

Verkehrsqualität an verkehrsabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 289

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page, within a white vertical bar that runs along the right edge of the cover.

Verkehrsqualität an verkehrsabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen

von

Justin Geistefeldt
Stefan Giuliani

Ruhr Universität Bochum
Lehrstuhl für Verkehrswesen – Planung und Management

Michael Vieten
Silvia Dias Pais

IGS Ingenieurgesellschaft Stolz mbH,
Neuss

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 289

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt: FE 03.0495/2012/DGB:
Verkehrsqualität an verkehrsabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen

Fachbetreuung:
Kerstin Lemke

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-336-7

Bergisch Gladbach, November 2017

Kurzfassung – Abstract

Verkehrsqualität an verkehrsabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen

In der Untersuchung wurden Verfahren zur Schätzung der Wartezeiten an signalisierten Knotenpunkten mit unterschiedlichen Steuerungsverfahren auf der Grundlage umfangreicher empirischer Erhebungen und Simulationsuntersuchungen überprüft und für deutsche Verkehrsverhältnisse kalibriert. Die Analyse umfasste Knotenpunkte mit koordinierter Festzeitsteuerung sowie Einzelknotenpunkte mit verkehrsabhängiger Steuerung. Durch den Vergleich mit den Ergebnissen der empirischen Erhebungen und der Simulationsuntersuchungen wurde die Güte der Wartezeitermittlung mit den einzelnen Verfahren festgestellt und Möglichkeiten zur Kalibrierung überprüft. Die Betrachtung der Fehlermaße zeigte für alle Verfahren ähnliche Abweichungen zu den empirischen Verlustzeiten. Aus Gründen der einfacheren Handhabbarkeit werden die Verfahren nach HCM 2010 für Zufahrten an koordiniert gesteuerten Lichtsignalanlagen und nach HCM 2000 für verkehrsabhängig gesteuerte Lichtsignalanlagen für die Anwendung im deutschen Regelwerk vorgeschlagen. Die Parameterkalibrierung ergab für das Verfahren für verkehrsabhängig gesteuerte Lichtsignalanlagen eine Anpassung des Korrekturfaktors der Grundwartezeit. Das HCM-Verfahren für Zufahrten an koordiniert gesteuerten Lichtsignalanlagen, welches in dieser Form bereits im HBS 2015 enthalten ist, kann dagegen unverändert beibehalten werden. Die Verfahren wurden anhand von Simulationsmodellen aus Praxisbeispielen validiert. Die Ergebnisse der Validierung bestätigen die Praxistauglichkeit der Verfahren.

Traffic quality at traffic-actuated controlled and coordinated traffic signals

In the investigation, calculation procedures for estimating delays at signalized intersections with different control strategies were tested and calibrated for German traffic conditions based on comprehensive field measurements and simulation studies. The analysis covered coordinated intersections with fixed-time signal control as well as isolated intersections with traffic-actuated signal control. By comparing the model calculations with measured and simulated data, the performance of the delay estimation models was evaluated. All analyzed delay models delivered similar deviations to the empirical data. The calculation procedure of the HCM 2010 for approaches with coordinated traffic signals and the procedure of the HCM 2000 for traffic-actuated controlled traffic signals are recommended for application in the German guidelines as they are easy to handle. An additional parameter calibration delivered a modification of the adjustment factor in the procedure for estimating the uniform delay at traffic-actuated controlled traffic signals. For approaches with coordinated traffic signals, the HCM procedure, which was already incorporated in the HBS 2015 in the same form, can be maintained without any changes. The delay estimation procedures were validated using simulation models for a number of examples from traffic engineering practice. The results of the validation confirmed the suitability of the procedures for practical application.

Summary

Traffic quality at traffic-actuated controlled and coordinated traffic signals

1 Objective

The assessment of traffic quality at signalized intersections in Germany is conducted according to the Highway Capacity Manual HBS (FGSV, 2001, 2015). The delay (waiting time) is used as measure of effectiveness. The calculation procedures in the HBS are suitable for estimating the delay at fixed-time intersections designed according to the Guidelines for Traffic Signals RiLSA (FGSV, 2015). The HBS 2015 also includes a method for estimating the delay at coordinated traffic signals, which is based on the HCM 2010 (TRB, 2010), but not yet calibrated for German traffic conditions. Signalized intersections with traffic-actuated control, which are often used in practice, cannot be assessed with the HBS procedure so far. However, for both coordinated and traffic-actuated signal control, well-proven models for estimating delays are available in the international literature. The aim of this investigation was to analyze those delay models in light of their applicability for German traffic conditions and if necessary to further develop and calibrate the models for the national traffic assessment procedures.

2 Methodology

The analysis of delay estimation models was based on a comprehensive collection of field data. The sample sites included five arterial roads with coordinated fixed-time traffic signals, ten sections between adjacent coordinated signals, and ten isolated intersections with traffic-actuated controlled traffic signals.

Along the arterial roads, the delay and the number of stops were collected during 2 hour periods using GPS trackers. In addition, travel times between the first and the last intersection were measured for the coordinated vehicles. Travel times for all vehicles in sections between adjacent intersections were also measured. Each arterial road consisted of eight to ten intersections. The traffic signals on three of the

five arterial roads were connected to a central traffic control computer. All traffic volumes in the approaches at intersections could be displayed on the traffic computer. The traffic demands of the arterial roads with locally controlled traffic signals were obtained from measurements and from planning documents provided by the traffic authorities.

At the ten isolated intersections with traffic-actuated signal control, travel times for all movements were collected for periods between 4 and 10 hours. For estimating delays, the average signal times are required for the measurement periods. For this reason, the signal control protocols were analyzed, if available. In case of unavailable control protocols, video measurements were conducted. For all of the empirically analyzed intersections and arterial roads, microscopic simulation models were used in order to represent the intersections under investigation. If possible, existing simulation models from traffic signal companies were used for the analysis or suitable control data were acquired from the producer of the signal equipment. This ensured that real-world control algorithms could be used in the simulation models.

In a first step, the delay models were tested based on laboratory objects, which only consider the relevant influencing factors on traffic signal operation. Using these simulation results, the general suitability of the models for delay estimation was examined, because some of the models were only available as theoretical derivations up to now. Furthermore, the opportunities for model parameter calibration were tested.

The empirically estimated parameters and the results from the simulation studies were compared with the analytical models. First, the delays according to the HBS procedures for isolated intersections with fixed-time signal control were calculated for all objects under investigation. The delay for fixed-time control is the basis for the estimation of delays at both coordinated and traffic-actuated controlled traffic signals with correction factors.

