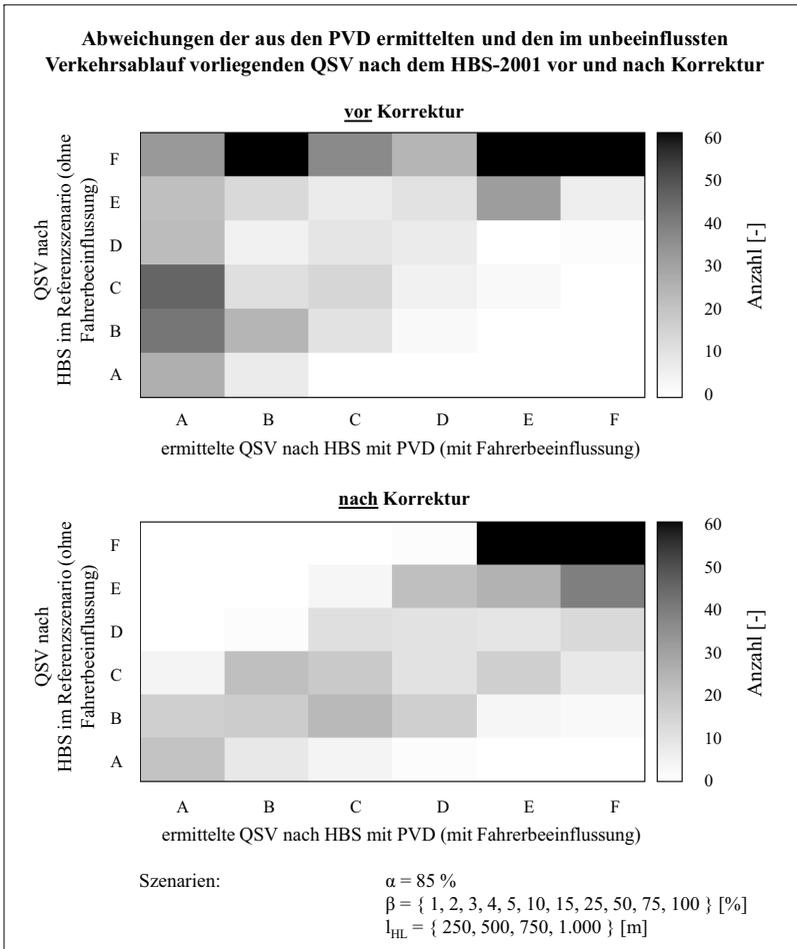


Abbildung 7.5: Vergleich der QSV-Abweichungen vor und nach Korrektur, $\alpha = 85\%$ ⁵⁶

In der unteren Grafik der Abbildung 7.5 ist ein treppenartiges Muster in der Diagonale zu erkennen. Viele der mittels des multivariaten Verfahrens festgestellten QSV entsprechen der eigentlichen Qualitätsstufe des Referenzfalls unter Berücksichtigung eines unbeeinflussten Verkehrsablaufes. Allerdings gibt es auch Fälle, bei denen die QSV nicht übereinstimmen. Wie im rechten Boxplot in Abbildung 7.4 dargestellt, kommt es nach der Korrektur auch zu negativen Differenzen. Es traten auch Fälle auf, bei denen die Koor-

⁵⁶ Die zugehörigen Häufigkeitsmatrizen mit entsprechenden Werten sind im Anhang J in Tabelle J.1 und J.2 aufgeführt.

dinierung unter Anwendung des multivariaten Verfahrens im Vergleich zum Referenzfall schlechter bewertet wurden. Allerdings sind die QSV-Abweichungen nicht so gravierend wie vor der Korrektur. Wie die untere Grafik verdeutlicht, differiert die festgestellte Qualitätsstufe zur QSV des Referenzszenarios mit einem unbeeinflussten Verkehr um maximal zwei Stufen. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die maximale Anzahl der QSV-Relationen in den Grafiken auf eine absolute Häufigkeit von 60 begrenzt ist. Der Grund liegt im Auftreten von vielen Szenarien (> 300), bei denen vor und nach der Korrektur die QSV F festgestellt wurde. Andere QSV-Relationen mit geringerer Häufigkeit wären durch die Farbskalierung kaum erkennbar. Die zugehörigen Häufigkeitsmatrizen mit entsprechenden Werten sind im Anhang J in Tabelle J.1 und J.2 dargestellt. An den Häufigkeiten ist ablesbar, dass vor der Korrektur 448 Übereinstimmungen der QSV auftraten. Nach der Korrektur der Durchfahrtsquote ohne Halt stimmten 577 Bewertungen überein. Demnach stieg die Übereinstimmungsquote durch Verwendung des multivariaten Verfahrens von 50,9 % um 14,7 Prozentpunkte auf 65,6 %.

Verwendung des Verfahrens bei ungesättigten Verkehrsverhältnissen

Die oben genannten Ergebnisse stützen sich auf Daten, welche auch zur Verfahrensentwicklung genutzt wurden. Demzufolge sind die getroffenen Aussagen zur Anwendbarkeit bzw. zur Potenzialabschätzung des Verfahrens zunächst nur unter den genannten Voraussetzungen gültig. Aus diesem Grund wurde das entwickelte multivariate Verfahren auf Daten anderer Szenarien angewendet. Der hier verwendete Testdatensatz umfasste die simulativ ermittelten Daten aller Varianten mit einem Auslastungsgrad von 25 und 50 %. Hierbei wurden erneut alle genannten Haltlinienentfernungen und Versatzzzeitvariationen betrachtet. Insgesamt flossen die Daten von 1920 Simulationsszenarien⁵⁷ in die Untersuchung ein.

Die Abbildung 7.6 zeigt die Abweichungen der aus den PVD ermittelten und den im Referenzszenario vorliegenden Prozentwerten der Durchfahrten ohne Halt. Dabei werden die wichtigsten Eckdaten der Verteilungen in getrennten Boxplots für die Ergebnisse vor und nach der Korrektur gegenübergestellt. Vor der Korrektur liegt der arithmetische Mittelwert bei ca. - 29 % und der Median bei ca. - 15 %. Der IQR reicht von - 60 % bis 0 %. Demnach liegen die mittleren Abweichungen in annähernd der gleichen Größenordnung wie bei der Untersuchung der Szenarien mit einem Auslastungsgrad α von 85 % (siehe Abbildung 7.4). Nach der Korrektur sind die Abweichungen deutlich geringer. Der Median beträgt ca. - 5 %. Der Interquartilsabstand erstreckt sich von ca. - 25 % bis 5 % und hat demzufolge eine etwas höhere Spannweite als der IQR der obigen Ergebnisse. Insgesamt fällt die Verkleinerung der Abweichungen durch die Anwendung des multivariaten

⁵⁷ Die Anzahl ergibt sich aus der Multiplikation von 4 Streckenszenarien, 20 VZV-Szenarien, 12 Szenarien mit verschiedenen Ausstattungsraten sowie zwei Belastungsszenarien (siehe Abschnitt 5.2.1, S. 66).

Verfahrens etwas geringer aus als bei der Untersuchung der Szenarien mit einem Auslastungsgrad α von 85 %. Die mittlere Abweichung verdeutlicht, dass der korrigierte Prozentwert der Durchfahrten ohne Halt D_{korrr} im Schnitt 8 % höher ist als der Wert, der sich theoretisch im unbeeinflussten Verkehrsablauf ergeben würde ($D_{oFb,alle}$). Dass sich dies nur geringfügig in den Bewertungsergebnissen bemerkbar macht, zeigt Abbildung 7.7. Es treten auch hier viele Fälle auf, bei denen die mittels multivariaten Verfahrens festgestellte QSV der Qualitätsstufe des jeweiligen Referenzszenarios entspricht. Die gravierenden QSV-Abweichungen werden somit durch die Korrektur erheblich verkleinert. Auch wenn nur ansatzweise ein diagonales treppenartiges Muster erkennbar ist, macht das Resultat durchaus einen positiven Eindruck. Denn auch hier differieren die Qualitätseinschätzungen nur selten um mehr als zwei Stufen.

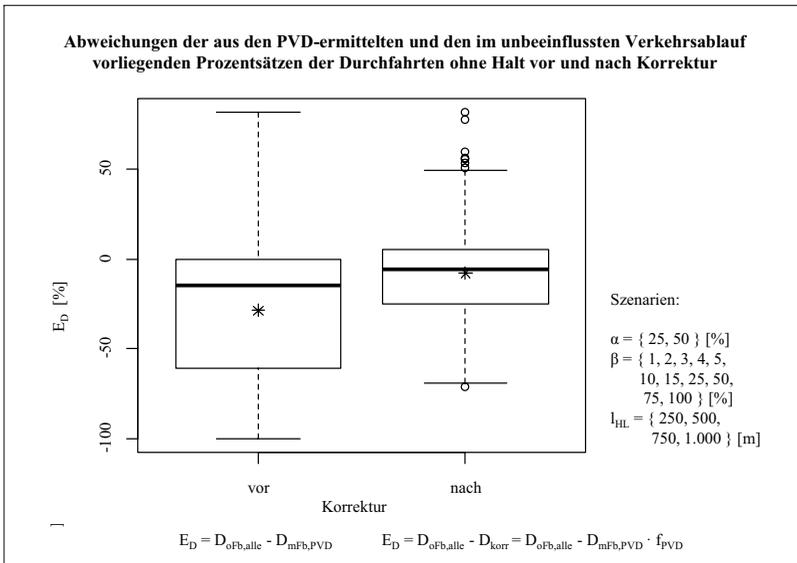


Abbildung 7.6: Abweichungen E_D vor und nach Korrektur, $\alpha = 25 \%$ und $\alpha = 50 \%$

Die maximale Häufigkeit wurde in den Grafiken der Abbildung 7.7 zur besseren Darstellung auf 250 begrenzt. Die zugehörigen Häufigkeitsmatrizen mit entsprechenden Werten sind im Anhang J in Tabelle J.3 und J.4 dargestellt. Anhand der Werte ist erkennbar, dass vor der Korrektur insgesamt 662 QSV-Übereinstimmungen auftraten. Nach der Korrektur der Durchfahrtsquote ohne Halt waren 925 Bewertungen identisch. Demnach stieg die Übereinstimmungsquote durch die Verwendung des multivariaten Verfahrens von 37,7 auf 52,6 %. Der Anstieg der Quote beträgt genau wie bei den Tests der Szenarien mit einem 85 %-igen Auslastungsgrad α ca. 15 %.

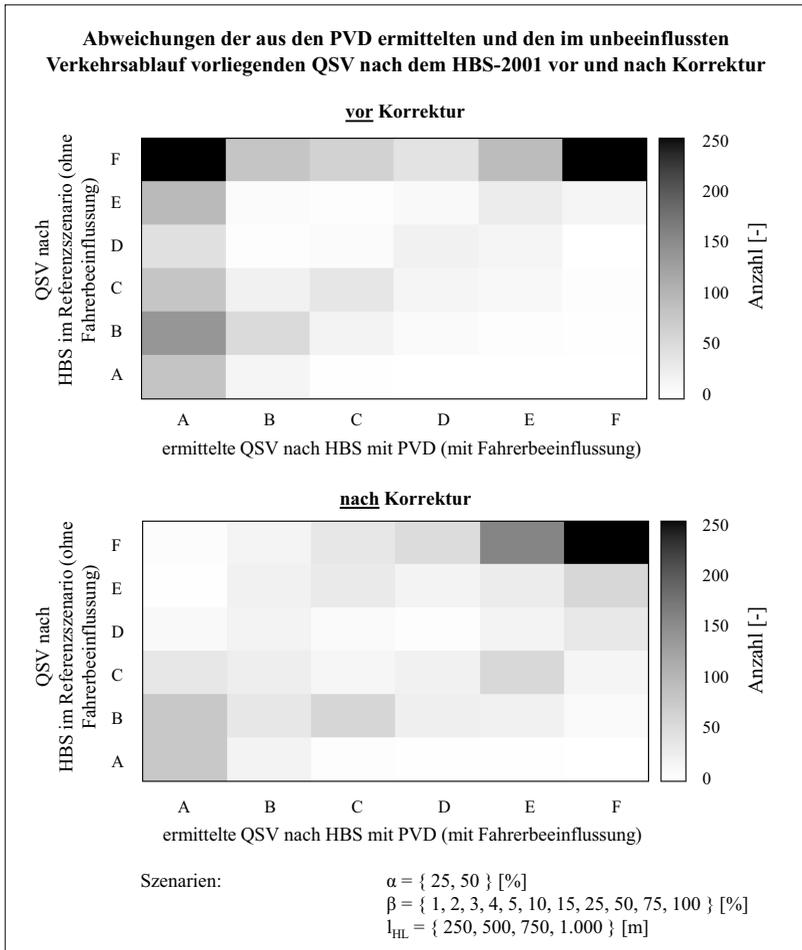


Abbildung 7.7: QSV-Abweichungen vor und nach Korrektur, $\alpha = 25 \%$ und $\alpha = 50 \%$ ⁵⁸

Trotz der vielversprechenden Erkenntnisse muss erwähnt werden, dass die Hälfte aller Koordinierungen mit dem multivariaten Verfahren in Referenz zum unbeeinflussten Verkehrsablauf “fehlerhaft“ bewertet werden. Bei einem Auslastungsgrad α von 85 % ist die Quote der Fehleinschätzungen mit 35 % etwas geringer. Ein wesentlicher Grund liegt in der höheren Grünbandabdeckung des Pulks. Die Fahrzeuge fahren in der Simulation Poisson-verteilt in das Netz ein und kommen mit einer entsprechenden Streuung am ers-

⁵⁸ Die zugehörigen Häufigkeitsmatrizen mit entsprechenden Werten sind im Anhang J in Tabelle J.3 und J.4 aufgeführt.

ten signalisierten Querschnitt an. Durch den Wechsel zwischen Sperr- und Freigabezeit findet eine Pulkbildung statt. Alle Fahrzeuge starten folglich in jedem Umlauf als Pulk zu Beginn der Grünzeit. Je kleiner die Verkehrsstärke q bzw. der Auslastungsgrad α ist, desto weniger wird die Grünzeit ausgenutzt und desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Fahrzeuge das Grünband vollständig auslasten. Die Problematik, die vor allem negative Versatzzeitvariationen t_{VZV} betrifft, ist in Abbildung 7.8 visualisiert. Bei einer geringen Verkehrsbelastung kann der Pulk als solches den zweiten signalisierten Querschnitt ohne Stopp passieren. Der Prozentwert der Durchfahrten ohne Halt D ist dementsprechend hoch und das Bewertungsergebnis positiv. Der identisch koordinierte Streckenzug wird bei höherer Belastung im Gegensatz dazu viel schlechter bewertet, da die letzten Fahrzeuge im Pulk infolge der negativen Versatzzeitvariation t_{VZV} zum Stehen kommen. Daher fallen die Bewertungsergebnisse tendenziell bei niedrigeren Belastungen besser aus. Die Ausstattungsrate β spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Für das multivariate Verfahren gilt im Hinblick auf den Auslastungsgrad α somit die gleiche Voraussetzung wie bei den bestehenden Verfahren. So ist die Beurteilung der Koordinierung wie auch bei den etablierten Verfahren bei hohen Verkehrsbelastungen mit einem Auslastungsgrad α von ca. 85 % durchzuführen.

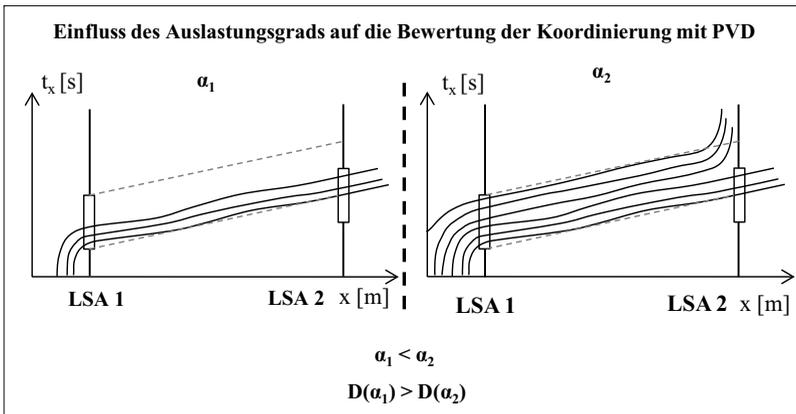


Abbildung 7.8: Einfluss des Auslastungsgrads auf die Bewertung der Koordinierung mit PVD

7.5 Mindestausstattungsrate

Die Untersuchungsergebnisse im vorherigen Abschnitt verdeutlichen, dass die Ausstattungsrate β bei der Bewertung der koordinierten Streckenzüge unter Verwendung der PVD weniger entscheidend ist. Dessen ungeachtet ist abschließend die Frage nach der

notwendigen Menge ausgestatteter Fahrzeuge zu klären. Nach den Ausführungen in [SCHNABEL / LOHSE-2011] und [FGSV-2009] reichen in der Regel fünf Messfahrten aus, um die Wirksamkeit von Koordinierungen zu untersuchen. Üblicherweise erfolgen die Testfahrten mit einem Fahrzeug, welches den zu untersuchenden Streckenabschnitt mindestens fünf mal befährt. Die Fahrweise darf dabei aber nicht durch äußere Einflüsse gestört werden. Die Anwendung des multivariaten Verfahrens berücksichtigt allerdings eine beeinflusste Fahrweise infolge der kooperativ bereitgestellten Signalinformationen bzw. Geschwindigkeitsempfehlungen. Ob eine Mindestanzahl von fünf Fahrzeugen bzw. Testfahrten hierbei auch ausreichend ist, soll anhand der Abbildung 7.9 diskutiert werden.

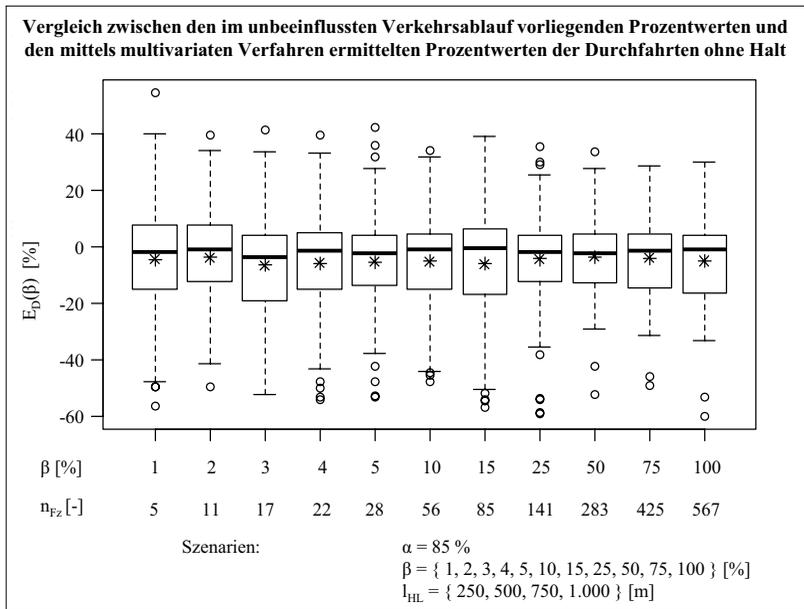


Abbildung 7.9: Vergleich zwischen den im unbeeinflussten Verkehrsablauf vorliegenden Prozentwerten und den mittels multivariaten Verfahren ermittelten Prozentwerten der Durchfahrten ohne Halt

In der Abbildung 7.9 sind analog zu den bisherigen Untersuchungen die Verteilungen der Abweichungen $E_D(\beta)$ zwischen den im unbeeinflussten Verkehrsablauf vorliegenden Prozentwerten und den mittels des multivariaten Verfahrens ermittelten Prozentwerten der Durchfahrten ohne Halt getrennt nach der Ausstattungsrate β in Boxplots dargestellt. In die Analyse flossen 960 Simulationsszenarien mit dem oben empfohlenen Auslastungsgrad α von 85 % ein. Unterhalb der Ausstattungsrate β ist die zugehörige Anzahl der ausgestatteten Fahrzeuge zu finden. Die Boxplots weisen mit zu- bzw. abnehmender Aus-

stattungsrate β keine wesentlichen Veränderungen auf. Der Median ist bei fast allen Ausstattungsraten β annähernd 0. Die Höhe und Lage der Box sowie der arithmetische Mittelwert schwanken nur geringfügig. Eine systematische Änderung ist nicht zu erkennen. Selbst bei einer Ausstattungsrate β von einem Prozent sind keine größeren Streuungen zu verzeichnen. Gemäß der Abbildung 7.9 lassen sich somit mit nur fünf Fahrzeugen in etwa die gleichen Ergebnisse wie bei höheren Ausstattungsraten erzielen. Es kann geschlossen werden, dass die vom HBS-Verfahren vorgegebene Mindestanzahl von Messfahrten auch für das multivariate Verfahren zutreffend ist. Bei einem hohen Auslastungsgrad α reichen demnach in der Regel fünf Fahrzeuge aus, um mit der multivariaten Methode die Wirksamkeit von festzeitgesteuerten Koordinierungen mit der beschriebenen Genauigkeit zu beurteilen.

7.6 Anwendung auf Streckenzügen mit mehreren Lichtsignalanlagen

Bislang betrachtete die Arbeit die Wirksamkeit einer Koordinierung zwischen zwei signalisierten Querschnitten. Dabei wurden verschiedene verkehrliche Kenngrößen aus den mobil erfassten Daten der ausgestatteten Fahrzeuge im kooperativen System extrahiert und das entsprechende Qualitätskriterium über das multivariate Verfahren ermittelt. Der einzige Unterschied zum HBS-Verfahren besteht darin, dass der Prozentwert der Durchfahrten ohne Halt im vorgestellten Verfahren aufgrund der beeinflussten Fahrweise abzumindern ist. Im Prinzip erfolgt dadurch eine Schätzung des Prozentsatzes, der sich theoretisch im unbeeinflussten Verkehrsablauf ergeben würde. Da die Bewertungsgrundsätze des HBS und die des multivariaten Verfahrens identisch sind, kann auch die Bewertung der Funktionsfähigkeit einer Koordinierung über mehrere signalisierte Querschnitte nach der Vorgehensweise des HBS erfolgen. Dazu ist das sogenannte Koordinierungsmaß k_i in Anlehnung an die Gleichung 2.7 (S. 32) zu berechnen. Es ist zu beachten, dass der Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt aus dem multivariaten Verfahren stammt. Die Gleichung kann so umgestellt werden, dass das richtungsbezogene Koordinierungsmaß k_i mit einer Mittelwertbildung nach folgender Gleichung berechnet werden kann.

$$k_i = \frac{\sum D_{\text{korrr},j}}{N_{K,LSA} - 1} \quad (7.7)$$

mit:

- i ... Verkehrsrichtung (Hin- und Rückrichtung), $i = \{1, 2\}$
- k_i ... Koordinierungsmaß für die Verkehrsrichtung i [%]
- $D_{\text{korrr},j}$... Prozentwert der Durchfahrten ohne Halt am Knotenpunkt j mit LSA (außer am Eingangs-Knotenpunkt) für die Verkehrsrichtung i von allen Messfahrten [%]
- $N_{K,LSA}$... Anzahl der Knotenpunkte mit LSA des Streckenzugs [-]

Das Koordinierungsmaß für beide Richtungen des Streckenzuges kann nachträglich mit $k = (k_1 + k_2)/2$ bestimmt werden. Die Qualitätsbewertung erfolgt analog zu der Betrachtung einzelner Zufahrten nach Tabelle 2.2 (S. 31). Auf eine Überprüfung der Funktions- und Aussagefähigkeit der Methode zur Bewertung von koordinierten Straßenzügen mit mehreren Lichtsignalanlagen wurde aufgrund der identischen Vorgehensweise zum HBS verzichtet. In diesem Zusammenhang ist jedoch hervorzuheben, dass die Korrekturfunktionen für Streckenzüge mit zwei koordinierten LSA ermittelt wurden. Die Übertragbarkeit der Funktionen auf Straßenzüge mit mehr als zwei LSA wurde nicht validiert.

7.7 Fehlerbetrachtung

Das im vorliegenden Kapitel 7 vorgestellte multivariate Verfahren liefert einen ersten Ansatz zur Qualitätsbeurteilung von koordinierten Lichtsignalanlagen unter Anwendung des zentralenbasierten kooperativen Systems. In die Bewertung fließen die Positions- und Bewegungsdaten (PVD) beeinflusster Fahrzeuge ein. Die Entwicklung und Erprobung des Verfahrens beruhte auf simulativ gewonnenen Daten (Kapitel 5). Der Verkehrsablauf wurde unter Berücksichtigung der im kooperativen System stattfindenden Fahrerbeeinflussung mikroskopisch simuliert. Dabei wurden viele Situationen mithilfe von unterschiedlichen Szenarien mit variierenden Streckenlängen l_{HL} , Ausstattungsraten β und verschiedenen Versatzeiten analysiert. Letztendlich ist zu erwähnen, dass das Verfahren mit den beinhalteten Korrekturfunktionen noch nicht im realen Betrieb angewendet und erprobt wurde. Daher ist noch zu verifizieren, inwiefern die hier getroffenen Aussagen über die Genauigkeit des Verfahrens auch unter realen Bedingungen gültig sind.

Weiterhin ist zu thematisieren, dass bei der Entwicklung des multivariaten Verfahrens nicht alle verkehrstechnischen Randbedingungen abgedeckt werden konnten. Die Untersuchungen berücksichtigen beispielsweise lediglich vier geradlinige Strecken mit zwei LSA im Abstand von 250, 500, 750 und 1000 m. Die ermittelten Funktionen der Gewichtungsfaktoren zur Korrektur des Prozentwertes der Durchfahrten ohne Halt D beziehen sich daher nur auf die vorab definierten Strecken. Da die Graphen der Funktionen einem

ähnlichen Verlauf unterliegen, wurde vereinfacht angenommen, dass Zwischenwerte mit anderen Streckenlängen zu interpolieren sind.

In Ergänzung zu den bislang genannten verkehrstechnischen Randbedingung sind auch die verwendeten Freigabe- und Umlaufzeiten zu diskutieren. Die Ermittlung der Korrekturfunktionen berücksichtigt zunächst nur Szenarien mit einer Umlaufzeit von 60 s und einer Freigabezeit von 20 s. Trotz der schrittweisen Verschiebung der Grünzeiten zur Abbildung verschiedener Koordinierungsgrade, liegt immer ein gleichbleibender Freigabezeitanteil von 33 % zugrunde. Es erscheint logisch, dass die durchschnittliche Wartezeit und somit auch die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R von der Rotzeit abhängig ist. Da die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R in die Bewertung einfließt, empfiehlt es sich, weitere Simulationen mit anderen Freigabezeitanteilen zu untersuchen. Weiterhin ist die Anwendbarkeit des Verfahrens bei verkehrsabhängigen LSA-Steuerungen zu prüfen.

Zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit lagen keine eingehenden Untersuchungsergebnisse in Bezug auf die unterschiedlichen Verhaltensweisen der vorgestellten Fahrerassistenzfunktionen auf dem Smartphone vor. Für die Verfahrensentwicklung mussten daher Annahmen über die minimal akzeptierte Geschwindigkeit und über die Reaktion auf den empfohlenen Geschwindigkeitsbereich zum Fahren in der Grünen Welle getroffen werden. Eigens durchgeführte Feldtests mit den in Abschnitt 4.4 (S. 58) entwickelten Fahrerassistenzfunktionen zeigten, dass sich die Testfahrer nach einer gewissen Nutzungsdauer tendenziell an der größtmöglichen Geschwindigkeit orientieren. Das Ergebnis ist aufgrund eines geringen Stichprobenumfangs jedoch nicht repräsentativ. Trotzdem liefern die empirischen Beobachtungen erste Anhaltspunkte und rechtfertigen die vereinfachende Annahme einer homogenen Verhaltensweise der Fahrzeugführer. Da allerdings davon auszugehen ist, dass die Akzeptanz und die Verhaltensweisen gegenüber der Fahrempfehlungen heterogen sind, besteht auf diesem Gebiet weiterer Forschungsbedarf. Solange diese Wissenslücke nicht geschlossen ist, muss mit einer gewissen Unschärfe des vorgestellten multivariaten Verfahrens gerechnet werden.

Darüber hinaus blieben Einflüsse systemtechnisch bedingter Fehlerquellen wie bspw. GPS-Ungenauigkeiten und falsche bzw. fehlende Datenübertragungen simulationsbedingt unbeachtet. In der Simulationsumgebung wurden die PVD immer an den entsprechenden Lokationen (Abbildung 6.1, S. 93) abgesetzt. Auf einen Georeferenzierungsalgorithmus konnte durch die direkte Streckenzuordnung der Fahrzeuge verzichtet werden. Entfernungen zwischen den Orten der übermittelten PVD sind aufgrund der geradlinigen Streckenführung einfach berechenbar. In der Realität ist mit GPS-Ungenauigkeiten, ungenauen Lokalisierungen und mitunter auch unzureichenden Verfügbarkeiten notwendiger Daten zu rechnen. Es bleibt an dieser Stelle fraglich, in welchem Maße sich die systemtechnisch bedingten Fehlerquellen auf die Aussagefähigkeit des Verfahrens auswirken.

Die mittels des multivariaten Verfahrens festgestellten Qualitätsstufen entsprechen überwiegend den QSV der Referenzszenarien, welchen ein unbeeinflusster Verkehr zugrunde

liegen. Die Qualitätseinschätzungen differieren nur selten um mehr als eine Stufe. Die noch vorhandene Unschärfe des multivariaten Verfahrens resultiert unter anderem aus der fehlenden Kenntnis zum Ausmaß der tatsächlich stattgefundenen Fahrerbeeinflussung. Im vorgestellten kooperativen System werden von den PVD keine Informationen über die ausgegebenen Geschwindigkeitsempfehlungen übermittelt. Hier besteht aus Sicht des Verfahrens zur Bewertung der Koordinierung ein Verbesserungsbedarf. Durch ergänzende Daten über die ausgegebenen Fahrerinformationen ließe sich die Zuverlässigkeit des multivariaten Bewertungsverfahrens durchaus noch erhöhen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, das Potenzial von mobil erfassten Kenngrößen des Straßenverkehrs zur Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen zu untersuchen. Die Motivation der Untersuchung ergab sich aus den Entwicklungen im Bereich der kooperativen Systeme, bei deren Anwendung Daten und Informationen zwischen dem Straßenbetreiber, der Infrastruktur und den Verkehrsteilnehmern bzw. deren Verkehrsmitteln ausgetauscht werden. Trotz der zahlreichen Aktivitäten auf diesem Gebiet ist bislang noch kein System für den signalisierten innerstädtischen Straßenraum über einen Demonstrationbetrieb hinaus gekommen. Die Gründe liegen nicht zuletzt in der langwierigen System Einführung, die durch die gegenseitige Abhängigkeit der Kommunikationspartner erschwert wird. Bei den bisher präferierten kooperativen Lösungen sind die Fahrzeuge mit einer Vielzahl von lokalen straßenseitigen Einrichtungen vernetzt. Der Erreichbarkeitsradius dieser dezentralen Ansätze ist auf die drahtlose Kommunikationsreichweite der entsprechenden Sendeeinrichtungen beschränkt. Somit profitieren die Fahrzeuge erst, wenn ein größerer Teil der Infrastruktur entsprechend ausgerüstet ist. Die Infrastruktur gewinnt wiederum erst bei einer hohen Anzahl an kooperierenden Fahrzeugen einen Nutzen. Bei diesen Systemen ist die Verwendung von kooperativ gewonnenen, fahrzeugbezogenen Kenngrößen zur Qualitätsanalyse von Lichtsignalanlagen daher nur schwer realisierbar bzw. mit einem langen Umsetzungsprozess verbunden. In der vorliegenden Arbeit wurde daher die im bereits abgeschlossenen Forschungsprojekt UR:BAN-VV umgesetzte zentralenbasierte Lösung aufgegriffen. Das Projekt verfolgte u. a. die Ziele der Verbesserung der Verkehrseffizienz, die Vermeidung von überlasteten Straßen und somit die Emissionsminderung im urbanen Straßenraum. Im Teilprojekt "Urbane Straße" wurden fahrzeugseitige Funktionen erarbeitet und erprobt, welche auf Basis von Signalisierungsinformationen ein emissionsreduziertes Fahren über mehrere Lichtsignalanlagen ermöglichen. Das Endgerät im Fahrzeug kooperiert jedoch nicht wie bei den dezentralen Systemen mit verteilten straßenseitigen Einrichtungen, sondern direkt mit einer Verkehrszentrale respektive einem zwischengeschalteten Diensteanbieter. Der hierfür notwendige Datenaustausch erfolgt über den Mobilfunk. Der Infrastrukturbetreiber erhält von den Fahrzeugen verkehrliche Daten, welche durch straßenseitige Erfassungseinrichtungen nur

schwierig zu erfassen sind. Die in Quasi-Echtzeit übermittelten verkehrlichen Kenngrößen können in der Verkehrszentrale zur Qualitätsanalyse von koordinierten Lichtsignalsteuerungen genutzt werden.

Um das Potenzial von mobil erfassten Kenngrößen zur Qualitätsanalyse von signalisierten Straßennetzen quantifizieren zu können, wurde das zugrunde gelegte verkehrstelematische System genauer beschrieben. Die vorliegende Arbeit hatte außerdem den Anspruch, einen praxisrelevanten Bezug herzustellen, um weitere Anreize für die Benutzung des vorgestellten Systems zu schaffen. Vor diesem Hintergrund wurde sowohl der Nutzen des Systems als auch die technischen Voraussetzungen und der Aufwand für die Umsetzung im Vergleich zu lokalen Systemen untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Einführung des zentralenbasierten kooperativen Systems mit entsprechendem Aufwand möglich ist. Derartige Systeme lassen sich bei Verwendung von Verkehrsrechnern ab 2006 aus infrastruktureller und kommunikationstechnischer Sicht in die bestehende Infrastruktur integrieren. Diese technischen Voraussetzungen erfüllen über die Hälfte aller deutschen Städte mit mehr als 50.000 Einwohnern. Ferner müssen die jeweilige LSA an die Verkehrszentrale angebunden sein. Nur über diese direkte Verbindung können Informationen über den Signalstatus, den Wechsel der Signalzustände, die Detektorereignisse etc. gesammelt und im Rahmen der kooperativen Systeme zentralseitig weiterverwendet werden. Eine womöglich größere Herausforderung besteht beim Datenaustausch und in der zentralseitigen Daten- und Servicebereitstellung. Prinzipiell ist es hier möglich, auf den hohen Entwicklungsstand bestehender Technologien sowie auf standardisierte Übertragungs- und Netzwerkprotokolle zurückzugreifen. Im Vergleich zu dezentralen kooperativen Systemen scheint somit der Aufwand zur Umsetzung des hier vorgestellten Lösungsansatzes geringer auszufallen. Seitens der Endgeräte bestehen ebenfalls Anforderungen, die durch marktübliche Smartphones erfüllt werden. Durch die hohe Anzahl an Smartphone-Nutzern besteht die Möglichkeit, in kürzerer Zeit eine breite Masse an Anwendern zu gewinnen und somit eine schnelle Marktdurchdringung zu erreichen.

In diesem Zusammenhang stellte die vorliegende Arbeit kooperative Fahrerassistenzfunktionen auf dem Smartphone vor, welche im Ergebnis eigener Forschungs- und Entwicklungsarbeiten entstanden. Die Entwicklung derartiger Assistenzen ist aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten zu anderen Komponenten nur im funktionierenden System realisierbar. Zudem ist die Erprobung einer noch in der Entwicklung befindlichen Applikation für ein kooperatives System im fließenden Verkehr mit Schwierigkeiten behaftet. Allein die im Realverkehr fehlende Reproduzierbarkeit der Eingangsdaten macht eine gezielte Fehlersuche bei der Softwareentwicklung nahezu unmöglich. Neben den zu befürchtenden Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit sind Erprobungsfahrten zeit- und damit kostenintensiv. Zur Identifizierung und Behebung von fehlerhaft spezifizierten und implementierten Funktionen wurden alle Hard- und Softwarekomponenten des zentralenbasierten kooperativen Systems in einer Simulations- und Testumgebung nachgebildet.

Sämtliche Funktionalitäten der Geräte und der Kommunikationspfade zwischen den Geräten entsprechen exakt dem späteren realen System. Allein der Verkehrsablauf wurde in der sogenannten Extendend-Devices-in-the-Loop-Testumgebung simuliert.

Die Assistenzfunktionen konnten mithilfe der virtuellen Testumgebung unter laborhaften Bedingungen entwickelt und erprobt werden. Um den Fahrer nicht mit Informationen zu überfluten, wurden lediglich routenspezifische Signalinformationen der jeweils nächsten Anlage ausgegeben. Hierzu wurden Routenempfehlungen einer auf dem gleichen Endgerät, aber von der Assistenzapplikation unabhängig operierenden Navigationssoftware ausgelesen. Die richtungsbezogenen Fahrerinformationen wurden auf dem Smartphone im (halb-)transparenten Stil angezeigt, damit die Karte der Navigationssoftware mit entsprechenden Positionsinformationen und Routenempfehlungen im Hintergrund zu sehen bleibt. Je nach der aktuellen Lage in der Grünen Welle wurden im Vordergrund die von den Assistenzfunktionen generierten Fahrerinformationen angezeigt. Die im Rahmen eigener Forschungsarbeiten entwickelten Fahrerassistenzfunktionen umfassten einen Grüne-Welle-Assistenten und einen Verzögerungsassistenten. Der Grüne-Welle-Assistent zeigte einen Grünbandteppich und einen schwarzen Balken, mit denen die aktuelle Lage des Fahrzeuges in der Grünen Welle verdeutlicht wurde. Dadurch wurde dem Fahrer indirekt ein Geschwindigkeitsbereich empfohlen, bei dessen Einhaltung er die nächste LSA ohne Halt überqueren konnte. Bei dem vorgestellten Konzept konnten auch unsichere Grünzeitbereiche dargestellt werden, welche aus einer Schaltzeitprognose von verkehrsabhängigen LSA resultierten. Lag der zu empfehlende Geschwindigkeitskorridor unterhalb der vorab festgelegten minimal akzeptierten Geschwindigkeit oder überhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, wurde dem Fahrzeuglenker mitgeteilt, dass ein "Halt zu erwarten" ist. Der Grüne-Welle-Assistent wurde hierbei vom sogenannten Verzögerungsassistenten abgelöst. Sobald das Fahrzeug vor einer LSA zum Stillstand kam, erhielt der Fahrer Informationen zur verbleibenden Restrotzeit.