Delays at coordinated traffic signals were estimated with the calculation procedure of the HBS 2015, which is equivalent to the procedure of the HCM 2010 and WU's (2014) delay model. The delays at intersections with traffic-actuated control were estimated using the calculation procedures of the HCM 2000 and the models from NEWELL (1969) and WU (2004).

The results of the analytical models were compared to the empirical delays in order to select a suitable calculation procedure and to determine potentials for model optimization. The performance of the models under consideration was estimated using suitable deviation measures. By minimizing the sum of square errors between measured and model delays, model parameters for delay estimation to be incorporated in the HBS were derived.

The selected and further developed delay estimation procedures were finally validated using additional simulation models representing real-world examples from the traffic engineering practice. Six arterial roads with fixed-time coordinated traffic signals and six isolated intersections with actuated control were used for the validation.

3 Results

The investigation indicated that the analyzed models and calculation procedures are principally suitable for the German traffic conditions. From the comparative analysis of the models for estimation delays at coordinated intersections, a clear recommendation for a certain model or procedure cannot be given. Compared to the procedures used in the HBS 2015, the model from WU (2014) delivers partially more accurate results, but is more complicated for practical application due to a larger number of model parameters.

Limitations of the applicability of the analyzed delay models were determined for cases with short intersection distances combined with high degrees of saturation in coordinated approaches. If the queue length in an approach at the end of the green time propagates beyond the upstream intersection, the delays could not properly be estimated for both intersections. Normally, the whole delays are assigned to the upstream approach. Furthermore, the uniform delay is underestimated using the HBS 2015 procedures in case of a high platoon ratio at well coordinated intersections. In this case, the uniform delay is equal to zero according to the HBS 2015 procedure because the platoon dispersion is not accounted for. In this case, WU's (2014) model delivered more accurate results.

For estimating delays at intersections with traffic-actuated control, the procedures in HCM 2000 are recommended. The parameter optimization delivered a modified parameter for correcting the

uniform delay under fixed-time conditions. The application of the analyzed models or procedures for estimation delays requires an accurate knowledge of the average signal times for the period of investigation. In the study, these signal times were obtained directly from the empirical datasets. In practice, however, this information is normally unavailable. However, it is possible to estimate those signal times using the models from AKCELIK (1994) and WU (2005).

For all delay models, deficiencies were determined with respect to delay estimations for un-served signals during a cycle. In this case, the uniform delay is already improperly estimated.

4 Conclusions

The investigation indicated that the calculation procedures from the HCM 2000 and 2010 for estimating delays at coordinated approaches and at intersections with traffic-actuated control can be adapted to German traffic conditions. Using comprehensive empirical measurements and simulation studies, the accuracy of different models and procedures for estimating delays was proven.

The HCM 2010 procedure for delay estimation at coordinated traffic signals was already incorporated in the HBS 2015 and can be retained without any changes. Due to the more precise delay estimation for well-coordinated traffic signals, WU's (2014) model could be considered for future developments of the procedure. This approach also allows considering the effects of signal coordination for several subsequent intersections.

For the delay estimation at single intersections with traffic-actuated control, a parameter adjustment for the HCM 2000 model is proposed. Through the incorporation of this approach in the HBS, the scope of application of the HBS assessment procedure for signalized intersections could be significantly enhanced.

Inhalt

| | | | | | |
|----------|--|----|----------|--|----|
| 1 | Einleitung | 9 | 4.3 | Wuppertal: Carnaper Straße/ Steinweg. | 40 |
| 2 | Stand der Technik | 9 | 4.3.1 | Beschreibung des Straßenzugs | 40 |
| 2.1 | Steuerungsverfahren von Lichtsignalanlagen | 9 | 4.3.2 | GPS-Befahrungen | 41 |
| 2.2 | Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität | 11 | 4.3.3 | Fahrtzeiterhebungen | 44 |
| 2.3 | Verkehrsqualität an Einzelknoten- punkten mit Festzeitsteuerung | 13 | 4.4 | Hamburg: Eiffestraße | 46 |
| 2.4 | Verkehrsqualität an koordiniert festzeitgesteuerten Knotenpunkten ... | 15 | 4.4.1 | Beschreibung des Straßenzugs | 46 |
| 2.5 | Verkehrsqualität an Einzelknoten- punkten mit verkehrsabhängiger Steuerung. | 23 | 4.4.2 | GPS-Befahrungen | 47 |
| 3 | Erhebungskonzept | 25 | 4.4.3 | Fahrtzeiterhebungen | 49 |
| 3.1 | Untersuchungskollektiv | 25 | 4.5 | Bochum: Königsallee | 50 |
| 3.1.1 | Straßenzüge mit koordiniert festzeitgesteuerten LSA | 25 | 4.5.1 | Beschreibung des Straßenzugs | 50 |
| 3.1.2 | Einzelknotenpunkte mit verkehrs- abhängiger LSA-Steuerung | 27 | 4.5.2 | GPS-Befahrungen | 51 |
| 3.2 | Erhebungsmethodik | 28 | 4.5.3 | Fahrtzeiterhebungen | 54 |
| 3.2.1 | GPS-gestützte Befahrungen | 28 | 4.6 | Weitere Einzelmessungen an koordiniert gesteuerten Knotenpunktzufahrten | 55 |
| 3.2.2 | Fahrtzeiterhebungen | 29 | 4.6.1 | Bochum: Herner Straße | 55 |
| 3.2.3 | Signaldaten von verkehrs- abhängigen LSA-Steuerungen | 29 | 4.6.2 | Bochum: Castroper Straße. | 56 |
| 4 | Messungen an Straßenzügen mit koordiniert festzeitgesteu- erten Knotenpunkten | 31 | 5 | Messungen an Einzelknoten- punkten mit verkehrs- abhängiger Steuerung | 57 |
| 4.1 | Bochum: Berliner Straße/Zepplindamm | 31 | 5.1 | Kassel: B 83/Nürnberger Straße | 57 |
| 4.1.1 | Beschreibung des Straßenzugs | 31 | 5.1.1 | Beschreibung des Knotenpunkts | 57 |
| 4.1.2 | GPS-Befahrungen | 33 | 5.1.2 | Messergebnisse | 58 |
| 4.1.3 | Fahrtzeiterhebungen | 35 | 5.2 | Bochum: Kirchharpener Straße/ Heinrichstraße | 59 |
| 4.2 | Lünen: Konrad-Adenauer-Straße/ Dortmunder Straße. | 36 | 5.2.1 | Beschreibung des Knotenpunkts | 59 |
| 4.2.1 | Beschreibung des Straßenzugs | 36 | 5.2.2 | Messergebnisse | 60 |
| 4.2.2 | GPS-Befahrungen | 38 | 5.3 | Bochum: Kirchharpener Straße/ Ecksee | 62 |
| 4.2.3 | Fahrtzeiterhebungen | 40 | 5.3.1 | Beschreibung des Knotenpunkts | 62 |
| | | | 5.3.2 | Messergebnisse | 62 |
| | | | 5.4 | Bochum: Bövinghauser Hellweg/ Dieselstraße | 64 |
| | | | 5.4.1 | Beschreibung des Knotenpunkts | 64 |
| | | | 5.4.2 | Messergebnisse | 64 |