Die entwickelten Assistenzfunktionen wurden auch im realen Straßennetz erprobt. Es zeigte sich, dass nicht alle Fehler wie bspw. wechselnde Verbindungsqualitäten in der Simulations- und Testumgebung abgebildet wurden, wengleich durch die Verwendung der genannten Umgebung weniger Test- und Erprobungsfahrten notwendig waren. Ein eigens durchgeführter Feldtest mit mehreren Testfahrern verdeutlichte die Zuverlässigkeit der Smartphoneapplikation. Während der Testfahrten wurden kontinuierlich Logdateien erstellt, welche die ausgegebenen Fahrerinformationen und den Fahrtverlauf protokollierten. Durch die nachträgliche Auswertung dieser Dateien konnten erste Kenntnisse über die Verhaltensweisen der Testfahrer ermittelt werden.

Die ausgegebenen Hinweise der LSA-bezogenen Fahrerassistenzfunktionen haben eine Beeinflussung des Verkehrsablaufes zur Folge, welche sich insbesondere in der Qualitätsbewertung koordinierter Lichtsignalsteuerungen bemerkbar macht. Vor diesem Hintergrund untersuchte die Arbeit, in welchem Maße sich das geänderte Fahrverhalten auf den

Verkehrsablauf der gesamten Strecke auswirkt. Zur Untersuchung der verkehrlichen Wirkungen wurden Teile des kooperativen Systems in eine mikroskopische Verkehrssimulation eingebunden. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Implementierung der Fahrerbeeinflussung. Hierzu wurde die im Smartphone umgesetzte Fahrerassistenzfunktion mit den dynamischen Grüne-Welle-Informationen im Simulationsmodell nachgebildet. Leider gab es im Hinblick auf die vorgestellten Smartphoneapplikationen zum Zeitpunkt des Redaktionsschlusses der vorliegenden Arbeit keine auf ausgiebigen Feldversuchen beruhenden Untersuchungsergebnisse. Aus diesem Grund wurden Annahmen in Hinblick auf die Verhaltensweisen der Fahrzeugführer auf Basis der nicht repräsentativen Ergebnisse des eigens durchgeführten Feldtests getroffen. Die Untersuchungen beinhalteten unterdessen verschiedene Szenarien mit variierenden Streckenlängen, Koordinierungsgraden und Verkehrsbelastungen. Es stellte sich heraus, dass die Fahrerbeeinflussung durchaus einen erheblichen Einfluss auf den Gesamtverkehr hat. Dies trifft auch auf geringe Ausstattungsraten zu. So kann bereits eine geringe Menge an informierten Fahrern dazu beitragen, die Gesamtzahl aller Halte zu verringern. Dieser positive Effekt tritt vorrangig bei ungünstigen Koordinierungen auf, wobei die Wirkung mit steigenden Haltlinienabständen weiter zunimmt. Auf die mittlere Reisegeschwindigkeit hatte die Fahrerbeeinflussung hingegen nahezu keinen Effekt. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei den untersuchten koordinierten Festzeitsteuerungen unabhängig von etwaigen Geschwindigkeitsanpassungen aufgrund der Fahrerassistenz im Mittel annähernd die gleiche Zeit für das Passieren des gesamten Streckenabschnitts benötigt wurde.

Auf Basis dieser und weiterer Erkenntnisse aus der verkehrlichen Wirkungsanalyse wurde in einem nächsten Schritt die Anwendbarkeit kooperativ gewonnener Messgrößen für die Bewertung der Koordinierung untersucht. Die kooperativ gewonnenen Messgrößen leiten sich von sogenannten PVD ab, welche von den ausgestatteten Fahrzeugen vereinbarungsgemäß zum Erhalten von LSA-Schaltzeitinformationen abzusetzen sind. Die Datenübertragung der ausgestatteten Fahrzeuge wurde so festgelegt, dass aus den mitgelieferten PVD prinzipiell jede Kenngröße der etablierten Bewertungsverfahren nach dem HBS [FGSV-2009], nach Brilon und Schnabel [BRILON / SCHNABEL-2003] sowie nach Robertson [ROBERTSON-1969] ausgerechnet werden können.

Die PVD stammen von den ausgestatteten Fahrzeugen, welche infolge der Fahrerbeeinflussung ein der Signalisierung angepasstes Fahrtprofil aufweisen konnten. Die bisher angewendeten Verfahren eignen sich daher nur bedingt, um die Koordinierungsqualität mittels PVD angemessen zu bewerten. Die Untersuchungen ergaben, dass der direkt aus den PVD abgeleitete Anteil der Durchfahrten ohne Halt D zum Teil erheblich von dem sich im unbeeinflussten Verkehr einstellenden Wert abweicht. Die deutlichen Differenzen machten sich folglich auch in den auseinanderdriftenden Qualitätsbeurteilungen bemerkbar. Aufgrund der Fahrerbeeinflussung kam es nicht selten vor, dass vermeintlich schlecht bzw. gar nicht koordinierte Lichtsignalanlagen über die PVD mit dem Prädikat "sehr gut"

(QSV A) bewertet wurden. Für die Bewertung anhand der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R ist die beeinflusste Fahrweise hingegen weniger ausschlaggebend. Hier zeigten sich nur geringe Abweichungen in den Bewertungsergebnissen. Da die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R jedoch relativ stark vom Haltlinienabstand l_{HL} abhängt, schien eine Beurteilung allein über diesen Kennwert ebenfalls wenig aussagekräftig zu sein.

Aus den genannten Gründen wurde ein im Rahmen eigener Forschungsarbeiten entwickeltes Bewertungsverfahren vorgestellt, welches die beiden Bewertungskenngrößen Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt D und die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R aufgreift sowie wesentliche Einflussfaktoren wie bspw. den Haltlinienabstand l_{HL} mit einbezieht. Infolge der gleichzeitigen Berücksichtigung mehrerer voneinander abhängiger Variablen stellt der Ansatz ein multivariates Bewertungsverfahren dar. Der Grundgedanke liegt in der Abschätzung des Prozentwertes der Durchfahrten ohne Halt, der sich theoretisch im unbeeinflussten Verkehrsablauf ergeben würde. Hierzu wird der direkt aus den PVD ermittelbare Prozentwert der Durchfahrten ohne Halt D in Abhängigkeit von der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R und vom Haltlinienabstand l_{HL} abgemindert bzw. korrigiert. Der variable Korrekturfaktor wurde auf Basis der Simulationsdaten ermittelt und als Funktion in Abhängigkeit von den genannten Einflussfaktoren beschrieben. Das multivariate Verfahren verwendet das bewährte Bewertungsschema des HBS. Es besteht somit die Möglichkeit, die sich ergebenden Ergebnisse nach herkömmlicher Vorgehensweise zu interpretieren und entsprechende Maßnahmen abzuleiten. In der Arbeit wurde dargelegt, dass das entwickelte multivariate Verfahren grundsätzlich zur Qualitätsbeurteilung koordinierter Lichtsignalsteuerungen geeignet ist. Die abgeschätzten Prozentwerte der Durchfahrten ohne Halt weichen nur geringfügig von dem im unbeeinflussten Verkehrsablauf vorliegenden Wert ab. Die mittels des multivariaten Verfahrens festgestellten Qualitätsstufen entsprechen daher überwiegend den QSV des jeweiligen Referenzszenarios, dem ein unbeeinflusster Verkehrsablauf zugrunde liegt.

8.2 Grenzen und Ausblick

Die vorliegende Arbeit belegt, dass sich die im Rahmen eines zentralenbasierten kooperativen Systems gewonnenen PVD prinzipiell als Eingangsgrößen für die Qualitätsanalyse von koordinierten Streckenzügen eignen. Sie zeigt aber auch, dass die PVD nur bedingt als Input für die etablierten Bewertungsverfahren genutzt werden können. Die mobil erfassten Kenngrößen stammen von ausgestatteten Fahrzeugen, welche infolge der Fahrerassistenzfunktionen ein der Signalisierung angepasstes Bewegungsprofil aufweisen. Damit wird dem Infrastrukturbetreiber suggeriert, dass das Fahrzeug aufgrund der Fahrt ohne Halt eine gut funktionierende Koordinierung vorfand. Durch Anwendung bestehender Verfahren werden demnach die zugrunde liegenden Koordinierungen im Vergleich zum Referenzfall tendenziell besser bewertet. Als Referenzwerte für diese Einschätzung

dienten die Koordinierungsqualitäten, welche sich im unbeeinflussten Verkehrsablauf gemäß den bestehenden Bewertungsverfahren ergeben hätten. Letztendlich unterliegen diese Referenzwerte auch einer gewissen Subjektivität und sind daher nicht als uneingeschränkt gültige Maßstäbe anzusehen. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass die Bewertungen nur aus planerischer Perspektive bzw. aus Sicht des Infrastrukturbetreibers erfolgten. Die bestehenden und das entwickelte Verfahren dienen dabei lediglich als Hilfsmittel und beurteilen die Koordination nur einseitig. Die individuellen Erwartungen und die Zufriedenheit der motorisierten Verkehrsteilnehmer finden keine unmittelbare Berücksichtigung. Der in Abbildung 2.2 gezeigt Qualitätskreis ist demnach auch bei der Anwendung des vorgestellten multivariaten Bewertungsverfahrens nicht geschlossen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten die wichtigsten Aspekte des vorgestellten zentralen-basierten kooperativen Systems beleuchtet werden. Die Arbeit legt dabei u. a. die verkehrliche Wirkung des kooperativen Systems sowie dessen Einfluss auf die PVD-basierte Bewertung von Koordinierungen dar. Die erlangten Erkenntnisse beruhen auf Simulationsuntersuchungen, welche naheliegenderweise nicht alle real vorkommenden Ereignisse abdecken können. Trotz Berücksichtigung zahlreicher Szenarien mit variierenden Streckenlängen, Ausstattungsgraden und Koordinierungsgraden konnten demnach nur Tendenzen aufgezeigt werden. Neben den üblichen verkehrstechnischen Randbedingungen spielte bei der Untersuchung auch die im Rahmen des kooperativen Systems stattfindende Fahrerbeeinflussung eine entscheidende Rolle. Aufgrund unterschiedlicher Fahrertypen und deren Verhaltensweisen lassen sich die dargestellten Ergebnisse noch nicht verallgemeinern. Prinzipiell hängt die verkehrliche Wirkung maßgeblich von der Reaktion der Fahrer auf die ausgegebenen Fahrempfehlungen ab. Zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit lagen keine repräsentativen Untersuchungsergebnisse in Bezug auf die unterschiedlichen Verhaltensweisen der vorgestellten Fahrerassistenzfunktionen auf dem Smartphone vor. Aus diesem Grund wurde auch auf eine weiterführende Analyse des Einflusses der minimal akzeptierten Geschwindigkeit verzichtet. Ferner blieb in der Untersuchung der Einfluss von Richtungsfahrbahnen mit mehreren Fahrstreifen unberücksichtigt.

Leider ergab sich nicht die Möglichkeit, die verkehrlichen Wirkungen der vorgestellten Fahrerassistenzsysteme auf dem Smartphone in einem Langzeitversuch im realen Umfeld zu erproben. Aus diesem Grund konnte u. a. auch der psychologische Aspekt in Bezug auf die Interaktion zwischen informierten und uninformaten Fahrern nicht beleuchtet werden. Diesbezüglich gibt es jedoch bereits erste auf Fahr Simulatorstudien basierende Untersuchungsergebnisse [RITTGER et al.-2015; RITTGER-2015]. Hier wurden u. a. die Interaktion zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern mit und ohne Assistenzsysteme sowie das nicht-assistierte Fahrverhalten analysiert. Die Ergebnisse wurden erst unmittelbar vor Fertigstellung der vorliegenden Arbeit veröffentlicht und fanden daher keine Berücksichtigung. Es scheint jedoch vielversprechend, die erlangten Erkenntnisse über die Interaktion zwischen informierten und uninformaten Fahrern in weiterführenden

Forschungsarbeiten zur Qualitätsanalyse koordinierter Lichtsignalsteuerungen einzubeziehen. So kann das im Simulationsmodell hinterlegte Fahrverhalten angepasst werden, um die verkehrliche Wirksamkeit der kooperativen Fahrerassistenzfunktionen noch besser abbilden und untersuchen zu können. In einem weiteren Schritt ist die Aussagefähigkeit des multivariaten Bewertungsverfahrens zu überprüfen. Die dem Verfahren zugrundeliegenden Korrekturfunktionen sind daraufhin unter Umständen anzupassen.

In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass in der Arbeit ausschließlich festzeitgesteuerte Koordinierungen betrachtet wurden. Zudem blieben weitere Einflüsse wie Baustellen, Parksuchverkehr, Radverkehr oder Haltevorgänge des Öffentlichen Verkehrs unberücksichtigt. Unter realen Bedingungen gilt es auch zu untersuchen, in welchem Maße sich systemtechnisch bedingte Fehlerquellen wie bspw. GPS-Ungenauigkeiten und falsche bzw. fehlende Datenübertragungen auf die Bewertung der Koordinierung unter Anwendung des multivariaten Verfahrens auswirken.

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass das multivariate Verfahren zur Beurteilung der Koordinierungsqualität unter Verwendung von bei läufig mobil erfassten Daten geeignet ist. Das Verfahren ermöglicht eine Qualitätsanalyse nach dem bewährten Sechs-Stufen-Schema des HBS. Hierbei wird der direkt aus den PVD ermittelbare Prozentwert der Durchfahrten ohne Halt D in Abhängigkeit von der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R und dem Haltlinienabstand l_{HL} abgemindert bzw. korrigiert. Trotz der genannten Unsicherheiten und der Vereinfachungen lässt das Verfahren eine angemessene Qualitätsbewertung von koordinierten Lichtsignalanlagen unter Verwendung der kooperativ gewonnenen Messgrößen zu. Die noch vorhandene Unschärfe des multivariaten Verfahrens resultiert unter anderem aus der fehlenden Kenntnis zum Ausmaß der tatsächlich stattgefundenen Fahrerbeeinflussung. Hier besteht aus Sicht des Verfahrens zur Bewertung der Koordinierung ein Verbesserungsbedarf. Durch ergänzende Daten über die ausgegebenen Fahrerinformationen ließe sich die Zuverlässigkeit des multivariaten Bewertungsverfahrens durchaus noch erhöhen.

Das zentralenbasierte kooperative System bietet ein großes Potenzial für weitere Untersuchungen. Die Verhaltensanalyse informierter Fahrer kann dabei ebenso Forschungsgegenstand sein wie die Weiterentwicklung bzw. Anpassung des multivariaten Verfahrens. Dabei stellen insbesondere die Berücksichtigung von verkehrsabhängig gesteuerten Lichtsignalanlagen und die Verwendung eines Rückstauschätzers große Herausforderungen dar. Es gilt bspw. zu klären, wie die Fahrer auf Unsicherheitsbereiche der prognostizierten Schaltzeitpunkte der Lichtsignalanlage sowie auf Unstetigkeiten der geschätzten Rückstaulängen reagieren und welchen Einfluss dies auf den Verkehrsablauf hat. Vor dem Hintergrund der bereits im Bereich der übergeordneten Straßennetze stattfindenden Einführung kooperativer Systeme scheinen weitere Forschungstätigkeiten bezüglich der Steuerung und der Bewertung des signalisierten Straßennetzes unter Verwendung mobil erfasster Messgrößen lohnenswert.

Abkürzungsverzeichnis

AKTIV-VM	Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr - Verkehrsmanagement
BALANCE	Balancing Adaptive Network Control Method
C-ITS	Kooperative Verkehrstelematiksysteme (engl.: Cooperative Intelligent Transport Systems)
C2C	Fahrzeug-zu-Fahrzeug (engl.: Car-to-Car)
C2I	Fahrzeug-zu-Infrastruktur (engl.: Car-to-Infrastructure)
CALM	Communication Access for Land Mobiles
CEN	Europäisches Komitee für Normung (franz.: Comité Européen de Normalisation)
COMeSafety	Communication for eSafety
CONVERGE	Communication Network Vehicle Road Global Extension
COOPERS	Cooperative Systems for Intelligent Road Safety
CTM	Cell Transmission Model
CVIS	Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems
DIAMANT	Dynamische Informationen und Anwendungen zur Mobilitätssicherung mit adaptiven Netzwerken und Telematik-Infrastruktur
DiL	Devices-in-the-Loop
DsD	Daten stationärer Detektoren
ECo-AT	European Corridor - Austrian Testbed for Cooperative Systems
euroFOT	European Field Operational Test
ETSI	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen (engl.: European Telecommunications Standards Institute)
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FOTsis	European Field Operational Test on safe, intelligent and sustainable Road Operation

Fz	Fahrzeug
GA	Grünanfang
GALOP	Genetischer Algorithmus zur netzweiten Optimierung der Lichtsignalsteuerung
GE	Grünende
GIS	Geoinformationssystem
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications (Mobilfunkstandard der zweiten Generation (2G))
GST	Global System for Telematics
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HCM	Highway Capacity Manual
HL	Haltlinie
HMI	Human Machine Interface
ICS	ITS Central Station
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
Invent	Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik
IRS	ITS Roadside Station
ISO	Internationale Organisation für Normung (engl.: International Organisation for Standardization)
ITS	Verkehrstelematiksysteme (engl.: Intelligent Transport Systems)
ITS-G5	Europäischer WLAN-Standard, von ETSI spezifiziert, Profil des amerikanischen IEEE 802.11p Standard
IV	Individualverkehr
Kfz	Kraftfahrzeug
KOLIBRI	Kooperative Lichtsignaloptimierung
KOLINE	Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen
KP	Knotenpunkt
LOS	Level-of-Service
LSA	Lichtsignalanlage

LTE	Long Term Evolution, Mobilfunkstandard der 4. Generation
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MOTION	Method for the Optimization of Traffic Signals in online controlled Networks
NoW	Network on Wheels
OCIT	Offene Schnittstelle für die Straßenverkehrstechnik (engl.: Open Communication Interface for Road Traffic Communication)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OTS	Offener Schnittstellenstandard für den herstellerübergreifenden Datenaustausch in Systemen der Verkehrssteuerung und des Verkehrsmanagements (engl.: Open Traffic Systems)
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PASSER	Progression Analysis and Signal System Evaluation Routine
PDA	Personal Digital Assistant
PVD	Probe Vehicle Data
QSV	Qualitätsstufe des Verkehrsablaufes
RILSA	Richtlinien für Lichtsignalanlagen
RSU	Infrastrukturseitige Kommunikationseinrichtung (engl.: Road Side Unit)
SEVECOM	Secure Vehicle Communication
sim^{TD}	Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland
SOAP	Signal Operation Analysis Package
SSZ	Simulationsszenarien
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
TeleFOT	Field Operational Tests of Aftermarket and Nomadic Devices in Vehicles
TP	Teilpunkt
TRANSYT	Traffic Network Study Tool
TRAVOLUTION	Traffic & Evolution
TTI	Texas Transportation Institute
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (Mobilfunkstandard der dritten Generation (3G))

UR:BAN-VV	Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement - Vernetztes Verkehrssystem
V2I	Fahrzeug-zu-Infrastruktur (engl.: Vehicle-to-Infrastructure)
V2V	Fahrzeug-zu-Fahrzeug (engl.: Vehicle-to-Vehicle)
V2X	Oberbegriff für Fahrzeug-zu-Fahrzeug und Fahrzeug-zu-Infrastruktur (engl.: Vehicle-to-X)
VwV-StVO	Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung
WLAN	Wireless Local Area Network
xDiL	Extendend-Devices-in-the-Loop
XML	Erweiterbare Auszeichnungssprache (engl: Extensible Markup Language)
ZWD	Zeit-Weg-Diagramm

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

α	Auslastungsgrad
β	Ausstattungsrate
γ_j	Gewicht für den Fahrstreifen j
κ	Fahrt-ID
μ	arithmetischer Mittelwert
ν	Variationskoeffizient
σ	Standardabweichung
D	Prozentsatz der Anzahl der registrierten Durchfahrten ohne Halt an den Knotenpunkten mit LSA
D_{korr}	abgeschätzter bzw. korrigierter Wert des Prozentsatzes der Durchfahrten ohne Halt
$D_{mFb,PVD}$	Prozentsatz der mittels PVD ermittelten Durchfahrten ohne Halt (mit Fahrerbeeinflussung)
$D_{oFb,alle}$	Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt im Referenzszenario (ohne Fahrerbeeinflussung, Ermittlung über alle Fahrzeuge)
$d_{Stau}(\kappa)$	Rückstaulänge bei Ankunft des Fahrzeugs κ [m]
$E_D(\beta)$	Differenz zwischen der PVD ermittelten und der im Referenzszenario vorhandenen Durchfahrtsquote ohne Halte in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate β
$E_{\bar{v}_R}(\beta)$	Differenz zwischen der PVD ermittelten und der im Referenzszenario vorhandenen mittleren Reisegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate β

G_H	Gewicht der Halte
G_W	Gewicht der Wartezeiten
h_{PVD}	Fahrtrichtung (Heading) des PVD-liefernden Fahrzeugs
k_i	Koordinierungsmaß für die Verkehrsrichtung i
l_{HL}	räumlicher Abstand zwischen Haltlinien
l_{TP}	Teilpunktabstand
$N_{H_{i,j}}$	Anzahl der Halte auf dem Fahrstreifen j am Knotenpunkt i
$N_{K,LSA}$	Anzahl der KP mit LSA des Streckenzugs
PI	Performance Index
q_B	Anzahl der behinderten Fahrzeuge
q_D	Anzahl der durchfahrenden Fahrzeuge
q_H	Anzahl der haltenden Fahrzeuge
$q_{i,j}$	Verkehrsstärke auf dem Fahrstreifen j am Knotenpunkt i
q_S	Sättigungsverkehrsstärke
q_Z	Zufussverkehrsstärke
t	Zeit
t_{Gr}	Grünzeitdauer
t_{PVD}	Anfragezeitstempel des PVD-liefernden Fahrzeugs
$t_{PVD,Halt}$	PVD-Zeitstempel bei Halt vor der Haltlinie [s]
$t_{PVD,Hlu}$	PVD-Zeitstempel bei Überfahrt der Haltlinie [s]
t_R	Reisezeit
t_{RA}	Umlaufsekunde des Grünanfangs
t_{RE}	Umlaufsekunde des Grünendes
t_{RGA}	Restzeit bis zum nächsten Grünanfang
t_{RGE}	Restzeit bis zum nächsten Grünende
t_U	Umlaufzeit

$t_{Verlust}$	Verlustzeit
$t_{Versatz}$	Versatzzeit
t_{VZV}	zeitliche Variation der Versatzzeit
t_W	Wartezeit
$\bar{t}_{W_{i,j}}$	mittlere Wartezeit auf dem Fahrstreifen j am Knotenpunkt i
t_x	aktuelle Umlaufsekunde
v_{max}	maximal mögliche Geschwindigkeit
v_{min}	minimal mögliche Geschwindigkeit
$v_{min,akz}$	minimal akzeptierte Geschwindigkeit
v_P	Progressionsgeschwindigkeit
v_{PVD}	Geschwindigkeit des PVD-liefernden Fahrzeugs
\bar{v}_R	mittlere Reisegeschwindigkeit
$\bar{v}_{R,oFb,alle}$	mittlere Reisegeschwindigkeit im Referenzszenario (ohne Fahrerbeeinflussung, Ermittlung über alle Fahrzeuge)
$\bar{v}_{R,mFb,PVD}$	über PVD ermittelte mittlere Reisegeschwindigkeit (mit Fahrerbeeinflussung)
v_{RGA}	Geschwindigkeit zum Erreichen des Grünanfangs
v_{RGE}	Geschwindigkeit zum Erreichen des Grünendes
v_{Wunsch}	Wunschgeschwindigkeit
v_{zul}	zulässige Höchstgeschwindigkeit
x	Weg
x_{Fz}	Streckenordinate des Fahrzeuges
x_{Halt}	Position des Halts vor der Haltlinie [m]
x_{HL}	Streckenordinate der Haltlinie
x_{Stau}	Staulänge
y_{PVD}	Längengrad des PVD-liefernden Fahrzeugs

Literaturverzeichnis

AGOF (2015):

Berichtsband zur mobile facts 2014-IV. AGOF mobile facts 2014-IV, Online abrufbar unter: http://www.agof.de/download/Downloads_Mobile_Facts/Downloads_Mobile_Facts_2014/Downloads_Mobile_Facts_2014_IV/mf%202014-IV%20Berichtsband%20zur%20mobile%20facts%202014-IV.pdf?4f5ad0 (letzter Aufruf: 04.05.2015).

AKTIV (2011):

AKTIV Ergebnisbericht. Ergebnisse Aktiv - gemeinsam die Zukunft erleben, Online abrufbar unter: http://www.aktiv-online.org/deutsch/Downloads/Broschueren/Ergebnisbuch_aktiv_gesamt.pdf (letzter Aufruf: 31.07.2014).

ARRIVE (2010):

arrive - Angebote für eine mobile Region. Abschlussbroschüre, S. 43-44, Kooperationspartner arrive c/o Landeshauptstadt München Kreisverwaltungsreferat München, 2010.

BAASS, K. (1985):

Ermittlung des optimalen Grünbandes auf Hauptverkehrsstraßen. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 31, Universität Karlsruhe, 1985.

BANKOSEGGER, D. ET AL. (2013):

Cooperative Services: User acceptance assessment in the Austrian FOT Testfeld Telematik. Proceedings of 20th ITS World Congress, Tokyo, Japan, 2013.

BAST (2014):

Verkehrszeichen und Symbole. Sinnbilder und Verkehrszeichenabbildungen, Zeichen 1000 - "Zusatzzeichen", Online abrufbar unter:

<http://www.bast.de/SharedDocs/Bilder/DE/FB-V/verkehrszeichen/vz-zip/z1000-zip.html?nn=605096> (letzter Aufruf: 29.05.2014).

BLEY, O. ET AL. (2011):

Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung. In: 12. Braunschweiger Symposium AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig, 2011.

BMVBS (2011):

Status und Rahmenbedingungen für Intelligente Verkehrssysteme (IVS) in Deutschland - Bericht gemäß Artikel 17(1) der Richtlinie 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Online abrufbar unter: http://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/action_plan/doc/2011_its_initial_report_germany.pdf (letzter Zugriff am: 04.08.2014).

BOHLINGER, M. (2007):

Koordinierte Lichtsignalsteuerung. In: OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr. CD mit Projektergebnissen, PDF-Dokument von 2006. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2007.

BOLTZE, M. (2005):

Qualitätsmanagement im Stadtverkehr - Neue Wege zu einer effizienteren Verkehrssteuerung. In: Straßenverkehrstechnik 02/2005, Kirschbaum Verlag, S. 59-68, Bonn, 2005.

BOSSERHOFF, D. / NOVOTNY, T. (2007):

Koordinierung von Lichtsignalanlagen. In: Handbuch für Verkehrssicherheit und Verkehrstechnik (Kapitel 5.1) Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen, Wiesbaden, 2007.

BOSSOM, R. ET AL. (2011):

Extend FRAMEwork architecture for cooperative systems. WP500, Deployment and Organisational Issues for Cooperative Systems, Version 1.0, Dissemination level, European Commission, DG Information Society and Media in the 7th Framework Programme, 2011.

BRAUN, R. / WEICHENMEIER, F. (2005):

Automatische Offline-Optimierung der lichtsignaltechnischen Koordinierung des MIV im städtischen Netz unter Verwendung genetische Algorithmen. In: HEUREKA '05, Optimierung in Verkehr und Transport, S. 313-330, München, 2005.

BRAUN, R. (2008):

Ein echtzeitfähiger Evolutionärer Algorithmus zur netzweiten Optimierung der Lichtsignalsteuerung. Technische Universität München, Dissertation, 2008.

BRAUN, R. ET AL. (2009):

TRAVOLUTION - Netzweite Optimierung der Lichtsignalsteuerung und LSA-Fahrzeug-Kommunikation. In: Straßenverkehrstechnik 6/2009, Kirschbaum Verlag, S. 365-374, Bonn, 2009.

- BRETHERTON, R. D. / RAI, G. I. (1982):
The use of SCOOT in low flow conditions. Traffic Engineering & Control 1982-12, Vol. 23, p. 574-576, 1982.
- BRÜGGEMANN, H. / BREMER, P. (2011):
Grundlagen Qualitätsmanagement - Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM. Springer Vieweg, Berlin, 2011.
- BRIGNOLO, R. (2007):
SAFESPOT - The SAFESPOT applications. Vortragsfolien, 6th European Congress on ITS, Aalborg, 2007.
- BRILON, W. / WIETHOLT, T. / WU, N. (2007):
Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrabhängigen Steuerungen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 163, Bergisch Gladbach, 2007.
- BRILON, W. / GROSSMANN, M. / BLANKE, H. (1994):
Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Strassen. Entwurf eines Handbuchs, Teil A. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 669, Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg, 1994.
- BRILON, W. / HOHMANN, S. / GIULIANI, S. (2013):
Potenziale adaptiver Steuerungen. In: Straßenverkehrstechnik 09/2013, Kirschbaum Verlag, S. 557 -564, Bonn, 2013.
- BRILON, W. / SCHNABEL, W. (2003):
Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen. In: Straßenverkehrstechnik 01/2003, Kirschbaum Verlag, S. 21 -26, Bonn, 2003.
- BRILON, W. ET AL. (2009):
Adaptive koordinierte Signalsteuerung in Münster. In: Straßenverkehrstechnik 09/2009, Kirschbaum Verlag, S. 565 -573, Bonn, 2009.
- BRUHN, M. (2007):
Qualitätsmanagement für Dienstleistungen - Grundlagen, Konzepte, Methoden. 7. Auflage. Springer-Verlag, Basel, 2007.
- BUSCH, F. / KRUSE, G. (1993):
MOTION - Ein neues Verfahren für die städtische Lichtsignalsteuerung und seine Erprobung im Rahmen des EG-Programms ATT. In: HEUREKA '93, Optimierung in Verkehr und Transport, S.79-93, München, 1993.

BUSCH, F. (2007):

Car-to-X im Verkehrswesen. Munich Network, Mobilität - Trends auf der Straße, 2007.

Online abrufbar unter: http://www.munichnetwork.com/fileadmin/user_upload/konferenzen/mobilitaetsforum-2/071128MUN_Prof_Busch_Fritz.pdf (letzter

Aufruf: 07.01.2016).

C-ITS (2014):

Erster Entwurf "Gesamtarchitektur" - Dokument D 01 der Projektgruppe 1

Systemarchitektur. Cooperative ITS Corridor Joint deployment, Entwurf, Version 2.0,

Online abrufbar unter: <http://c-its-korridor.de/data/download/Gesamtarchitektur%20C-ITS.pdf> (letzter Aufruf: 09.04.2015)

CHAUDHARY, N. (1997):

Real-Time Application of Passer IV: Project Summary and Guidelines. Texas

Department of Transportation, Texas, USA, 1997.

COMERT, G. / CETIN, M. (2009):

Queue length estimation from probe vehicle location and the impacts of sample size.

European Journal of Operational Research 197, p. 196-202, 2009.

CROSBY, P. B. (1979):

Quality Is Free: The Art of Making Quality Certain: How to Manage Quality - So That It

Becomes A Source of Profit for Your Business. McGraw-Hill Custom Publishing , New

York, 1979.

DIN 55350-11:

DIN 55350-11 Begriffe zum Qualitätsmanagement - Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005. Beuth Verlag, Berlin, 2008.

DIN EN 13816:

DIN EN 13816:2002 Transport - Logistik und Dienstleistungen, Öffentlicher

Personennahverkehr; Definition, Festlegung von Leistungszielen und Messung der

Servicequalität. 2002.

DIN EN ISO 9000:

DIN EN ISO 9000:2005 Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe.

Beuth Verlag, Berlin, 2005.

DINKEL, A. ET AL. (2013):

Cooperative Optimization of Traffic Signal Control and Driver Assistance Outside Urban

Areas. In: Mobil.TUM 2013 - International Scientific Conference on Mobility and

Transport - ITS for Connected Mobility. München, 2013.

ECO-AT (2015):

ECO-AT - European Corridor - Austrian Testbed for Cooperative Systems. Internetseite: <http://eco-at.info/home.html/> (letzter Aufruf: 09.04.2015).

EICHMANN, V. ET AL. (2005):

Umweltfreundlicher, attraktiver und leistungsfähiger ÖPNV - ein Handbuch. Deutsches Institut für Urbanistik, Berlin, 2005.

ETSI EN 302 663:

ETSI EN 302 663: Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band. European Telecommunications Standards Institute ETSI, V1.2.1, 2013, Online abrufbar unter: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01_02_01_60/en_302663v010201p.pdf (letzter Aufruf: 02.04.2015).

ETTINGER, R. (2014):

Projektpräsentation Kolibri. ITS Bavaria, Vortragsfolien, Online abrufbar unter: http://www.its-bavaria.de/wordpress/wp-content/uploads/20140505_2_ettinger.pdf (letzter Aufruf: 08.04.2015).

EUROFOT (2012):

Final Report, Deliverable D11.3. European Large-Scale Field Operational Tests on In-Vehicle Systems 7th Framework Programme, Online abrufbar unter: http://www.eurofot-ip.eu/download/library/deliverables/eurofotsp120121212v11d1d113_final_report.pdf (letzter Aufruf: 29.12.2014).

FAISSTNAUER, C. (2011):

Cooperative Systems - Results of the European project COOPERS. Presentation within AUTOMOTIVENETS Workshop, Trento, Italy, 2011.

FAKLER, O. ET AL. (2014):

Structures of Traffic Management and Control in German Cities. Proceedings of 10th ITS European Congress, Helsinki, Finland, 2014.

FGSV (2009):

Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) - Ausgabe 2001, Fassung 2009. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2009.

FGSV (2010):

Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) - Ausgabe 2010. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2010.

FGSV (2014):

Hinweise für die Lichtsignalsteuerung in Straßennetzen (H LiS) - Ausgabe 2014.
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2014.

FGSV (2015):

Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) - Ausgabe 2015.
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2015.

FRIEDRICH, B. (1999):

Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen. Technische Universität München, Dissertation, 1999.

FRIEDRICH, B. (2000):

Steuerung von Lichtsignalanlagen: BALANCE - ein neuer Ansatz. In:
Straßenverkehrstechnik 07/2000, Kirschbaum Verlag, S. 321 -333, Bonn, 2000.

GANSER, M. (2003):

Neue Verfahren - neue Praxis. In: Steuerung kommunaler Verkehrsnetze. Was können und was kosten die neuen Verfahren? Was setzen sie voraus? Ergebnisse der Tagung des Themenbereichs Verkehr und Raumstruktur, Hrsg.: Marcus Steierwald, Sabine Mertens, Akademie für Technikfolgenabschätzungen in Baden-Württemberg, Stuttgart, 2003.

GARTNER, N. (1983):

OPAC: A demand-responsive Strategy for Traffic Signal Control. Transportation Research Board, p. 75-81, Transportation Research Record 906,

GARVIN, D. A. (1984):

What Does "Product Quality" Really Mean? Sloan Management Review, Jahrgang 26, Heft 1; S. 25-43.

GEIGER, W. (2001):

Qualität als Fachbegriff des Qualitätsmanagements. In Zollondz, H.-D.: Lexikon Qualitätsmanagement. Handbuch des modernen Managements auf der Basis des Qualitätsmanagements, S. 801-810, München/Wien, 2001.

GEIGER, W. / KOTTE, W. (2007):

Handbuch Qualität: Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagement: Systeme - Perspektiven. Vieweg Verlag, 5. Auflage, Wiesbaden, 2007.

GILKA, P. (2012):

Wirkung kooperativer Systeme auf die Sicherheit. Technische Universität Berlin, Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme, Dissertation, 2012.

HAMBURGER, D. (1933):

Die zeckmäßige Lichtfolge bei selbständiger Verkehrsregelung. Verkehrstechnik 19/1933, S. 476-478, Berlin und Wien 14, 1933.

HCM (2010):

Highway Capacity Manual 2010. Transportation Research Board , Washington, DC, 2010.

HENRY, J. / FARGES, J. (1989):

RODYN. Proceedings of 6th IFAC-IFIP-IFORS Symposium on Transportation, pp. 505-507, Paris, Frankreich, 1989.

HESS, H.-J. (2007):

Qualitätssicherungsvereinbarungen - Der Leitfaden für die rechtssichere Vertragsgestaltung. Expert-Verlag, Renningen, 2007.

HUNT, P. ET AL. (1981):

SCOOT - A Traffic Responsive Method od Coordiniating Signals. Transport and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 1014, Berkshire, England, 1981.

IEEE 802.11AC (2013):

IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks - Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 4. Online abrufbar unter: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ac-2013.pdf> (letzter Aufruf: 11.08.2014)

IEEE 802.11AD (2012):

IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks - Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 3. Online abrufbar unter: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ad-2012.pdf> (letzter Aufruf: 11.08.2014)

ITS-CH (2013):

Schwerpunktthema: Entwicklungen in Nachbarländern bieten Potenziale für Synergien. ITS-CH, Swiss Platform for the Promotion of ITS, Bericht:16. Mai 2013 (Partnersitzung).

JURAN, J. M.; GRZYNA, F. M. (HRSG.) (1988):

Juran's Quality Control Handbook. 4. Auflage. McGraw-Hill, Inc., New York, 1988.

KELLER, H. ET AL. (2002):

Verkehrsadaptive Netzsteuerung von Lichtsignalanlagen. In: Straßenverkehrstechnik 07/2002, Kirschbaum Verlag, S. 333 -338, Bonn, 2002.

KIRSCHFINK, H. / ARETZ, C. (2009):

Qualitätsmanagementkonzept für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen des Bundes. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 187, Bergisch Gladbach, 2009.