| | | | | | |
|----------|---|-----------|-----------|---|------------|
| 5.5 | Karlsruhe: Haid-und-Neu-Straße/ Ostring | 66 | 7.3 | Vergleich der analytisch ermittelten Wartezeiten mit den Simulations- ergebnissen | 109 |
| 5.5.1 | Beschreibung des Knotenpunkts | 66 | 7.4 | Wahl geeigneter Wartezeitmodelle | 110 |
| 5.5.2 | Messergebnisse | 66 | 8 | Wartezeitmodelle für Einzel- knotenpunkte mit verkehrs- abhängiger Steuerung | 111 |
| 5.6 | Lünen: Kamener Straße/ Kreuzstraße | 68 | 8.1 | Methodik | 111 |
| 5.6.1 | Beschreibung des Knotenpunkts | 68 | 8.2 | Vergleich der analytisch ermittelten Wartezeiten mit den Messwerten | 111 |
| 5.6.2 | Messergebnisse | 68 | 8.3 | Vergleich der analytisch ermittelten Wartezeiten mit den Simulations- ergebnissen | 114 |
| 5.7 | Hennef: A 560/B 8 | 70 | 8.4 | Wahl geeigneter Wartezeitmodelle | 115 |
| 5.7.1 | Beschreibung des Knotenpunkts | 70 | 9 | Validierung und Überprüfung der Praxistauglichkeit des Verfahrens | 115 |
| 5.7.2 | Messergebnisse | 71 | 9.1 | Vorbemerkung | 115 |
| 5.8 | Hamm: Wittekindstraße/ Janssenstraße/Am Lausbach | 73 | 9.2 | Methodik | 116 |
| 5.8.1 | Beschreibung des Knotenpunkts | 73 | 9.3 | Zusammenfassende Beurteilung | 117 |
| 5.8.2 | Messergebnisse | 74 | 9.3.1 | Koordinierte Festzeitsteuerungen | 117 |
| 5.9 | Hattingen: Wuppertaler Straße/ Denkmalstraße/Rauendahlstraße | 76 | 9.3.2 | Verkehrsabhängig gesteuerte Einzelknotenpunkte | 118 |
| 5.9.1 | Beschreibung des Knotenpunkts | 76 | 10 | Zusammenfassung und Fazit | 118 |
| 5.9.2 | Messergebnisse | 77 | 11 | Literatur | 120 |
| 5.10 | Drensteinfurt: B 58/L 585 | 79 | | | |
| 5.10.1 | Beschreibung des Knotenpunkts | 79 | | | |
| 5.10.2 | Messergebnisse | 80 | | | |
| 6 | Mikroskopische Simulationen | 82 | | | |
| 6.1 | Simulationsuntersuchungen mit Laborobjekten | 82 | | | |
| 6.1.1 | Methodik | 82 | | | |
| 6.1.2 | Einzelknotenpunkte mit Festzeitsteuerung | 86 | | | |
| 6.1.3 | Verkehrsabhängige Steuerungen | 89 | | | |
| 6.1.4 | Koordinierte Festzeitsteuerungen | 90 | | | |
| 6.2 | Modelle realer Knotenpunkte | 91 | | | |
| 7 | Wartezeitmodelle für koordiniert festzeitgesteuerte Knotenpunkte | 92 | | | |
| 7.1 | Methodik | 92 | | | |
| 7.2 | Vergleich der analytisch ermittelten Wartezeiten mit den Messwerten | 94 | | | |
| 7.2.1 | Straßenzüge | 94 | | | |
| 7.2.2 | Abschnitte zwischen koordinierten LSA | 101 | | | |

Anhänge

Die Anhänge zum Bericht sind im elektronischen
BAST-Archiv ELBA unter:

<http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung

Grundlagen für die Planung und die verkehrstechnische Bemessung von Lichtsignalanlagen (LSA) in Deutschland sind die Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA; FGSV, 2015a) und das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS; FGSV, 2001, 2015b). Im HBS 2001 ist ein vollständiges Berechnungsverfahren zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Einzelknotenpunkten mit Festzeitsteuerung enthalten. Als Qualitätskriterium wird die Wartezeit verwendet. Zur Bewertung der Verkehrsqualität an Straßenzügen mit mehreren aufeinander folgenden koordinierten LSA wird das Koordinierungsmaß herangezogen. Das Koordinierungsmaß entspricht der Anzahl an Durchfahrten ohne Halt entlang eines Straßenzugs mit koordiniert gesteuerten LSA. Die Ermittlung erfolgt entweder empirisch oder mittels Simulationsstudien. Weitere Steuerungsverfahren fanden in den Richtlinien in Deutschland bislang keine Berücksichtigung.

Das HBS 2015 enthält erstmals eine Näherungslösung zur Ermittlung der Wartezeit an koordiniert gesteuerten Knotenpunktzufahrten. Das Verfahren wurde aus dem US-amerikanischen Highway Capacity Manual (HCM; TRB, 2010) übernommen. Der Ansatz nach HBS 2001 zur Bewertung der Verkehrsqualität mit dem Koordinierungsmaß wird im HBS 2015 nicht weiterverfolgt. Hintergrund ist zum einen der Wunsch nach der Verwendung eines einheitlichen Bewertungskriteriums für alle Anwendungsfälle und zum anderen die aufwendige Ermittlung des Koordinierungsmaßes. Verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerungen können mit dem HBS 2015 hingegen nicht behandelt werden. Für die Berechnung der Wartezeit an Einzelknotenpunkten mit verkehrsabhängiger Steuerung ist es notwendig, die Mittelwerte der Umlaufzeit und der Freigabezeiten zu ermitteln. Einschlägige Verfahren zur Schätzung der mittleren Umlaufzeit und der mittleren Freigabezeit sowie der resultierenden Wartezeiten unter Berücksichtigung einer verkehrsabhängigen Steuerung existieren bereits (vgl. NEWELL, 1969; AKÇELIK, 1994; WU, 2004). Eingangsgrößen für die Ermittlung der Wartezeiten sind neben den signaltechnischen Kenngrößen des Knotenpunkts die Kapazitäten der Zufahrten. Für das HBS 2015 wurde das Verfahren zur Ermittlung der Kapazität signalisierter Knotenpunktzufahrten überarbeitet und gegenüber dem HBS 2001 um einige Anwendungsfälle erweitert.