KOBBELOER, D. (2007):

Dezentrale Steuerung von Lichtsignalanlagen in urbanen Verkehrsnetzen. Universität Kassel, Dissertation, 2007.

KRAUSE, M. / BENGLER, K. (2013):

Traffic Light Assistant - Driven in a Simulator. The 8th International Conference on Systems ICONS 2013, Seville, Spanien, 2013.

LÜDEKE, A. ET AL. (2010):

Ökonomische Bewertung kooperativer Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Nutzer und Infrastruktur-Betreiber - Ergebnisse des SAFESPOT-Projektes. Kurzfassung eines Vortrags für die TÜV-Tagung "Sicherheit durch Fahrerassistenz", Schwerpunktthema: Motivation und Nutzen, München, 2010.

LEITZKE, C. (2011):

Reisezeitermittlung im motorisierten Individualverkehr mit Hilfe drahtloser Kommunikationstechnologien. Schriftenreihe Verkehr Heft 22 der Universität Kassel, Dissertation, 2011.

LITTLE, J. / KELSON, M. (1980):

Optimal Signal Timing for Arterial Signal Systems, MAXBAND. Operations Research Center, MIT, Cambridge, MA, USA, 1980.

LOWRIE, P. (1982):

SCATS Principles, Methodologies, and Algorithms. In: IEE Conference on Road Traffic Signals. IEE Publications, S. 67-70, England, 1982.

MAURO, V. / DiTARANTO, C. (1990):

UTOPIA. Control, Computers, Communications in Transportation: selected papers from the IFAC Symposium, pp. 245-252, Pergamon Press, Oxford, 1990.

MÜCK, J. (2002):

Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren. In: HEUREKA '02, Optimierung in Verkehr und Transport, S. 385-402, München, 2002.

MÜCK, J. (2008):

Schätz- und Optimierungsverfahren in der Adaptiven Netzsteuerung SITRAFFIC Motion MX. In: HEUREKA '08, Optimierung in Verkehr und Transport, Stuttgart, 2008.

MCSHANE, C. (1999):

The Origins and Globalization of Traffic Control Signals. In: Journal of Urban History. Vol. 25 (3), p. 379-404. Sage Publications, Inc. 1999.

MENIG, C. (2008):

Der informierte Fahrer - Optimierung des Verkehrsablaufs durch LSA-Fahrzeug-Kommunikation. Heureka '08. Stuttgart, FGSV-Verlag.

MERTZ, J. (2001):

Ein mikroskopisches Verfahren zur Verkehrsadaptiven Knotenpunktsteuerung mit Vorrang des öffentlichen Verkehrs. Technische Universität München, Dissertation, 2001.

MESSER, C. / HAENEL, H. / KOEPPE, E. (1974):

A Report on the User's Manual for Progression Analysis and Signal System Evaluation Routine - PASSER II. Research Report 165-14, Development of Urban Traffic Management and Control Systems, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, USA, 1974.

MOE, M. / NEBEHAJ, V. / ERNST, T. (2010):

CVIS Performance Test Results: Fast Handovers in an 802.11p Network. Proceedings of the 10th International Conference on Telecommunications for Intelligent Transport Systems, Kyoto, Japan, 2010.

NEUMANN, T. (2011):

Rückstaulängenschätzung an Lichtsignalanlagen mit Floating-Car-Daten. Dissertation, Institut für Verkehrssystemtechnik, DLR, Berlin 2011.

OCIT (2007):

OCIT-Outstations, Hinweise und Textvorschläge für die Beschaffung von Lichtsignalsteuerungssystemen mit OCIT-Schnittstellen. OCIT-O-Hinweise V1.0 18.12.2007, OCIT Arbeitskreis Ausschreibung, Online abrufbar unter: http://www.roundtable-ocit.net/pdf/OCIT_O-Hinweise_V1.0.pdf (letzter Aufruf: 23.07.2014).

OTS (2014):

OTS - OpenTrafficSystems. Internetseite: <http://www.opentrafficsystems.org/index.php?id=34> (letzter Aufruf: 03.06.2014).

OTTO, T. (2011):

Kooperative Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung an signalisierten Knotenpunkten. Schriftenreihe Verkehr Heft 21 der Universität Kassel, Dissertation, 2011.

- OTTO, T. / HOYER, R. (2009):
Devices-in-the-Loop Approach - Traffic Simulation meets real Devices of distributed V2I Applications. In: mobil.TUM 2009 - International Scientific Conference on Mobility and Transport, Proceedings, Munich, Germany, 2009.
- OTTO, T. / HOYER, R. (2010):
Operating Conditions of on-board displayed Green Wave Speeds via V2I-Communication. Proceedings of the 5th International Symposium: Networks for Mobility, Stuttgart, 2010.
- OTTO, T. / SCHMID, A. (2012):
Clusterung des Ausbaurzustandes der verkehrstelematischen Infrastruktur. Bericht im Rahmen des Projekts UR:BAN-VV, Teilprojekt Kooperative Infrastruktur (KI), Version 1.0, München 2012, unveröffentlicht.
- PEARSON, R. (2003):
Traffic Signal Control. Institute of Transportation Studies at the University of California at Berkeley and Caltrans, USA, 2003.
- PITZINGER, P. / SULZER, E. (1968):
Lichtsignalanlagen für den Straßenverkehr. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1968.
- PRIEMER, C. (2010):
Kommunikationsdatenbasierte, dezentrale Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen. Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig, Schriftenreihe Heft 57, Dissertation, 2010.
- PTV (2011):
VISSIM 5.40 - Benutzerhandbuch. PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, 2011.
- REUSSWIG, A. (2005):
Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2005.
- RICHTER, T. / GILKA, P. (2012):
Kooperative Systeme im Praxisversuch - Ergebnisse und Empfehlungen des Forschungsprojekts COOPERS. In: Straßenverkehrstechnik 03/2012, Kirschbaum Verlag, S. 145 -150, Bonn, 2012.
- RITTGER, L. (2015):
Driving Behaviour and Driver Assistance at Traffic Light Intersections. Inaugural-Dissertation, Fakultät für Humanwissenschaften, Julius-Maximilians-Universität, Würzburg, 2015.

RITTGER, L. ET AL. (2015):

Anger and bother experience when driving with a traffic light assistant: A multi-driver simulator study. In: D. de Waard, J. Sauer, S. Röttger, A. Kluge, D. Manzey, C. Weikert, A. Toffetti, R. Wiczorek, K. Brookhuis, and H. Hoonhout (Eds.) (2015). Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2014 Annual Conference.

ROBERTSON, D. (1969):

TRANSYT: A Traffic Network Study Tool. Band 253 von RRL report, Road Research Laboratory, 1969.

ROBERTSON, D. (1997):

The TRANSYT method of co-ordination traffic signals. In: Traffic Engineering and Control, Vol. 38, p. 76-78, 1997.

RUDOLPH, F. / HOYER, R. (2013):

Smartphone-based Real Time Driver Information at signalized Intersections under Consideration of Route Recommendations. In: mobil.TUM 2103 - International Scientific Conference on Mobility and Transport, Proceedings, Munich, Germany, 2013.

RUDOLPH, F. / LEITZKE, C. / HOYER, R. (2013):

On-board Real Time Driver Information using bidirectional Data Exchange between Smartphones and Traffic Data Provider. Proceedings of 20th World Congress on Intelligent Transport Systems, Tokyo, Japan, 2013.

SABRA, W. (2003):

Signal Timing Process - Final Report. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, USA, 2003.

SACHS, L. / HEDDERICH, J. (2006):

Angewandte Statistik. 12. Auflage, Springer Verlag, 2006.

SANTA, C. ET AL. (2014):

Potenziale kooperativer Lichtsignalsteuerung zur Steigerung der Verkehrseffizienz und -sicherheit. In: Straßenverkehrstechnik 10/2014, Kirschbaum Verlag, S. 676 -683, Bonn, 2014.

SCHNABEL, W. (1973):

Verkehrstechnische Grundlagen und Berechnungsverfahren für koordinierte Lichtsignalsteuerungen von Straßenzügen. Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List", Dissertation, 1973.

SCHNABEL, W. / LOHSE, D. (2011):

Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 1: Straßenverkehrstechnik. 3., vollständig überarbeitete Auflage, Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin 2011.

- SCHNABEL, W. / LÄTZSCH, L. / BRÜCKNER, N. (2001):
Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr. In: Straßenverkehrstechnik 12/2001, Kirschbaum Verlag, S. 584 -595, Bonn, 2001.
- SCHNABEL, W. ET AL. (1998):
Die Qualität des Verkehrsablaufs auf städtischen Hauptverkehrsstraßen. In: Straßenverkehrstechnik 12/1998, Kirschbaum Verlag, S. 635 -643, Bonn, 1998.
- SCHUSTER, G. (1996):
Koordinierte Lichtsignalsteuerung mit niedriger Progressionsgeschwindigkeit.
Technische Hochschule Darmstadt, Dissertation, 1996.
- SIM^{TD} (2009):
Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland, Deliverable D21.4 - Spezifikation der Kommunikationsprotokolle. Version 1.0; 29.09.2009.
- SIM^{TD} (2013):
Funktionen Ampelphasenassistent. In: Informationsblätter zu sim^{TD}, fakten, S.43, 2013.
- STATISTICA (2015):
Anzahl der Smartphone-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2015.
Internetseite: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonennutzer-in-deutschland-seit-2010/> (letzter Aufruf: 04.05.2015).
- STEIN, W. VON (1969):
100 Jahre Verkehrsampel. In: Straßenverkehrstechnik 01/1969, Kirschbaum Verlag, S. 32 -33, Bonn-Bad Godesberg, 1969.
- STVO (2013):
Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). Neufassung gem. V v. 06.03.2013 I 367, in Kraft getreten am 1.4. 2013.
- SYNCHRO (2013):
Working White Paper on the Implementation of the 2010 Highway Capacity Manual within Synchro® Version 8. Trafficware LLC., USA, 2013.
- TELEFOT (2012):
Final Report, Deliverable D1.15. Large Scale Collaborative Project 7th Framework Programme, Online abrufbar unter: http://www.telefot.eu/files/file/deliverables/Final/TeleFOT_D1%2015_FinalReport_Final.pdf (letzter Aufruf: 29.12.2014).

TESTFELD TELEMATIK (2014):

Testfeld Telematik - Feldversuch zur Stärkung österreichischen Know-Hows im Bereich umweltverträglicher Mobilität. Klima - und Energiefonds, publizierter Endbericht 2014, Online abrufbar unter: <http://eco-at.info/testfeld-telematik.html> (letzter Aufruf: 09.04.2015).

TTI (2014):

Signal Timing Optimization Software - History of PASSER. Internetseite: <http://ttisoftware.tamu.edu> (letzter Aufruf: 03.06.2014).

TUKEY, J. W. (1977):

Exploratory Data Analysis. 1. Auflage. Addison Wesley, 1977.

UR:BAN (2014):

UR:BAN - Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement. Internetseite: <http://urban-online.org> (letzter Aufruf: 17.07.2014).

VwV-StVO (2010):

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO). Sonderdruck zu StVO und VwV-StVO, Stand 01.09.2009, Druck 2010.

WEBSTER, F. (1958):

Traffic Signal Settings. Road Research Laboratory Technical Paper No. 39, HMSO, London, UK, 1958.

WEISHEIT, T. (2014):

Algorithmenentwicklung zur Prognose von Schaltzeitpunkten an verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagen. HEUREKA'14 - Optimierung in Transport und Verkehr, Stuttgart, 2014.

WELTER-SCHULTES, F. (2013):

Geschwindigkeitssignale mit unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten. Geschwindigkeitsanzeiger, Göttingen, Kasseler Landstraße, westlich Rehbachstraße, ortsauswärts, 31.12.2013, Standort: 51.529865°, 9.894369°, Online abrufbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Geschwindigkeitssignal#mediaviewer/File:Ampel-Goettingen-34.jpg> (letzter Aufruf: 02.12.2014).

WERNER, H. (2010):

Supply Chain Management: Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. Gabler Verlag, Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden, 2010.

WIETHOLT, T. (2009):

Einsatzbereiche Grüner Wellen und verkehrsabhängiger Steuerungen. Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2009.

ZIMDAHL, W. (1983):

Wolfsburger Welle. VW Forschung, Wolfsburg, 1983.

ZINGEL, H. (2005):

Qualitätsmanagement und die ISO 9000er Normenfamilie, Elementare Methodenlehre des betrieblichen Qualitätsmanagements nach ISO 9000:2000 und darüber hinaus.

eBook und BWL-Skript (CD), 2005.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Qualität als Grad der Übereinstimmung	7
2.2	Qualitätskreis im Verkehrswesen	9
2.3	Verkehrsabhängige Steuerungsverfahren	13
2.4	Koordinierung im Zeit-Weg-Diagramm	18
2.5	Grund- und Oberwellen	20
2.6	Versatzzeit	21
2.7	Grünbandbreitenvergrößerung und -verkürzung	22
2.8	Beispiele kollektiver Geschwindigkeitsanzeigen	29
2.9	Beispiele individueller Geschwindigkeitsanzeigen	30
4.1	Aufbau des zugrunde liegenden kooperativen Systems	49
4.2	Altersstruktur der Verkehrsrechner in Deutschland	51
4.3	Abdeckung des Straßennetzes mit stationären Detektoren	52
4.4	Sequenzdiagramm des zugrunde liegenden kooperativen Systems	54
4.5	Sequenzdiagramm - xDiL	57
4.6	Grüne-Welle-Assistent und Verzögerungsassistent auf dem Smartphone	59
4.7	Darstellung von Unsicherheitsbereichen beim Grüne-Welle-Assistenten	61
4.8	Restzeitinformationen auf dem Smartphone	61
5.1	Simulationsmodell und Streckenszenarien	67
5.2	Optimale Versatzzeit	67
5.3	Positive und negative Versatzzeitvariation	68
5.4	Fahrlinien mit und ohne Fahrerbeeinflussung durch LSA-Informationen	70
5.5	Fahrlinien mit beeinflussten und unbeeinflussten Fahrzeugen	75
5.6	Einfluss der Ausstattungsrate auf die Bewertungskenngrößen	77
5.7	Durchfahrten ohne Halt in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate	79
5.8	Mittlere Reisegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate	80
5.9	Performance Index in Abhängigkeit von der Ausstattungsrate	81
5.10	Einfluss des Haltlinienabstands auf die Werte der Kenngrößen	82
5.11	Einfluss des Haltlinienabstands auf die Fahrerbeeinflussung	83
5.12	Negative Auswirkung der Fahrerbeeinflussung	85
6.1	Positionen für PVD-Übertragung	93

6.2	Übersicht der festgestellten Qualitätsstufen unter Berücksichtigung eines fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufs	96
6.3	Ergebnisse der Koordinierungsbewertung unter Berücksichtigung eines fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufs	97
6.4	Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt in Abhängigkeit von der VZV unter Berücksichtigung eines fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufs	99
6.5	Mittlere Reisezeiten in Abhängigkeit von der VZV unter Berücksichtigung eines fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufs	100
6.6	PI in Abhängigkeit von der VZV unter Berücksichtigung eines fahrerseitig unbeeinflussten Verkehrsablaufs	101
6.7	Abweichung der Durchfahrten ohne Halt	106
6.8	Abweichungen der festgestellten Qualitätsstufen nach dem HBS-Verfahren	107
6.9	Abweichungen zwischen den PVD-ermittelten und den im jeweiligen Referenzszenario vorliegenden mittleren Reisegeschwindigkeiten	109
6.10	Abweichungen der festgestellten Qualitätsstufen nach der Brilon/Schnabel-Methode	110
7.1	Korrelation zwischen D und \bar{v}_R , $\alpha = 85\%$, $l_{HL} = 500\text{ m}$	116
7.2	Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 500\text{ m}$	118
7.3	Zusammenfassung der vereinfachten Korrekturfunktionen ($\alpha = 85\%$)	120
7.4	Vergleich der Abweichungen E_D vor und nach Korrektur, $\alpha = 85\%$	122
7.5	Vergleich der QSV-Abweichungen vor und nach Korrektur, $\alpha = 85\%$	124
7.6	Abweichungen E_D vor und nach Korrektur, $\alpha = 25\%$ und $\alpha = 50\%$	126
7.7	QSV-Abweichungen vor und nach Korrektur, $\alpha = 25\%$ und $\alpha = 50\%$	127
7.8	Einfluss des Auslastungsgrads auf die Bewertung der Koordinierung mit PVD	128
7.9	Vergleich zwischen den im unbeeinflussten Verkehrsablauf vorliegenden Prozentwerten und den mittels multivariaten Verfahren ermittelten Prozentwerten der Durchfahrten ohne Halt	129

Tabellenverzeichnis

2.1	Einsatzempfehlung von Steuerungsverfahren auf makroskopischer Ebene	15
2.2	Qualitätsstufenkonzept zur Bewertung von Koordinierungen	31
2.3	Qualitätsstufen unter Berücksichtigung der Reisegeschwindigkeit	33
5.1	VZV-Szenarien	68
6.1	Diskrepanzen bei der Bewertung mit und ohne Fahrerbeeinflussung	103
7.1	Auszug der Datengrundlage zur Verfahrensentwicklung	115
7.2	Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 500\text{ m}$	118

Anhang

A Grundlagen Qualität

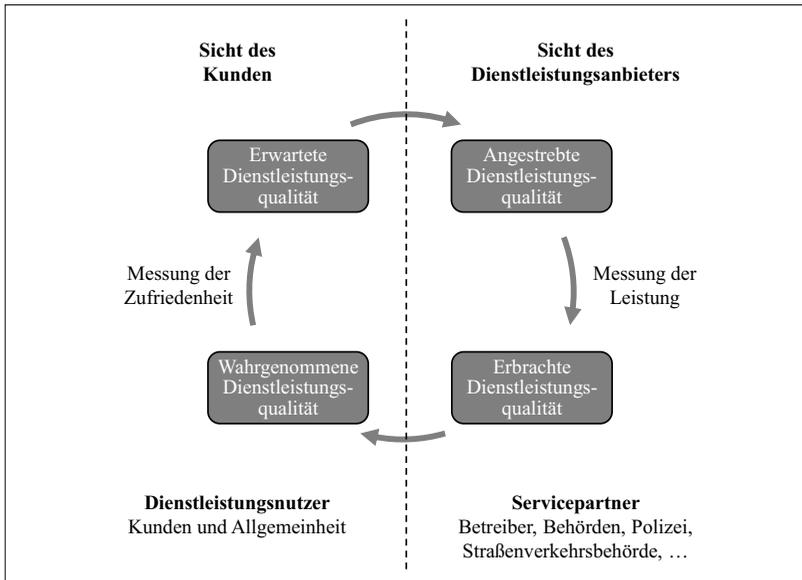


Abbildung A.1: Qualitätskreis im öffentlichen Verkehr⁵⁴

⁵⁴ in Anlehnung an [DIN EN 13816] und [KIRSCHFINK / ARETZ-2009]

B Erläuterungen zu den Begrifflichkeiten für die Einsatzempfehlung von Steuerungsverfahren bzgl. der Verkehrsbelastung

Die Erläuterungen betreffen die Einsatzempfehlungen von Steuerungsverfahren hinsichtlich der Verkehrsbelastung nach [FGSV-2014] und beziehen sich auf die in Tabelle 2.1 verwendeten Begrifflichkeiten.