In den genannten Verfahren zur Ermittlung der Wartezeiten sowohl an Zufahrten von Knotenpunkten

mit koordinierten LSA als auch an Zufahrten mit verkehrsabhängig gesteuerten LSA bildet die Wartezeit für festzeitgesteuerte Einzelknotenpunkte den Ausgangspunkt. Diese wird mit unterschiedlichen Faktoren zur Berücksichtigung der Einflüsse der Steuerung auf den Zu- und Abfluss in den Zufahrten in Abhängigkeit von der Steuerungsart korrigiert. Die Verfahren zur Ermittlung dieser Faktoren wurden bislang noch nicht in Zusammenhang mit deutschen Verkehrsverhältnissen untersucht. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die im HBS 2015 bereits enthaltenen Bewertungsgrundlagen für koordinierte LSA für deutsche Verkehrsverhältnisse zu überprüfen und um bislang nicht berücksichtigte verkehrsabhängige Steuerungsverfahren zu erweitern. Hiermit wird eine einheitliche, praxiserprobte Beurteilung der Verkehrsqualität an signalisierten Knotenpunkten ermöglicht. Dazu wird die Verkehrsqualität für unterschiedliche Steuerungstypen analysiert und miteinander verglichen. Mittels theoretischer Analysen auf der Grundlage empirischer Daten, ergänzt durch mikroskopische Verkehrssimulationen, werden Verkehrszustände an Knotenpunkten mit LSA unter gängigen Steuerungsbedingungen im Modell nachgebildet und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Kapazität und die Verkehrsqualität analysiert. Im Ergebnis werden Empfehlungen für die Wartezeitermittlung an Knotenpunkten mit koordinierten und verkehrsabhängig gesteuerten LSA abgeleitet und zur Aufnahme in das HBS aufbereitet.

2 Stand der Technik

2.1 Steuerungsverfahren von Lichtsignalanlagen

Die RiLSA (FGSV, 2015a) kategorisieren die Betriebsformen von LSA nach der zeitlichen Auflösung der LSA-Schaltvorgänge in Abhängigkeit von dem erwarteten Verkehrsgeschehen. Die Steuerungsverfahren sind in fünf Kategorien eingeteilt: Von Steuerungsverfahren ohne bis zu Verfahren mit sehr hoher zeitlicher Auflösung der Anpassung von LSA-Schaltvorgängen in Abhängigkeit vom Verkehrsgeschehen. Die Verfahren werden auf dieser Grundlage zwei übergeordneten Ebenen zugeordnet. Die Verfahren unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der räumlichen Ausdehnung des Einsatzgebietes als auch in Bezug auf den zeitlichen Horizont der veränderbaren Steuerungselemente. Auf makroskopischer Ebene finden Anpassungen der

| | Steuerungsverfahren | | Ordnungszahl | Aktivierung | | Verkehrsabhängig veränderbare Elemente der Signalprogramme | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|--|--------------|--|------------------|---|-------------|--------------|--------------|-------------|
| | Oberbegriff | Hauptmerkmal der Veränderbarkeit der Signalprogramme | | zeitplanabhängig | verkehrsabhängig | Umlaufzeit | Phasenfolge | Phasenanzahl | Freigabezeit | Versatzzeit |
| A: Makroskopische Steuerungsebene | Signalprogramm-auswahl | zeitplanabhängige Auswahl der Signalprogramme | A1 | X | | In Kombination mit einem Steuerungsverfahren der Gruppe B veränderbare Elemente des Signalprogramms | | | | |
| | | verkehrsabhängige Auswahl der Signalprogramme | A2 | | X | | | | | |
| | Bildung Rahmen-signalprogramm | verkehrsabhängige Bildung der Rahmensignalprogramme | A3 | | X | | | | | |
| B: Mikroskopische Steuerungsebene | Festzeitsignalprogramm | | B1 | Aktivierung gemäß Steuerungsverfahren der Gruppe A | | | | | | |
| | Signalprogramm-anpassung | Freigabezeit-anpassung | B2 | | | | | X | | |
| | | Phasentausch | B3 | | | X | | | | |
| | | Phasen-anforderung | B4 | | | | X | X | | |
| | | Versatzzeit-anpassung | B5 | | | | | | X | |
| | Signalprogramm-bildung | freie Veränderbarkeit | B6 | | X | X | X | X | X | |

Tab. 2-1: Übersicht über die Steuerungsverfahren nach RiLSA (FGSV, 2015a)

LSA-Schaltvorgänge auf der Grundlage mittel- bis langfristiger Veränderungen des Verkehrsgeschehens statt. Die Verfahren werden sowohl an einzelnen isolierten Knotenpunkten als auch in Straßennetzen eingesetzt. Im Gegensatz dazu dienen die Verfahren der mikroskopischen Ebenen der kurzfristigen Anpassung einzelner Anlagen an das lokale Verkehrsgeschehen im direkten Umfeld der LSA. Die Verfahren der beiden Ebenen werden in der Regel miteinander kombiniert. Das Kategorisierungsschema der RiLSA ist Tabelle 2-1 dargestellt.

Makroskopische Ebene

Die Anpassungen der LSA-Steuerung können sowohl zeitorientiert als auch in Abhängigkeit von gemessenen Verkehrsstärken erfolgen. Für das Verfahren mit Signalprogrammauswahl werden bereits im Zuge der Planung alle für den Betrieb der LSA notwendigen Verkehrsdaten hinterlegt. Die Beobachtungen umfassen mindestens die Dauer der Spitzenverkehrszeit und maximal einen Zeitraum von einer Woche. Auf der Grundlage dieser Verkehrsdaten werden verschiedene Signalpro-

gramme für bestimmte Verkehrsszenarien entworfen. Die Schaltung der Signalprogramme erfolgt entweder durch einen Abgleich aktuell gemessener Verkehrsdaten mit den der Planung zugrunde gelegten Daten oder durch einen vorab auf der Grundlage der Planungsdaten definierten Zeitplan. Für den Abgleich der hinterlegten Verkehrsdaten mit aktuellen Werten sind Online-Informationen über das aktuelle Verkehrsgeschehen notwendig. Diese werden in der Regel über Induktivschleifen im Zulauf der LSA erhoben.