Auslastungsgrad

Der Auslastungsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen der Verkehrsstärke und der zur Verfügung stehenden Kapazität. In Tabelle 2.1 werden folgende Abstufungen verwendet:

- **Niedrig:** Die Verkehrsstärke liegt bei allen Knotenpunkten deutlich unterhalb der Kapazitätsgrenze. Es treten keine Stauungen und nur koordinierungsbedingte Haltevorgänge mit geringen Wartezeiten auf.
- **Mittel:** Die Verkehrsstärke liegt bei allen Knotenpunkten noch unterhalb der Kapazitätsgrenze. Es treten vereinzelt Stauungen und koordinierungsbedingte Haltevorgänge mit mittleren Wartezeiten auf. Grüne Wellen funktionieren überwiegend noch.
- **Hoch:** Die Verkehrsstärke liegt bei mehreren Knotenpunkten im Bereich der Kapazitätsgrenze. Es treten über längere Zeit Stauungen auf. Grüne Wellen funktionieren nur noch bedingt.

Vorhersehbarkeit

Die Vorhersehbarkeit bezieht sich auf Schwankungen der Verkehrsstärke. In Tabelle 2.1 werden folgende Fälle unterschieden:

- **Hohe Vorhersehbarkeit:** Die Veränderung der Verkehrsstärke bewegt sich größtenteils im Rahmen von bekannten Tagesganglinien oder planbaren Sonderverkehren. Es treten nur geringe Abweichungen davon auf.
- **Niedrige Vorhersehbarkeit:** Es ereignen sich Verkehrsverlagerungen und Veränderungen der Verkehrsstärke, die sich nicht in charakteristischen Belastungssituationen oder Tagesganglinien wiederfinden.

C Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes

Definitionen der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes

Tabelle C.1: Definitionen der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes⁵⁵

QSV	Verbale Definition
A	Die Mehrzahl der Verkehrsteilnehmer kann ungehindert den Knotenpunkt passieren. Die Wartezeiten sind kurz.
B	Alle während der Sperrzeit ankommenden Verkehrsteilnehmer können in der nachfolgenden Freigabezeit weiterfahren oder -gehen. Die Wartezeiten sind kurz.
C	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.
D	Im Kraftfahrzeugverkehr ist ständiger Rückstau vorhanden. Die Wartezeiten für alle Verkehrsteilnehmer sind beträchtlich. Der Verkehrszustand ist noch stabil.
E	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.
F	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.

⁵⁵Die Definitionen sind dem HBS [FGSV-2009] entnommen und beziehen sich auf die in Tabelle 2.2 dargestellten Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes.

Qualitätsstufenkonzepte unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit in der deutschen Literatur

Tabelle C.2: QSV-Konzepte - Kriterium: Reisegeschwindigkeit

QSV	Mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v}_R [km/h]			
	[BRILON / GROSSMANN / BLANKE-1994]	[SCHNABEL et al.-1998]	[SCHNABEL / LÄTZSCH / BRÜCKNER-2001]	[BRILON / SCHNABEL-2003]
	$v_{max} = 50 \text{ km/h}$			
A	≥ 45	≥ 45	≥ 40	≥ 40
B	≥ 40	≥ 40	≥ 30	≥ 30
C	≥ 30	≥ 30	≥ 20	≥ 25
D	≥ 20	≥ 20	≥ 15	≥ 20
E	< 20	≥ 10	≥ 10	≥ 15
F	< 10	< 10	< 10	< 15

D Übersicht der IEEE 802.11-Standards

Tabelle D.1: Übersicht der IEEE 802.11-Standards⁵⁶

Standard	Merkmale
802.11	2,4 GHz; Datenraten: 1 und 2 Mbit/s
802.11a	5 GHz; Datenraten: 6-54 Mbit/s, Definition der physikalischen Schicht unter Verwendung des OFDM-Verfahrens
802.11b	2,4 GHz; Datenraten: 5,5 und 11 Mbit/s
802.11c	Beschreibung der Brückenfunktionalität von Access Points; wichtig für Hersteller
802.11d	globale Harmonisierung der verwendeten Frequenzbereiche; wichtig für Hersteller
802.11e	MAC-Erweiterung der Unterstützung der Dienstgüte; speziell für echtzeitorientierte Anwendungen (Video, Sprache)
802.11f	Zusammenarbeit von Access Points; Roaming-Unterstützung mobiler Teilnehmer; Definition eines „Inter AP Protokolls“ (IAPP)
802.11g	OFDM-Erweiterung im 2,4 GHz-Band; Datenraten bis 54 Mbit/s; Integration von 802.11b berücksichtigt
802.11h	Erweiterung zu 802.11a; zusätzliche dynamische Kanalauswahl (DFS) und Sendeleistung (TPC) für den Einsatz in Europa
802.11i	MAC-Erweiterung für verbesserte Sicherheit; Verwendung des AES-Algorithmus; Einbindung von 802.11x
802.11j	dynamische Frequenzwahl im 4,9 GHz-Band und im 5 GHz-Band (Anforderung des japanischen Regulierers)
802.11k	Ergänzung zum Radio Resource Management; Bereitstellung von Schnittstellen für höhere Schichten, um Roaming und Koexistenz von Systemen, etc. zu unterstützen
802.11n	hochbitratige Ergänzung; erzielbare Datenraten größer als 100 Mbit/s; Verringerung des gesamten internen Managementaufwands
802.11p	5,85 - 5,925 GHz; Datenraten: bis 27 Mbit/s brutto; speziell für Anwendung im Bereich kooperativer Systeme für die V2V und V2I Kommunikation; gehört zu den sogenannten Wireless Access for Vehicular Environments (WAVE)
802.11ac	5 GHz; Erweiterung zu 802.11n; maximale Datenrate 1299 Mbit/s bei 3x3 Multiple Input Multiple Output(MIMO) bzw. 6936 Mbit/s bei 8x8 MIMO
802.11ad	60 GHz; große Bandbreite bspw. für unkomprimiertes Video; maximal 10 m Reichweite; bis zu 5280 Mbit/s ohne MIMO

⁵⁶ in Anlehnung an [LEITZKE-2011], Erweiterung um 802.11ac [IEEE 802.11AC-2013] und 802.11ad [IEEE 802.11AD-2012]

E Strukturen der Verkehrssteuerung und des Verkehrsmanagements in Deutschland

Die in den nachfolgenden Abbildungen aufgeführten Histogramme beziehen sich auf die Ergebnisse einer Umfrage über den Aufbau und über die Strukturen im Bereich der Verkehrssteuerung und des Verkehrsmanagements. Die Werte sind [FAKLER et al.-2014] entnommen.

Gründe für Rückstauungen in urbanen Straßennetzen

In Abbildung E.1 sind die in der Umfrage angegebenen Ursachen für mögliche Rückstauungen angegeben. Hierbei ist zu erwähnen, dass es in 44 % der Fälle keine einheitliche Staudefinition innerhalb der öffentlichen Verwaltung der jeweiligen Stadt gibt. Wie in der Abbildung ersichtlich, wurden überwiegend Kapazitätsengpässe gefolgt von Instandhaltungsarbeiten am Straßennetz als Hauptgründe für Rückstauungen angegeben.

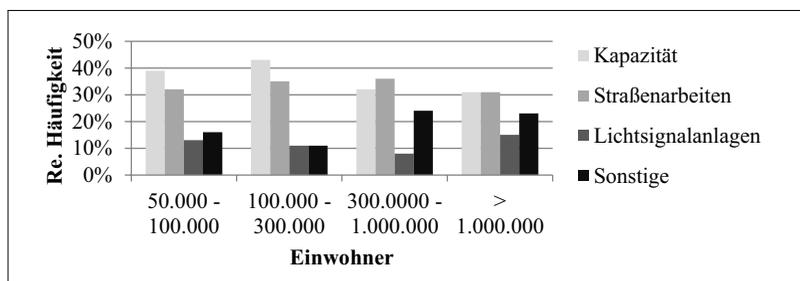


Abbildung E.1: Angegebene Staugründe in urbanen Straßennetzen⁵⁷

Übersicht verwendeter Steuerungsverfahren

Abbildung E.2 gibt einen Eindruck über die verwendeten Steuerungsverfahren in deutschen Städten mit mehr als 50.000 Einwohnern. Mehrheitlich kommen regelbasierte Verkehrssteuerungen und zum Teil Festzeitsteuerungen zur Anwendung.

⁵⁷ in Anlehnung an [FAKLER et al.-2014]

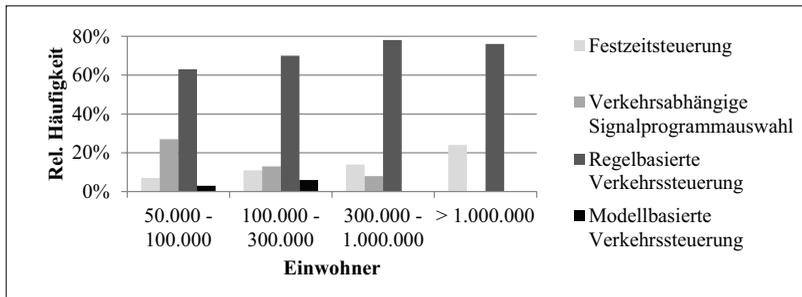


Abbildung E.2: Übersicht verwendeter Steuerungsverfahren in Deutschland⁵⁸

Optimierungsschwerpunkt an Knotenpunkten

Abbildung E.3 zeigt, welche Optimierungsstrategie die Städte an signalisierten Knotenpunkten bevorzugen. Es ist ersichtlich, dass zum größten Teil (über 60 %) eine Optimierung über alle Knotenpunktszufahrten stattfindet. Hier liegt das Gesamtoptimum bzw. Systemoptimum im Vordergrund. Es lässt sich jedoch auch eine weitere Tendenz erkennen: Insbesondere bei Städten mit geringer Einwohnerzahl wird häufiger die Hauptrichtung fokussiert. Infolge der Nutzeroptimierung für die Hauptrichtung werden für den Querverkehr höherer Wartezeiten in Kauf genommen.

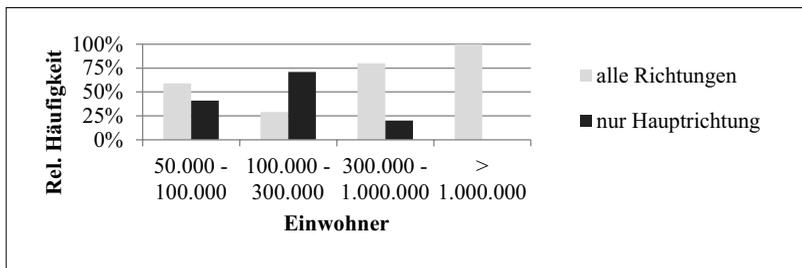


Abbildung E.3: Optimierungsschwerpunkt an Knotenpunkten⁵⁹

⁵⁸ in Anlehnung an [FAKLER et al.-2014]

⁵⁹ in Anlehnung an [FAKLER et al.-2014]

F Extended-Devices-in-the-Loop Ansatz

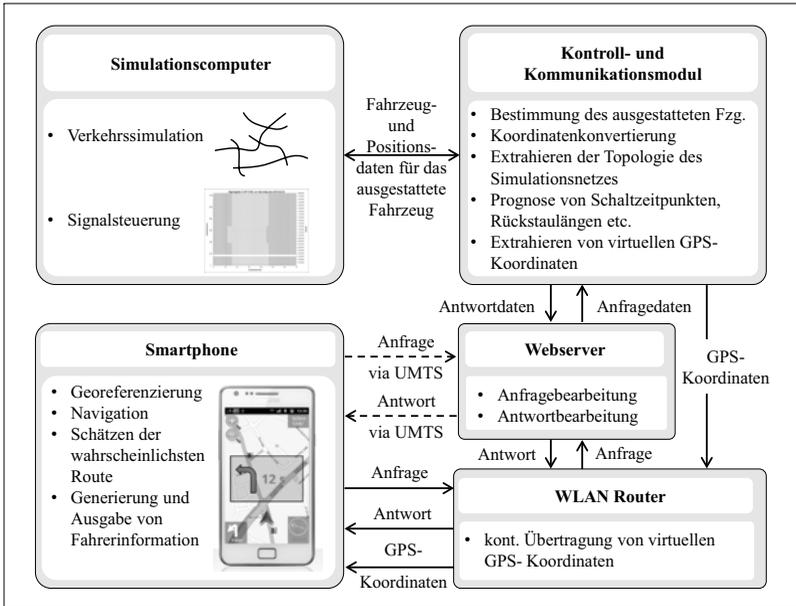


Abbildung F.1: Komponenten und Kommunikationspfade im xDiL⁶⁰

⁶⁰ in Anlehnung an [RUDOLPH / LEITZKE / HOYER-2013]

G Statistischer Nachweis der Anzahl der Umläufe

Die Anzahl der Umläufe zur Bewertung einer festzeitgesteuerten koordinierten LSA ist von der gewünschten Genauigkeit mit gegebener statistischer Sicherheit sowie vom Mittelwert und der Streuung der relevanten Bewertungskenngröße abhängig. Infolge der gegebenen Voraussetzungen kann prinzipiell davon ausgegangen werden, dass auch weniger Umläufe ausreichend sind, um die jeweilige Verkehrskenngröße statistisch sicher zu bestimmen. Denn die Freigabe beginnt und endet aufgrund der Festzeitsteuerung in jedem Zyklus jeweils zur gleichen Umlaufsekunde. Demzufolge kommen die Fahrzeuge praktisch als Pulk am zweiten signalisierten Querschnitt an. Der zeitliche Ankunftsbereich des Pulks unterliegt vermutlich keinen allzu großen Schwankungen.

Prozentsatz der Durchfahrten mit Halt

Im Folgenden wird die benötigte Anzahl der Umläufe anhand der Prozentsätze der Halte (Bewertungskenngröße nach dem HBS 2001-Verfahren) an einem Beispielszenario ($l_{HL} = 500 \text{ m}$, $t_{VZV} = 9 \text{ s}$, $\alpha = 0,85 \rightarrow q = 567 \text{ Fz/h}$, $\beta = 0$) berechnet. Das Szenario wurde absichtlich gewählt, weil Voruntersuchungen ergaben, dass ca. die Hälfte aller Fahrzeuge an der zu bewertenden Anlage halten müssen und die Schwankung hier am größten ausfällt.

Streuung

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n_U - 1} \quad (\text{Gl. 1})$$

mit:

s^2 ... Streuung

x_i ... Variable, deren Standardabweichung gesucht ist
(hier: Prozentsatz der Durchfahrten mit Halt p_{Halte})

\bar{x} ... Mittelwert der Prozentsätze der Durchfahrten mit Halt

n_U ... Anzahl der Umläufe

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n_U - 1} = \frac{2,0895}{60 - 1} = 0,0354 \quad (\text{Gl. 2})$$

Hinweis: Die Werte $(x_i - \bar{x})^2$ wurden tabellarisch ermittelt. Die Berechnung kann der Tabelle G.1 entnommen werden.

Konfidenzniveau

Das Konfidenzniveau bestimmt die Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit einer statistischen Hypothese und wird für die Berechnung der Simulationsläufe mit 95 % angesetzt. Es wird also berechnet, ob der Mittelwert der Prozentsätze der Durchfahrten mit Halt mit einer 95 %-en Wahrscheinlichkeit innerhalb des Konfidenzintervalls liegt.

$$\alpha = 0,95 \quad (\text{Gl. 3})$$

Wahl des Konfidenzintervalls

Das Konfidenzintervall C beschreibt den Wertebereich, in dem der wahre Mittelwert mit der Wahrscheinlichkeit des Konfidenzniveaus liegt. Das Intervall bzw. die Ergebnisdifferenz wird für die Berechnung mit 0,05 (= 5 %) angesetzt. Dies ist als eine sehr hohe Genauigkeit anzusehen. Aufgrund der nachfolgenden zweiseitigen Betrachtung darf nur 1 von 40 Fahrzeugen vom vorgegebenen Verhalten (Halt ja oder nein) abweichen. Demzufolge wird eine Abweichung des Prozentsatzes der Durchfahrten mit Halt (vom Mittelwert) von maximal $\pm 2,5\%$ toleriert.

$$C = 0,05 \quad (\text{Gl. 4})$$

Berechnung der Anzahl der Simulationsläufe

$$n_U \geq \frac{t(\alpha, n_U - 1)^2 \cdot s^2}{C^2} \quad (\text{Gl. 5})$$

mit:

$t(\alpha, n_U - 1)$... Wert aus der Student-Verteilung für Wahrscheinlichkeit einen zweiseitigen Vertrauensbereich (hier: lineare Interpolation der grau markierten Werte aus Tabelle G.2)

Tabelle G.1: Werte zur Berechnung der Standardabweichung

Umlaufnummer	n_{Fz} [-]	n_{Haltc} [-]	$x_i = p_{Haltc}$ [%]	$(x_i - \bar{x})^2$
1	7	4	0,57	0,0004
2	7	2	0,29	0,071
3	8	4	0,5	0,0027
4	9	2	0,22	0,1089
5	8	7	0,88	0,1042
6	8	4	0,5	0,0027
7	9	3	0,33	0,0479
8	8	6	0,75	0,0391
9	9	2	0,22	0,1089
10	6	2	0,33	0,0479
11	7	4	0,57	0,0004
12	10	6	0,6	0,0023
13	11	7	0,64	0,0071
14	9	2	0,22	0,1089
15	5	2	0,4	0,0232
16	8	3	0,38	0,0314
17	9	6	0,67	0,0131
18	8	7	0,88	0,1042
19	11	7	0,64	0,0071
20	8	2	0,25	0,0913
21	13	9	0,69	0,0196
22	11	6	0,55	0
23	9	2	0,22	0,1089
24	7	4	0,57	0,0004
25	7	3	0,43	0,0153
26	8	2	0,25	0,0913
27	12	9	0,75	0,0391
28	12	5	0,42	0,0184
29	12	6	0,5	0,0027
30	10	6	0,6	0,0023
31	9	4	0,44	0,0116
32	7	4	0,57	0,0004
33	11	7	0,64	0,0071
34	13	7	0,54	0,0002
35	10	5	0,5	0,0027
36	10	7	0,7	0,0218
37	8	6	0,75	0,0391
38	8	6	0,75	0,0391
39	10	5	0,5	0,0027
40	7	5	0,71	0,0263
41	13	5	0,38	0,0281
42	10	4	0,4	0,0232
43	10	4	0,4	0,0232
44	10	6	0,6	0,0023
45	8	8	1	0,2005
46	12	7	0,58	0,001
47	10	8	0,8	0,0614
48	11	7	0,64	0,0071
49	4	2	0,5	0,0027
50	8	4	0,5	0,0027
51	9	7	0,78	0,0509
52	10	7	0,7	0,0218
53	10	4	0,4	0,0232
54	10	5	0,5	0,0027
55	12	6	0,5	0,0027
56	8	6	0,75	0,0391
57	12	6	0,5	0,0027
58	11	11	1	0,2005
59	13	9	0,69	0,0196
60	5	3	0,6	0,0023
Mittelwert		\bar{x}	0,5522	
Summe			$\sum(x_i - \bar{x})^2$	2,0895

Tabelle G.2: Ausgewählte Quantile (Signifikanzschranken) der t -Verteilung⁶¹

Anzahl Freiheitsgrade	zweiseitige Wahrscheinlichkeiten $P(t \leq t_{1-\alpha/2})$			
	0,98	0,95	0,90	0,80
1	31,8205	12,7062	6,3138	3,0777
2	6,9646	4,3027	2,9200	1,8856
3	4,5407	3,1824	2,3534	1,6377
4	3,7469	2,7764	2,1318	1,5332
5	3,3649	2,5706	2,0150	1,4759
...			...	
55	2,3961	2,0040	1,6730	1,2971
60	2,3901	2,0003	1,6706	1,2958

$$n_U \geq \frac{t(\alpha, n_U - 1)^2 \cdot s^2}{C^2} = \frac{2,00696^2 \cdot 0,0354}{0,05^2} \approx 57,0 \quad (\text{Gl. 6})$$

Überprüfung

Es muss solange eine Iteration der genannten Schritte durchgeführt werden, bis die Anzahl der erforderlichen Umläufe $n_{U,erforderlich}$ kleiner oder gleich derjenigen ist, die bei der Ermittlung von t aus der Student-Verteilung ($n_{U,angenommen}$) angenommen wurde. Auf weitere Iterationsschritte kann verzichtet werden, da:

$$n_{U,erforderlich} = 57 \leq n_{U,angenommen} = 60 \quad (\text{Gl. 7})$$

Somit wird deutlich, dass 57 Umläufe erforderlich sind, um die Anzahl der Durchfahrten mit Halt statistisch sicher zu bestimmen.