Das zweite Verfahren der makroskopischen Ebene ist aus den Entwicklungen der letzten Jahrzehnte hervorgegangen. Mithilfe von Prognosen und Berechnungen auf der Grundlage von Modellen werden Anpassungen an den Rahmensignalplänen der LSA-Steuerungen vorgenommen. Die Modelle basieren auf online erhobenen Verkehrsdaten. Das Einsatzgebiet beschränkt sich nicht auf einzelne Anlagen, sondern erstreckt sich in der Regel auf ganze Straßenzüge. Die Rahmenpläne werden üblicherweise in Intervallen von 5 bis 20 Minuten den prognostizierten Verkehrsstärken angepasst.

Voraussetzung für die Anwendung eines solchen Steuerungsverfahrens ist ein zentraler Verkehrsrechner und die echtzeitfähige Vernetzung der LSA.

Mikroskopische Ebene

Die mikroskopische Ebene umfasst mehrere Steuerungsverfahren, die sich hinsichtlich ihrer Anpassungsmöglichkeiten an kurzfristige Schwankungen des Verkehrsgeschehens abgrenzen. Die Festzeitsteuerung bietet keine dieser Möglichkeiten. Alle Elemente des Signalzeitenplans sind unveränderlich auf der Grundlage von Planungsverkehrsstärken festgelegt. Aufgrund der fehlenden lokalen Flexibilität der Festzeitsteuerung kommt dieses Verfahren bei Neuplanungen häufig nur noch als Ersatzprogramm für andere Verfahren zum Einsatz. Die Vorteile der Festzeitsteuerung gegenüber anderen Steuerungsverfahren liegen vor allem im geringen Planungs- und Instandhaltungsaufwand und der damit verbundenen Kostenersparnis. Daher bilden Festzeitprogramme die Grundlage für komplexere Steuerungsverfahren sowohl für Einzelanlagen als auch für Koordinierungen mehrerer LSA. Vielerorts werden Koordinierungen entlang von Straßenzügen mit Festzeitsteuerungen als sog. Grüne Wellen betrieben. Da Umlauf- und Freigabezeiten innerhalb des Programms unverändert bleiben, beruhen die Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten auf diesem Steuerungsverfahren. Durch die fehlende Flexibilität der Festzeitsteuerung können jedoch ungenutzte Freigabezeiten während eines Umlaufs nicht umverteilt werden. Dadurch entstehen unnötige Wartezeiten in Umläufen, die geringer ausgelastet sind als in der Planung des Signalprogramms angenommen.

Um auf kurzfristige Schwankungen im Verkehrsablauf reagieren zu können, wurden verschiedene Methoden zur Anpassung von Signalprogramm-elementen entwickelt. Voraussetzung dafür sind mithilfe von Detektoren ermittelte Echtzeit-Informationen über das Verkehrsgeschehen in den Zufahrten der Knotenpunkte. Die Anpassungsmöglichkeiten innerhalb der Signalprogramme reichen von einfachen Freigabezeitveränderungen innerhalb fester Umläufe bis hin zur freien Veränderbarkeit des gesamten Signalprogramms. Zur Einhaltung der sicherheitsrelevanten Zwischenzeiten werden Phasenübergänge vordefiniert und daraus in Abhängigkeit von Detektordaten Phasenabläufe mit flexibler Phasendauer gebildet. Durch die Veränderbarkeit der Signalprogramme können einzelne Verkehrsteilnehmer bevorzugt behandelt werden.

Vielerorts sind die Steuerungsverfahren Bestandteil von Maßnahmen zur Beschleunigung des ÖPNV. Die Umsetzung von verkehrsabhängigen Steuerungsprogrammen im Steuergerät wird durch die Vorgabe eines Regelkreislaufs gewährleistet, der sekundlich durchlaufen wird.

2.2 Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität

Das HBS (FGSV, 2001, 2015b) enthält ein vollständiges Berechnungsverfahren für Einzelknotenpunkte mit Festzeitsteuerung. Auch in anderen Ländern gibt es entsprechende Verfahren (z. B. FHWA, 1985; MILLER, 1968; TRB, 2000, 2010), die teilweise im HBS aufgegriffen wurden. Das HBS 2015 enthält ein Verfahren zur näherungsweise Bestimmung der Wartezeit an koordinierten Zufahrten von Knotenpunkten. Das Verfahren wurde aus dem HCM (TRB, 2010) übernommen. Bislang fehlt jedoch eine Anpassung der Verfahrensparameter an deutsche Verkehrsverhältnisse. Ein Verfahren für die Bestimmung der Wartezeit an Knotenpunkten mit verkehrsabhängig gesteuerten LSA ist im HBS 2015 nicht enthalten. Im HCM (TRB, 2010) wird ein solches Verfahren angegeben, hinsichtlich der Eignung des Verfahrens für deutsche Verkehrsverhältnisse liegen jedoch bislang keine Erkenntnisse vor. Ansätze zur Weiterentwicklung der Verfahren aus dem HCM hat WU für koordiniert festzeitgesteuerte LSA (WU, 2014) sowie für verkehrsabhängig gesteuerte LSA (WU, 2004) entwickelt.

Für die Planung und Bewertung von Knotenpunkten mit LSA wurden ausführliche Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse in die entsprechenden Richtlinien eingeflossen sind (STOFFERS, 1968; MÜLLER, 1969; ALLSOP, 1971; GLEUE, 1972; AKÇELIK, 1981; IMPROTA und CANTARELLA, 1984; BELL und BRETHERTON, 1986; ANON, 1988; BRILON et al., 1996; BRILON et al., 1997). Für die Berechnung von Wartezeiten existieren zahlreiche Rechenmodelle, die für unterschiedliche Randbedingungen hergeleitet wurden. Dabei wird meistens zwischen stationärem und instationärem Verkehr, freiem und gebundenem Zufluss, Festzeit- und verkehrsabhängiger Steuerung sowie einzeln und koordiniert gesteuerten Knotenpunkten unterschieden. Die Randbedingungen der einzelnen Steuerungsverfahren sind in Tabelle 2-2 dargestellt. Darin finden sich, grau hinterlegt, die für die vorliegende Untersuchung relevanten Bedingungen.

| | Eigenschaften des Zu- und Abflusses | Einzelknotenpunkte | | Koordiniert gesteuerte Knotenpunkte | |
|---------|-------------------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| | | Festzeitsteuerung | verkehrsabh. Steuerung | Festzeitsteuerung | verkehrsabh. Steuerung |
| Zufluss | Instationarität | Ja | Ja | Ja | Ja |
| | Kolonnenbildung | Nein | Nein | Ja | Ja |
| Abfluss | Instationarität | Nein | Ja | Nein | Ja |
| | Kolonnenbildung | Ja | Ja | Ja | Ja |

Tab. 2-2: Randbedingungen für die Anwendung von Warteschlangenmodellen zur Wartezeitermittlung an LSA-geregelten Knotenpunkten (grau hinterlegter Bereich: relevant für die vorliegende Untersuchung)

Für Einzelknotenpunkte mit Festzeitsteuerung unter stationärem Verkehr sind grundlegende Entwicklungen vor allem von WEBSTER (1958) und MILLER (1968) durchgeführt worden. Für Einzelknotenpunkte mit instationärem Verkehr sind u. a. die Arbeiten von AKÇELIK (1981), AKÇELIK und ROUPHAIL (1993), BRILON und WU (1990) sowie WU (1992, 1996) von Bedeutung.

Für die Berechnung der Wartezeit an Einzelknotenpunkten mit verkehrsabhängiger Steuerung ist es notwendig, die Mittelwerte der Umlaufzeit und der Freigabezeiten zu ermitteln. Es existieren einschlägige Verfahren zur Schätzung der mittleren Umlaufzeit und der mittleren Freigabezeit sowie der resultierenden Wartezeiten unter Berücksichtigung einer verkehrsabhängigen Steuerung (vgl. NEWELL, 1969; NEWELL und OSUNA, 1969; STAUNTON, 1976; COWAN, 1978; LIN et al., 1983; LUH und LEE, 1991; LIN, 1992; LI et al., 1994; AKÇELIK, 1994; AKÇELIK und CHUNG, 1995; COURAGE et al., 1996; WU, 2004).

Die Bewertung der Verkehrsqualität von verkehrsabhängigen, adaptiv gesteuerten LSA ist komplex, da unterschiedliche Steuerungsalgorithmen zu berücksichtigen sind, deren Wirkung auf die Wartezeiten über längere Betrachtungszeiträume nicht vorhersehbar ist. Zur Analyse der verkehrlichen Wirkungen adaptiver Steuerungen werden in der Regel Vorher/Nachher-Vergleiche durchgeführt, häufig auf der Grundlage von Verkehrssimulationen. Als Referenzfall dienen meist festzeitgesteuerte Koordinierungen. Hierzu sind viele Untersuchungen in der Literatur zu finden (vgl. GARTNER, 1982, 1985; VINCENT und PIERCE, 1988; BROOKES und BELL, 1991; BELL und BROOKES, 1993; FRIEDRICH, 2000; KELLER et al., 2001; BRAUN et al. 2008; BRILON et al., 2007; BOLTZE et al., 2011a; BRILON et al., 2013).

Eine gut koordinierte Steuerung mehrerer hintereinander liegender Knotenpunkte bewirkt, dass die

Summen der Wartezeiten und der Anzahl der Halte in den koordinierten Zufahrten minimiert werden. Die Güte einer Koordinierung hängt von den Gegebenheiten entlang des Straßenzuges und den Verkehrsbedingungen ab. Die Planung von koordinierten LSA ist eine komplexe Aufgabe mit vielen Ein- und Ausgangsparametern. Dabei spielen die Knotenpunktabstände, die Progressionsgeschwindigkeit, die Ein- und Abbiegebeziehungen sowie die Versatz- und Vorlaufzeiten eine Rolle. Viele Autoren haben sich mit der Planung der Koordinierung befasst (z. B. HILLIER und ROTHERY, 1967; ROBERTSON, 1969; VINCENT et al. 1980; COHEN, 1983; GARTNER et al., 1991; HUANG und HUANG, 2003). Die Bewertung der Verkehrsqualität von koordinierten LSA unterscheidet sich von der Bewertung isolierter LSA, da die Zuflüsse durch benachbarte LSA beeinflusst werden. Für die Berechnung der Wartezeit sind die Kolonnenbildung im Zufluss und die Ankunftszeit der Kolonnen innerhalb der Umlaufzeit zu berücksichtigen (vgl. Tabelle 2-2). Hierfür müssen vor allem die Gebundenheit des Zuflusses, die Ankunftszeit der Kolonne und die Kolonnenauflösung entlang des Straßenzugs betrachtet werden. Knotenpunkte mit koordinierter Signalsteuerung wurden u. a. in den Arbeiten von LIGHTHILL und WHITHAM (1957), ROBERTSON (1969), VINCENT et al. (1980), SKABARDONIS und MAY (1985), COURAGE et al. (1988), ROUPHAIL (1989), NEWELL (1990), OLSZEWSKI (1990), FAMBRO et al. (1991), TARKO et al. (1993), AKÇELIK und ROUPHAIL (1994), AKÇELIK (1995) und WU (2014) behandelt. Die Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität von koordinierten LSA können auch auf koordiniert gesteuerte Straßennetze erweitert werden (vgl. MILLER, 1965; ROBERTSON, 1969; HOLROYD und ROBERTSON, 1973; VINCENT et al., 1980).

Viele der o. g. Verfahren können miteinander kombiniert werden. Demnach können auch Verfahren für koordinierte verkehrsabhängige LSA-Steuerungen ausgearbeitet werden.

2.3 Verkehrsqualität an Einzelknotenpunkten mit Festzeitsteuerung

Die Bewertung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit LSA erfolgt in Deutschland nach dem HBS (FGSV, 2001, 2015b). Für Einzelknotenpunkte mit Festzeitsteuerung ist im HBS ein vollständiges Bewertungsverfahren enthalten. Die maßgebende Kenngröße für die Bewertung der Verkehrsqualität ist die Wartezeit. Im Kraftfahrzeugverkehr ist die Wartezeit nach FGSV (2012) definiert als der bis zum Verlassen der Knotenpunktzufahrt anfallende Anteil an der Verlustzeit bei der Durchfahrt eines Knotenpunkts, die im Vergleich zu einer Fahrt ohne jegliche Behinderung entsteht. Für die folgenden Erläuterungen des Verfahrens werden die Variablenbezeichnungen nach HBS 2015 verwendet.

Die Wartezeit setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen:

- Die Grundwartezeit $t_{W,G,j}$ ist die Wartezeit, die sich durch die Sperrung der Knotenpunktzufahrt durch die LSA ergibt.
- Die Reststauwartezeit $t_{W,R,j}$ ist die Wartezeit, die durch Fahrzeuge entsteht, die während einer Freigabezeit nicht abfließen konnten (Stau bei Grünende) und somit die Wartezeit für nachfolgend zufließende Fahrzeuge erhöhen.