Mittlere Reisegeschwindigkeit

Nachfolgend wird ein analoger Nachweis für die mittlere Reisegeschwindigkeit erbracht. Die Streuung ergibt sich zu:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n_U - 1} = \frac{0,0314}{60 - 1} = 0,0005 \quad (\text{Gl. 8})$$

⁶¹ Auszug aus [SACHS / HEDDERICH-2006]

Die Streuung ist hier viel geringer als bei den Prozentsätzen der Durchfahrten mit Halt. Die Werte $(x_i - \bar{x})^2$ wurden ebenfalls tabellarisch ermittelt. Die Berechnung kann der Tabelle G.3 entnommen werden.

Mit dem selben Konfidenzniveau α von 95 %, der Genauigkeit C von 0,05 % (entspricht maximale Abweichung um $\pm 1,25 \text{ km/h}$) und dem gleichen Wert aus der Student-Verteilung von 2,00969 ergibt sich folgende Mindestanzahl an Umläufen.

$$n_U \geq \frac{t(\alpha, n_U - 1)^2 \cdot s^2}{C^2} = \frac{2,00969^2 \cdot 0,0005}{0,05^2} \approx 0,9 \quad (\text{Gl. 9})$$

Demzufolge lässt sich bereits mit einem Umlauf die mittlere Reisegeschwindigkeit des Stroms statistisch sicher bestimmen.

Tabelle G.3: Werte zur Berechnung der Standardabweichung für \bar{v}_R

Umlaufnummer	$x_i = \bar{v}_R / v_{zul} [\%]$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	0,7714	0,0000520
2	0,7829	0,0000184
3	0,7725	0,0000373
4	0,7856	0,0000489
5	0,7675	0,0001234
6	0,79	0,0001298
7	0,8211	0,0018056
8	0,7825	0,0000151
9	0,7711	0,0000564
10	0,8033	0,0006097
11	0,7714	0,0000520
12	0,772	0,0000437
13	0,7809	0,0000053
14	0,8078	0,0008522
15	0,876	0,0094852
16	0,7725	0,0000373
17	0,79	0,0001298
18	0,77	0,0000741
19	0,7818	0,0000102
20	0,78	0,0000019
21	0,77	0,0000741
22	0,7673	0,0001279
23	0,7967	0,0003273
24	0,7757	0,0000085
25	0,7814	0,0000078
26	0,785	0,0000409
27	0,7808	0,0000048
28	0,785	0,0000409
29	0,7792	0,0000004
30	0,786	0,0000546
31	0,7944	0,0002494
32	0,7586	0,0004003
33	0,7055	0,0053448
34	0,6992	0,0063057
35	0,767	0,0001348
36	0,776	0,0000068
37	0,79	0,0001298
38	0,7713	0,0000534
39	0,759	0,0003845
40	0,7643	0,0002047
41	0,7631	0,0002405
42	0,777	0,0000026
43	0,764	0,0002134
44	0,779	0,0000002
45	0,7713	0,0000534
46	0,7758	0,0000079
47	0,772	0,0000437
48	0,7727	0,0000349
49	0,83	0,0026411
50	0,7938	0,0002308
51	0,7889	0,0001059
52	0,776	0,0000068
53	0,777	0,0000026
54	0,787	0,0000704
55	0,7858	0,0000517
56	0,78	0,0000019
57	0,7692	0,0000885
58	0,7736	0,0000251
59	0,7762	0,0000058
60	0,77	0,0000741
Mittelwert \bar{x}	0,7786	
Summe	$\sum (x_i - \bar{x})^2$	0,0314

H Fahrerbeeinflussung in der Simulationsumgebung

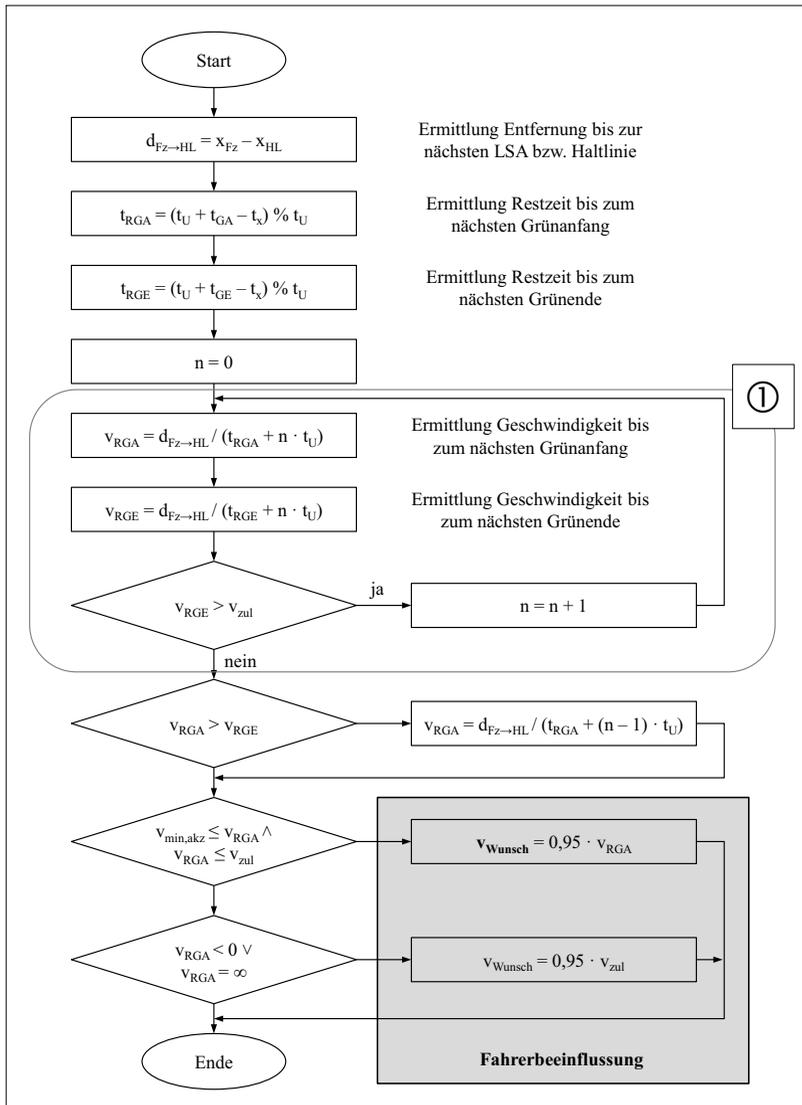


Abbildung H.1: Programmablaufdiagramm zur Berechnung der Wunschgeschwindigkeit

I Verkehrliche Wirkung der Fahrerbeeinflussung

Korrelationsfunktion zwischen D und β

Die simulative Untersuchung lieferte folgende Wertepaare:

X-Werte Ausstattungsrate β [%]	Y-Werte Prozentwert der Durchfahrten ohne Halt D [%]
0	35,782
1	36,7355
2	36,8325
3	38,0425
4	38,495
5	39,1815
10	41,859
15	44,155
25	47,5555
50	52,108
75	54,8395
100	56,672

Für die Korrelationsanalyse müssen folgende Bedingungen gelten:

- Der höchste Wert der Durchfahrtsrate ohne Halt D wird bei Vollaussattung $\beta = 100$ % erreicht. Das Maxima der Korrelationsfunktion liegt daher beim Scheitelpunkt $S(100|56,672)$.
- Weiterhin muss die Korrelationsfunktion den kleinsten Wert, welcher sich bei $\beta = 0$ % einstellt, schneiden. Der vorgegebene Schnittpunkt liegt gemäß der Tabelle bei $P(0|35,782)$.

Voruntersuchungen zeigten, dass grundsätzlich ein quadratischer Zusammenhang zugrunde gelegt werden kann. Mit den oben genannten Randbedingungen kann der Zusammenhang auch über eine Funktionsgleichung einer Parabel verstanden werden. Die Scheitelpunktform einer Parabel lautet:

$$y = a \cdot (x + d)^2 + e$$

Der Scheitel einer Parabel hat die Koordinaten: $S(-d|e)$

Der Scheitelpunkt der Parabel lautet: $S(100|56,672)$

Es gilt demnach: $d = -100$ und $e = 56,672$

Die Funktionsgleichung wird an dieser Stelle wie folgt beschrieben:

$$y = a \cdot (x - 100)^2 + 56,672$$

Die Parabel schneidet die y-Achse im Punkt $P(0|35,782)$.

Durch einsetzen der Koordinaten des Punktes in die Funktionsgleichung ergibt sich:

$$35,782 = a \cdot (0 - 100)^2 + 56,672$$

Durch das Auflösen der Gleichung nach a folgt:

$$a = -0,002089$$

Das Einsetzen der Parameterwerte a,d und e in die Scheitelpunktform ergibt folgende Funktionsgleichung:

$$y = -0,002089 \cdot (x - 100)^2 + 56,672$$

Einfluss des Auslastungsgrades auf die Bewertungskenngrößen

Tabelle I.1: Einfluss des Auslastungsgrades auf die Bewertungskenngrößen

Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt					
β [%]	D [%]			Abweichungen zu $\alpha = 85\%$ [%]	
	$\alpha = 85\%$	$\alpha = 50\%$	$\alpha = 25\%$	$\alpha = 50\%$	$\alpha = 25\%$
0	35,8	40,2	40,7	-4,4	-4,9
1	36,7	40,8	41,2	-4,1	-4,5
2	36,8	40,8	41,5	-4,0	-4,6
3	38,0	41,9	41,8	-3,9	-3,8
4	38,5	42,6	42,2	-4,1	-3,7
5	39,2	42,8	42,9	-3,6	-3,7
10	41,9	44,5	44,7	-2,6	-2,9
15	44,2	46,7	47,6	-2,5	-3,4
25	47,6	51,3	50,3	-3,8	-2,7
50	52,1	56,4	57,9	-4,3	-5,8
75	54,8	60,2	63,4	-5,4	-8,6
100	56,7	62,2	66,5	-5,5	-9,8
\bar{x}	43,5	47,5	48,4	-4,0	-4,9
σ	7,2	7,6	8,8	0,9	2,1

Mittlere Reisegeschwindigkeit					
β [%]	\bar{v}_R [km/h]			Abweichungen zu $\alpha = 85\%$ [%]	
	$\alpha = 85\%$	$\alpha = 50\%$	$\alpha = 25\%$	$\alpha = 50\%$	$\alpha = 25\%$
0	35,6	37,8	39,4	6,2	4,2
1	35,6	37,8	39,4	6,2	4,1
2	35,6	37,8	39,3	6,3	4,0
3	35,6	37,8	39,3	6,0	4,1
4	35,6	37,8	39,3	6,0	3,9
5	35,6	37,7	39,3	6,1	4,2
10	35,6	37,8	39,2	6,1	3,9
15	35,5	37,6	39,1	6,0	4,0
25	35,6	37,6	38,9	5,8	3,4
50	35,5	37,4	38,7	5,3	3,6
75	35,4	37,2	38,4	5,2	3,1
100	35,3	37,0	38,1	4,9	3,0
\bar{x}	35,5	37,6	39,0	5,8	3,8
σ	0,1	0,3	0,4	0,4	0,4

Performance Index					
β [%]	PI [-]			Abweichungen zu $\alpha = 85\%$ [%]	
	$\alpha = 85\%$	$\alpha = 50\%$	$\alpha = 25\%$	$\alpha = 50\%$	$\alpha = 25\%$
0	905	764	698	-15,6	-8,5
1	896	757	695	-15,5	-8,2
2	895	753	693	-15,9	-7,9
3	882	751	688	-14,8	-8,4
4	877	739	692	-15,7	-6,4
5	866	743	681	-14,3	-8,3
10	844	721	671	-14,5	-7,0
15	824	707	647	-14,3	-8,4
25	783	664	634	-15,3	-4,5
50	741	626	575	-15,6	-8,1
75	725	594	541	-18,1	-9,0
100	714	585	519	-18,1	-11,3
\bar{x}	829	700	644	-15,6	-8,0
σ	67,8	63,2	61,6	1,2	1,5

J Multivariates Bewertungsverfahren

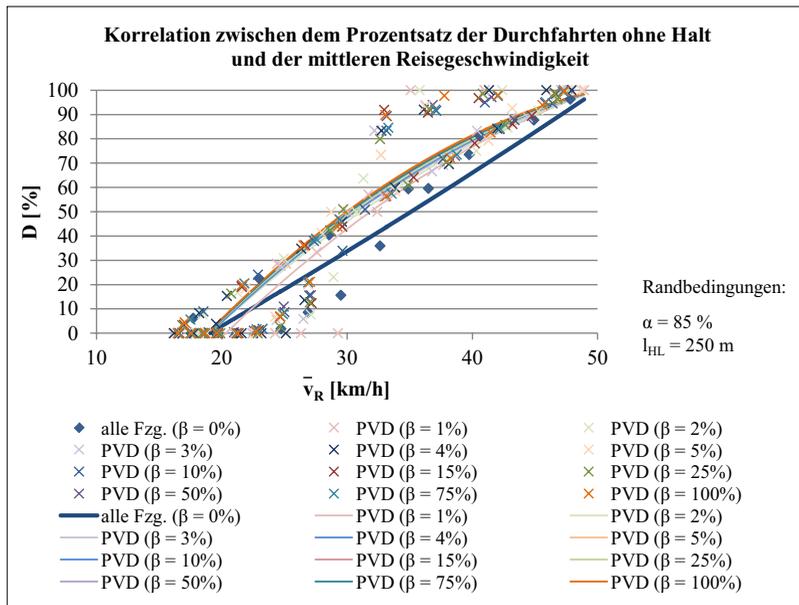


Abbildung J.1: Korrelation zwischen D und \bar{v}_R , $\alpha = 85 \%$, $l_{HL} = 250 \text{ m}$

β [%]	Korrelationsfunktion	R^2
0	... $y(x) = 0,00829 \cdot (x - 50)^2 + 3,48188 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,92
1	... $y(x) = -0,05289 \cdot (x - 50)^2 + 1,79852 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,82
2	... $y(x) = -0,04830 \cdot (x - 50)^2 + 1,73827 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,87
3	... $y(x) = -0,05041 \cdot (x - 50)^2 + 1,62633 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,88
4	... $y(x) = -0,05999 \cdot (x - 50)^2 + 1,36573 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,87
5	... $y(x) = -0,06633 \cdot (x - 50)^2 + 1,16748 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,91
10	... $y(x) = -0,05592 \cdot (x - 50)^2 + 1,50417 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,90
15	... $y(x) = -0,06181 \cdot (x - 50)^2 + 1,29662 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,88
25	... $y(x) = -0,05748 \cdot (x - 50)^2 + 1,42992 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,89
50	... $y(x) = -0,06291 \cdot (x - 50)^2 + 1,25687 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,89
75	... $y(x) = -0,06120 \cdot (x - 50)^2 + 1,30809 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,91
100	... $y(x) = -0,06395 \cdot (x - 50)^2 + 1,21501 \cdot (x - 50) + 100$	... 0,89

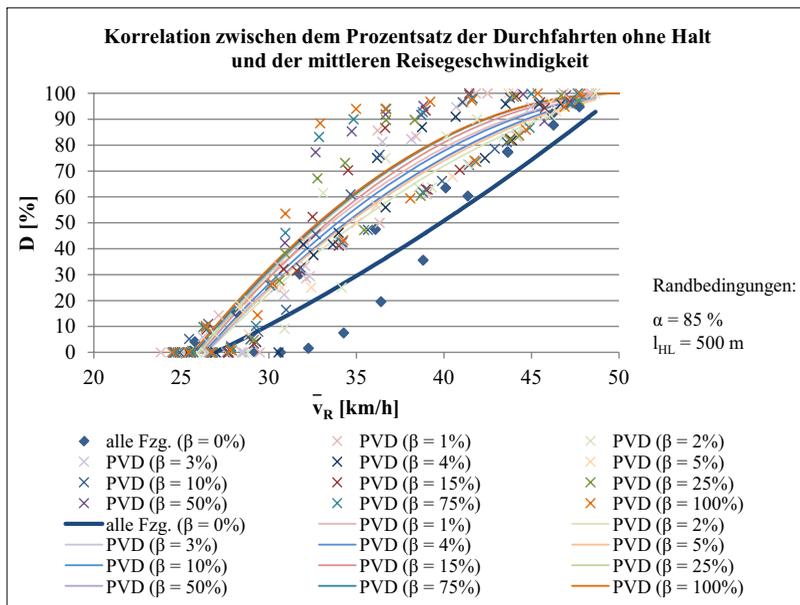


Abbildung J.2: Korrelation zwischen D und \bar{v}_R , $\alpha = 85 \%$, $l_{HL} = 500 \text{ m}$

$\beta[\%]$	Korrelationsfunktion	R^2
0	... $y(x) = 0,0444205 \cdot (x - 50)^2 + 5,3655655 \cdot (x - 50) + 100$...	0,90
1	... $y(x) = -0,1450852 \cdot (x - 50)^2 + 0,6536936 \cdot (x - 50) + 100$...	0,91
2	... $y(x) = -0,1068721 \cdot (x - 50)^2 + 1,7350815 \cdot (x - 50) + 100$...	0,91
3	... $y(x) = -0,1290765 \cdot (x - 50)^2 + 1,2051186 \cdot (x - 50) + 100$...	0,91
4	... $y(x) = -0,1272173 \cdot (x - 50)^2 + 1,2195454 \cdot (x - 50) + 100$...	0,91
5	... $y(x) = -0,1182270 \cdot (x - 50)^2 + 1,4158248 \cdot (x - 50) + 100$...	0,93
10	... $y(x) = -0,1455349 \cdot (x - 50)^2 + 0,7689584 \cdot (x - 50) + 100$...	0,92
15	... $y(x) = -0,1658341 \cdot (x - 50)^2 + 0,2397480 \cdot (x - 50) + 100$...	0,90
25*	... $y(x) = -0,1737958 \cdot (x - 50)^2 + 100$...	0,89
50*	... $y(x) = -0,1720217 \cdot (x - 50)^2 + 100$...	0,89
75*	... $y(x) = -0,1706225 \cdot (x - 50)^2 + 100$...	0,86
100*	... $y(x) = -0,168907 \cdot (x - 50)^2 + 100$...	0,84