Die mittlere Wartezeit eines Fahrzeugs $t_{W,j}$ berechnet sich bei Festzeitsteuerung nach HBS 2015 fahrestreifenbezogen nach Gleichung (2-1) in Verbindung mit Gleichung (2-2) und (2-3):

$$t_{W,j} = t_{W,G,j} + t_{W,R,j} \quad (2-1)$$

mit

$t_{W,j}$ mittlere Wartezeit eines Kraftfahrzeugs auf dem Fahrstreifen j [s/Kfz]

$t_{W,G,j}$ Grundwartezeit infolge des periodischen Wechsels zwischen Freigabezeit und Sperrzeit auf dem Fahrstreifen j [s/Kfz]

$t_{W,R,j}$ Wartezeit infolge des Rückstaus bei Freigabezeitende auf dem Fahrstreifen j [s/Kfz]

$$t_{W,G,j} = \frac{t_U \cdot (1 - f_{A,j})^2}{2 \cdot (1 - \min\{1; x_j\} \cdot f_{A,j})} \quad (2-2)$$

mit

t_U Umlaufzeit [s]

$f_{A,j}$ $t_{A,j}/t_U$ Abflusszeitanteil des Fahrstreifens j [-]

$t_{A,j}$ Abflusszeit des Fahrstreifens j [s]

x_j Auslastungsgrad des Fahrstreifens j [Kfz/h]

$$t_{W,R,j} = \frac{N_{GE,j} \cdot 3600}{C_{0,i,j}} \quad (2-3)$$

mit

$N_{GE,j}$ mittlerer Rückstau am Freigabezeitende für den betrachteten Zeitraum auf dem Fahrstreifen j [Kfz]

$C_{0,i,j}$ Kapazität des Verkehrsstroms i auf dem Fahrstreifen j bei unbehindertem Abfluss [Kfz/h]

Die Kapazität $C_{0,i,j}$ des Verkehrsstroms i auf dem Fahrstreifen j berechnet sich zu:

$$C_{0,i,j} = f_{A,i} \cdot q_{S,j} \quad (2-4)$$

mit

$f_{A,i}$ $t_{A,i}/t_U$ Abflusszeitanteil für den Verkehrsstrom i [-]

$q_{S,j}$ Sättigungsverkehrsstärke des Fahrstreifens j [Kfz/h]

Für den Fall, dass abbiegende Verkehrsströme bedingt verträglich geführt werden und damit kein unbehinderter Abfluss vorliegt, sieht das Berechnungsverfahren des HBS 2015 eine entsprechende Anpassung bei der Ermittlung der Kapazität des jeweiligen Verkehrsstroms vor.

Der Auslastungsgrad x_j für einen einzelnen Fahrstreifen j mit dem Verkehrsstrom i beträgt:

$$x_j = \frac{q_i}{C_i} \quad (2-5)$$

mit

q_i Verkehrsstärke des Verkehrsstroms i [Kfz/h]

C_i Kapazität des Verkehrsstroms i [Kfz/h]

Für den Fall, dass sich ein Verkehrsstrom auf mehrere Fahrstreifen verteilt oder mehrere Verkehrsströme gemeinsam auf einem Fahrstreifen (Mischfahrstreifen) geführt werden, stehen im HBS 2015 Gleichungen zur Berücksichtigung der jeweiligen Konstellation zur Verfügung.

Die Größe des zweiten Terms ($t_{W,R,j}$) in Gleichung (2-1) hängt wesentlich vom Stau, der am Ende der

Freigabezeit vorhanden ist, ab. Der Rückstau N_{GE} bei Freigabezeitende berechnet sich nach HBS 2015 zu:

$$N_{GE,j} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,58 \cdot T \cdot C_{0,i,j}}{4} \cdot \left[(f_{in,j} \cdot x_j - 1) + \sqrt{(f_{in,j} \cdot x_j - 1)^2 + \frac{4 \cdot f_{in,j} \cdot x_j}{0,58 \cdot T \cdot C_{0,i,j}}} \right] \\ \frac{T \cdot C_{0,i,j}}{4} \cdot \left[(x_j - 1) + \sqrt{(x_j - 1)^2 + \frac{4 \cdot x_j}{T \cdot C_{0,i,j}}} \right] \end{array} \right. \quad (2-6)$$

mit

$N_{GE,j}$ mittlere Rückstaulänge bei Freigabezeitende für den betrachteten Untersuchungszeitraum auf dem Fahrstreifen j [Kfz]

T Betrachtungszeitraum (in der Regel: T = 1 h) [h]

$C_{0,i,j}$ Kapazität des Verkehrsstroms i auf dem Fahrstreifen j bei unbehindertem Abfluss [Kfz/h]

$f_{in,j}$ Instationaritätsfaktor der Verkehrsstärke auf dem Fahrstreifen j [-]

x_j Auslastungsgrad des Fahrstreifens j [-]

Der Instationaritätsfaktor $f_{in,j}$ nach HBS 2015 ermöglicht die Berücksichtigung von Schwankungen der Verkehrsstärke im betrachteten Zeitraum T. Der Faktor wird nach folgender Gleichung bestimmt:

$$f_{in,j} = 1 + \frac{4 \cdot q_{15,j} - 1}{1,5 \cdot q_j} \quad (2-7)$$

mit

$f_{in,j}$ Instationaritätsfaktor der Verkehrsstärke auf dem Fahrstreifen j [-]

$q_{15,j}$ Verkehrsstärke im höchstbelasteten 15-Minuten-Intervall des betrachteten Zeitraums auf dem Fahrstreifen j [Kfz/h]

q_j Verkehrsstärke im betrachteten Zeitraum auf dem Fahrstreifen j [Kfz/h]

Für die fahrestreifenbezogene Berechnung der Wartezeit wird im HBS 2015 anstelle des Freigabezeitanteils f eines Umlaufs der Abflusszeitanteil

f_A verwendet. Damit werden Erkenntnisse von BOLTZE et al. (2011b) berücksichtigt. In der Untersuchung wurde anhand von Messungen festgestellt, dass die effektiv genutzte Freigabezeit länger als die signalisierte Freigabezeit ist und demnach auch die Kapazität höher als die nach HBS 2001 berechnete Kapazität ist. Die Abflusszeit wird im HBS 2015 aus der Freigabezeit mit einem Zeitzuschlag von einer Sekunde berechnet.

Die Kapazität $C_{0,i,j}$ eines Verkehrsstroms i nach Gleichung (2-4) ergibt sich bei unbehindertem Abfluss aus dem Produkt der Sättigungsverkehrsstärke $q_{S,j}$ und dem Freigabezeitanteil $f_{A,j}$ des Fahrstreifens j. Nicht an allen Knotenpunktzufahrten kann jedoch von einem unbehinderten Abfluss aus allen Fahrstreifen ausgegangen werden. Aus diesem Grund enthält das HBS 2015 verschiedene Verfahren zur Abminderung der Kapazität, z. B. für den Abfluss aus Linksabbiegestreifen, die zum Teil gesichert geführt werden.