* hier Parabelfunktion, damit Maxima der Funktion nicht im Definitionsbereich und Wertebereich liegt

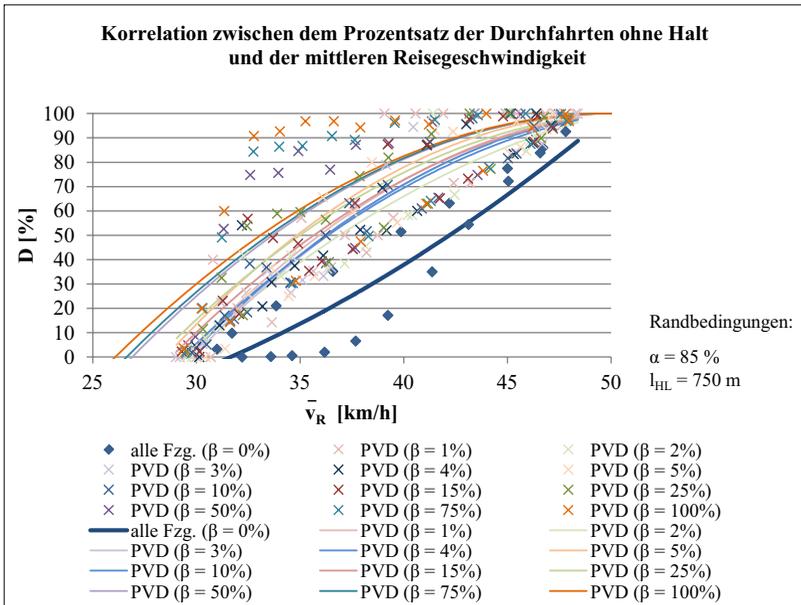


Abbildung J.3: Korrelation zwischen D und \bar{v}_R , $\alpha = 85 \%$, $l_{HL} = 750 \text{ m}$

β [%]	Korrelationsfunktion	R^2
0	$y(x) = 0,09096 \cdot (x - 50)^2 + 7,11776 \cdot (x - 50) + 100$	0,89
1	$y(x) = -0,20146 \cdot (x - 50)^2 + 0,71735 \cdot (x - 50) + 100$	0,81
2	$y(x) = -0,13533 \cdot (x - 50)^2 + 2,04192 \cdot (x - 50) + 100$	0,90
3	$y(x) = -0,19962 \cdot (x - 50)^2 + 0,92542 \cdot (x - 50) + 100$	0,91
4	$y(x) = -0,16714 \cdot (x - 50)^2 + 1,37805 \cdot (x - 50) + 100$	0,89
5	$y(x) = -0,21273 \cdot (x - 50)^2 + 0,07093 \cdot (x - 50) + 100$	0,92
10	$y(x) = -0,19085 \cdot (x - 50)^2 + 1,00440 \cdot (x - 50) + 100$	0,94
15	$y(x) = -0,17774 \cdot (x - 50)^2 + 0,93698 \cdot (x - 50) + 100$	0,86
25	$y(x) = -0,18071 \cdot (x - 50)^2 + 0,61372 \cdot (x - 50) + 100$	0,84
50*	$y(x) = -0,18730 \cdot (x - 50)^2 + 100$	0,84
75*	$y(x) = -0,18300 \cdot (x - 50)^2 + 100$	0,59
100*	$y(x) = -0,17468 \cdot (x - 50)^2 + 100$	0,50

* hier Parabelfunktion, damit Maxima der Funktion nicht im Definitions- und Wertebereich liegt

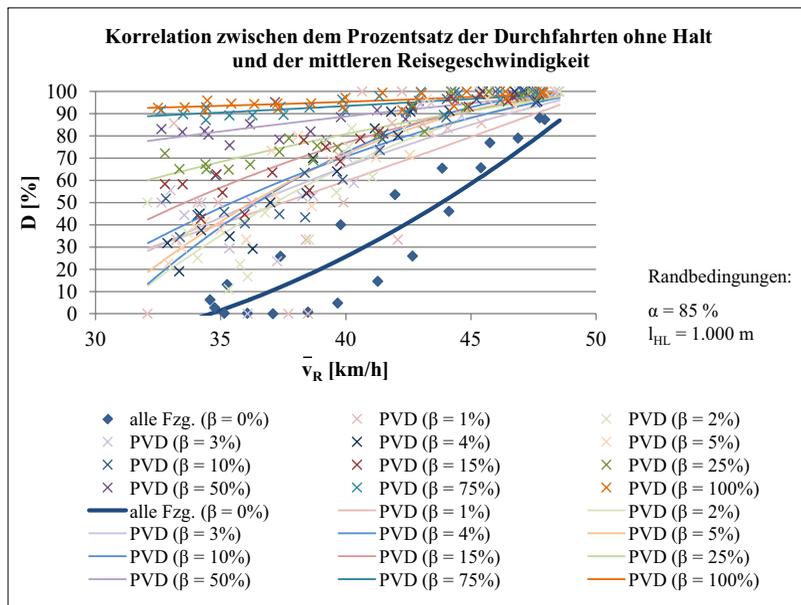


Abbildung J.4: Korrelation zwischen D und \bar{v}_R , $\alpha = 85 \%$, $l_{HL} = 1000 \text{ m}$

$\beta[\%]$	Korrelationsfunktion	R^2
0	... $y(x) = 0.17386 \cdot (x - 50)^2 + 9.17128 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.86
1	... $y(x) = 0.01177 \cdot (x - 50)^2 + 4.14844 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.38
2	... $y(x) = -0.19243 \cdot (x - 50)^2 + 1.43001 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.72
3	... $y(x) = -0.07860 \cdot (x - 50)^2 + 2.60179 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.65
4	... $y(x) = -0.26378 \cdot (x - 50)^2 + 0.10729 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.92
5	... $y(x) = -0.21686 \cdot (x - 50)^2 + 0.65015 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.88
10	... $y(x) = -0.11147 \cdot (x - 50)^2 + 1.81444 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.82
15	... $y(x) = -0.11392 \cdot (x - 50)^2 + 1.17409 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.82
25	... $y(x) = -0.03841 \cdot (x - 50)^2 + 1.53593 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.84
50	... $y(x) = -0.00960 \cdot (x - 50)^2 + 0.49155 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.84
75	... $y(x) = 0.00451 \cdot (x - 50)^2 + 0.70109 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.56
100	... $y(x) = 0.00690 \cdot (x - 50)^2 + 0.53712 \cdot (x - 50) + 100$	... 0.48

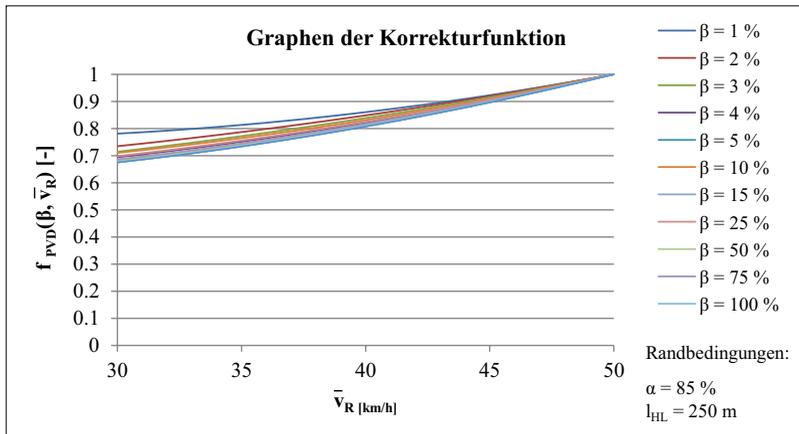


Abbildung J.5: Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 250\text{ m}$

β [%]	Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 250\text{ m}$	R^2
1	... $y(x) = 0,000302 \cdot (x - 50)^2 + 0,016996 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
2	... $y(x) = 0,000190 \cdot (x - 50)^2 + 0,017059 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
3	... $y(x) = 0,000186 \cdot (x - 50)^2 + 0,018012 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
4	... $y(x) = 0,000259 \cdot (x - 50)^2 + 0,020465 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
5	... $y(x) = 0,000300 \cdot (x - 50)^2 + 0,022246 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
10	... $y(x) = 0,000236 \cdot (x - 50)^2 + 0,019224 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
15	... $y(x) = 0,000267 \cdot (x - 50)^2 + 0,021070 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
25	... $y(x) = 0,000238 \cdot (x - 50)^2 + 0,019859 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
50	... $y(x) = 0,000273 \cdot (x - 50)^2 + 0,021421 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
75	... $y(x) = 0,000261 \cdot (x - 50)^2 + 0,020956 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
100	... $y(x) = 0,000277 \cdot (x - 50)^2 + 0,021784 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000

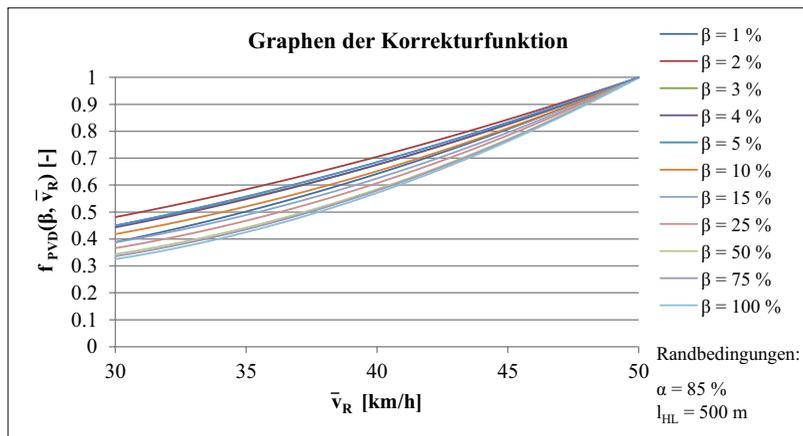


Abbildung J.6: Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 500\text{ m}$

β [%]	Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 500\text{ m}$	R^2
1	... $y(x) = 0,000522 \cdot (x - 50)^2 + 0,041030 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,997
2	... $y(x) = 0,000354 \cdot (x - 50)^2 + 0,033011 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,999
3	... $y(x) = 0,000490 \cdot (x - 50)^2 + 0,037319 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,998
4	... $y(x) = 0,000461 \cdot (x - 50)^2 + 0,037061 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,998
5	... $y(x) = 0,000393 \cdot (x - 50)^2 + 0,035386 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,998
10	... $y(x) = 0,000572 \cdot (x - 50)^2 + 0,040535 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,998
15	... $y(x) = 0,000686 \cdot (x - 50)^2 + 0,044363 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,997
25	... $y(x) = 0,000756 \cdot (x - 50)^2 + 0,046817 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,997
50	... $y(x) = 0,000872 \cdot (x - 50)^2 + 0,050254 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,996
75	... $y(x) = 0,000883 \cdot (x - 50)^2 + 0,050875 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,996
100	... $y(x) = 0,000915 \cdot (x - 50)^2 + 0,052040 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,996

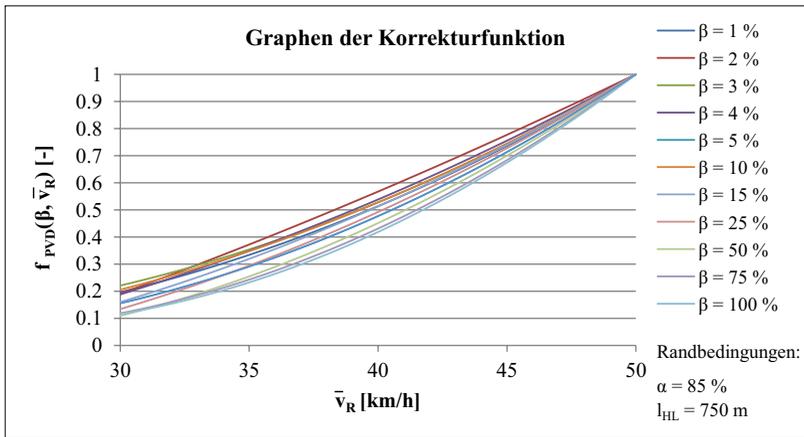


Abbildung J.7: Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 750\text{ m}$

β [%]	Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 750\text{ m}$	R^2
1	... $y(x) = 0,000848 \cdot (x - 50)^2 + 0,057118 \cdot (x - 50) + 1,00$...	0,998
2	... $y(x) = 0,000280 \cdot (x - 50)^2 + 0,046048 \cdot (x - 50) + 1,00$...	0,999
3	... $y(x) = 0,000825 \cdot (x - 50)^2 + 0,055448 \cdot (x - 50) + 1,00$...	0,998
4	... $y(x) = 0,000558 \cdot (x - 50)^2 + 0,051748 \cdot (x - 50) + 1,00$...	0,998
5	... $y(x) = 0,001008 \cdot (x - 50)^2 + 0,062384 \cdot (x - 50) + 1,00$...	0,998
10	... $y(x) = 0,000755 \cdot (x - 50)^2 + 0,054810 \cdot (x - 50) + 1,00$...	0,998
15	... $y(x) = 0,000673 \cdot (x - 50)^2 + 0,055468 \cdot (x - 50) + 1,00$...	0,998
25	... $y(x) = 0,000749 \cdot (x - 50)^2 + 0,058271 \cdot (x - 50) + 1,00$...	0,998
50	... $y(x) = 0,001033 \cdot (x - 50)^2 + 0,065197 \cdot (x - 50) + 1,00$...	0,998
75	... $y(x) = 0,001282 \cdot (x - 50)^2 + 0,069710 \cdot (x - 50) + 1,00$...	0,998
100	... $y(x) = 0,001396 \cdot (x - 50)^2 + 0,072108 \cdot (x - 50) + 1,00$...	0,998

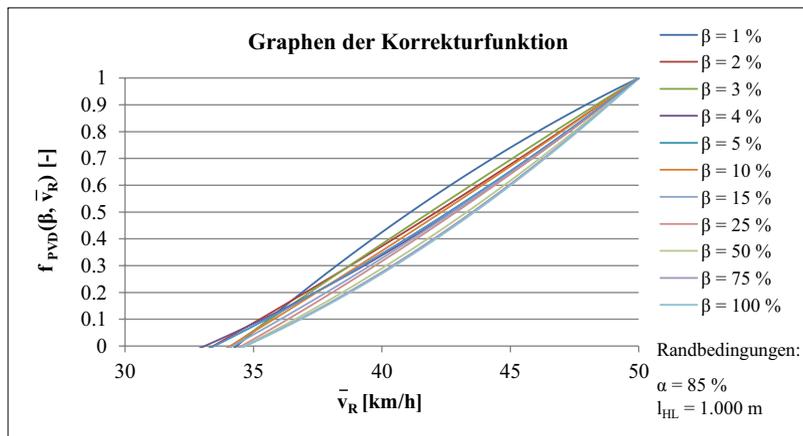


Abbildung J.8: Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 1000\text{ m}$

β [%]	Korrekturfunktionen für $\alpha = 85\%$ und $l_{HL} = 1000\text{ m}$	R^2
1	... $y(x) = -0,001118 \cdot (x - 50)^2 + 0,046352 \cdot (x - 50) + 1,0$	... 1,000
2	... $y(x) = 0,000364 \cdot (x - 50)^2 + 0,066363 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,997
3	... $y(x) = -0,000184 \cdot (x - 50)^2 + 0,060082 \cdot (x - 50) + 1,0$	... 0,999
4	... $y(x) = 0,001013 \cdot (x - 50)^2 + 0,076270 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,996
5	... $y(x) = 0,000779 \cdot (x - 50)^2 + 0,073360 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,997
10	... $y(x) = 0,000274 \cdot (x - 50)^2 + 0,067214 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,999
15	... $y(x) = 0,000689 \cdot (x - 50)^2 + 0,074136 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 0,999
25	... $y(x) = 0,000676 \cdot (x - 50)^2 + 0,075116 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
50	... $y(x) = 0,001110 \cdot (x - 50)^2 + 0,082122 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
75	... $y(x) = 0,001343 \cdot (x - 50)^2 + 0,085831 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000
100	... $y(x) = 0,001448 \cdot (x - 50)^2 + 0,087436 \cdot (x - 50) + 1,00$	... 1,000

Tabelle J.1: Häufigkeitsmatrix für den Vergleich der QSV-Abweichungen **vor** der Korrektur des Prozentwertes der Durchfahrten ohne Halt, $\alpha = 0,85$

QSV nach HBS-2001	Ermittlung über PVD (ausgestattete Fahrzeuge)						
	A	B	C	D	E	F	
Referenz- szenario (alle Fahrzeuge)	A	26	7	0	0	0	0
	B	41	24	10	2	0	0
	C	45	11	14	5	2	0
	D	22	5	9	7	0	1
	E	21	13	7	10	31	6
	F	32	63	36	24	60	346

Tabelle J.2: Häufigkeitsmatrix für den Vergleich der QSV-Abweichungen **nach** der Korrektur des Prozentwertes der Durchfahrten ohne Halt, $\alpha = 0,85$

QSV nach HBS-2001	Ermittlung über PVD (ausgestattete Fahrzeuge)						
	A	B	C	D	E	F	
Referenz- szenario (alle Fahrzeuge)	A	20	8	4	1	0	0
	B	16	17	23	16	3	2
	C	4	21	18	10	16	8
	D	0	1	11	10	9	13
	E	0	0	3	21	25	39
	F	0	0	0	1	73	487

Tabelle J.3: Häufigkeitsmatrix für den Vergleich der QSV-Abweichungen *vor* der Korrektur des Prozentwertes der Durchfahrten ohne Halt, $\alpha = 0,25$ und $\alpha = 0,50$

QSV nach HBS-2001		Ermittlung über PVD (ausgestattete Fahrzeuge)					
		A	B	C	D	E	F
Referenz- szenario (alle Fahrzeuge)	A	82	15	2	0	0	0
	B	137	52	18	8	3	2
	C	80	20	36	15	10	3
	D	44	3	6	20	15	0
	E	94	6	3	9	27	15
	F	312	80	63	40	92	445

Tabelle J.4: Häufigkeitsmatrix für den Vergleich der QSV-Abweichungen *nach* der Korrektur des Prozentwertes der Durchfahrten ohne Halt, $\alpha = 0,25$ und $\alpha = 0,50$

QSV nach HBS-2001		Ermittlung über PVD (ausgestattete Fahrzeuge)					
		A	B	C	D	E	F
Referenz- szenario (alle Fahrzeuge)	A	77	17	3	1	1	0
	B	77	34	58	23	20	8
	C	35	25	13	21	55	15
	D	9	18	8	3	17	33
	E	2	20	30	18	27	57
	F	5	16	35	49	156	771

ISBN 978-3-7376-0246-4



9 783737 602464 >