Die Bestimmung der Sättigungsverkehrsstärke hat demnach einen entscheidenden Einfluss auf die Kapazität. Die Sättigungsverkehrsstärke ist eine fiktive Größe und entspricht der Anzahl der Fahrzeuge, die innerhalb einer Stunde bei ununterbrochener Freigabezeit die Haltlinie passieren und folglich in einer Stunde aus der betrachteten Zufahrt abfließen könnten. Die Bruttozeitlücke, die in einem gesättigten Verkehrsstrom zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen an der Haltlinie einer LSA gemessen werden kann, wird als Zeitbedarfswert bezeichnet. Für eine exakte Ermittlung der Sättigungsverkehrsstärke eines Fahrstreifens muss der Zeitbedarfswert bekannt sein. Dieser ist abhängig von den spezifischen Randbedingungen am Knotenpunkt. Dazu zählen:

- der Schwerverkehrsanteil,
- die Fahrstreifenbreite,
- die Fahrbahnlängsneigung und
- der Abbiegeradius.

Der Ausgangswert des Zeitbedarfswerts beträgt 1,8 s. Dieser Wert gilt unter Standardbedingungen bei unbehindertem Abfluss für Geradeausverkehr und reinen Pkw-Verkehr. Damit ergibt sich eine Sättigungsverkehrsstärke von 2.000 Pkw/h. Die Berücksichtigung von örtlichen Besonderheiten erfolgt vereinfachend über Anpassungsfaktoren. Je deutlicher die örtlichen Randbedingungen von den

Standardbedingungen abweichen, desto größer ist deren Einfluss auf den Zeitbedarfswert. Nach HBS 2015 werden höchstens drei Faktoren mit dem stärksten Einfluss auf den Zeitbedarfswert angesetzt. Aufgrund der Vielzahl möglicher Einflüsse in der Realität ist die exakte Ermittlung des Zeitbedarfs werts nur empirisch möglich.

Die Grenzwerte der Wartezeit zur Ermittlung der Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs im Individualverkehr nach HBS 2015 sind in Tabelle 2-3 enthalten.

Im Rahmen von Koordinierungen mehrerer LSA können die Ermittlung der Wartezeit und die Bewertung des Verkehrsablaufs der nicht koordinierten Zufahrten auf diese Weise erfolgen. Da das Verfahren für die Bestimmung der Reststauwartezeit $t_{w,R,j}$ zufällige Zuflüsse voraussetzt, kann das Verfahren nicht für koordinierte Zufahrten angewandt werden. Durch die Koordinierung sind die Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen in den Zuflüssen der LSA nicht mehr zufällig, sondern durch die Pulkbildung beeinflusst.

| QSV | Kfz-Verkehr | Fußgänger- und Radverkehr |
|-----|------------------------------|------------------------------------|
| | mittlere Wartezeit t_w [s] | maximale Wartezeit $t_{w,max}$ [s] |
| A | ≤ 20 | ≤ 30 |
| B | ≤ 35 | ≤ 40 |
| C | ≤ 50 | ≤ 55 |
| D | ≤ 70 | ≤ 70 |
| E | > 70 | ≤ 85 |
| F | $-^1$ | > 85 |

¹ Auslastungsgrad $x > 1$

Tab. 2-3: Grenzwerte für die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) nach HBS 2015 (FGSV, 2015b)

2.4 Verkehrsqualität an koordiniert festzeitgesteuerten Knotenpunkten

Die Bewertung der Verkehrsqualität von koordinierten Zufahrten erfolgt nach HBS 2001 (FGSV, 2001) über das Koordinierungsmaß auf der Grundlage der Anzahl der Durchfahrten ohne Halt. Über das Koordinierungsmaß kann auch die Qualität des Verkehrsablaufs über den gesamten Straßenzug ermittelt werden. Die dafür benötigte Anzahl der Halte lässt sich jedoch nur mit vergleichsweise hohem Aufwand durch Befahrungen des Straßenzugs feststellen. Die Grenzwerte für die Einstufung der Verkehrsqualität sind in Tabelle 2-4 angegeben.

Bei einer Koordinierung werden die Freigabezeiten hintereinanderliegender Knotenpunkte durch Zeitversätze aufeinander abgestimmt. Dadurch sollen die Verkehrsteilnehmer eine Folge von LSA ohne Halt passieren können. Eine Koordinierung hat das Ziel, die Fahrtzeiten der Verkehrsteilnehmer und damit den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen zu reduzieren. Die Anzahl der Halte hat dabei einen starken Einfluss auf die Fahrtzeit, den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen. Je geringer die Anzahl der Halte ist, desto geringer sind der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen.

Beim Entwurf von Grünen Wellen sind nach den RiLSA (FGSV, 2015a) folgende bauliche und verkehrstechnische Randbedingungen von Vorteil für die Qualität der Koordinierung:

- Mehr als ein Fahrstreifen für den durchgehenden Verkehr, um gegebenenfalls Radverkehr überholen zu können,
- Halteverbote, um haltende oder parkende Fahrzeuge zu vermeiden,

| QSV | Zulässige mittlere Wartezeit w [s] | | | | Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt [%] |
|-----|--------------------------------------|----------------|------------------|---|---|
| | Straßengebundener ÖPNV | Fahrradverkehr | Fußgängerverkehr | Kraftfahrzeugverkehr (nicht koordinierte Zufahrten) | Kraftfahrzeugverkehr (koordinierte Zufahrten) |
| A | ≤ 5 | ≤ 15 | ≤ 15 | ≤ 20 | ≥ 95 |
| B | ≤ 15 | ≤ 25 | ≤ 20 | ≤ 35 | ≥ 85 |
| C | ≤ 25 | ≤ 35 | ≤ 25 | ≤ 50 | ≥ 75 |
| D | ≤ 40 | ≤ 45 | ≤ 30 | ≤ 70 | ≥ 65 |
| E | ≤ 60 | ≤ 60 | ≤ 35 | ≤ 100 | ≥ 50 |
| F | > 60 | > 60 | > 35 | > 100 | < 50 |

Tab. 2-4: Grenzwerte für die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) nach HBS 2001 (FGSV, 2001)

- Abbiegestreifen, um durchgehenden Verkehr nicht zu behindern und Auffahrunfälle zu vermeiden,
- Unzulässigkeit von Fußgängerüberwegen,
- Entfernungen zwischen LSA bis zu 750 m, in besonderen Fällen auch bis zu 1.000 m, um weites Auflösen der Fahrzeugpulks zu vermeiden,
- gleiche Umlaufzeit an allen Knotenpunkten (Knotenpunkt mit größter Umlaufzeit maßgebend),
- Auslastungsgrad kleiner als 0,85 (ausreichende Kapazität an allen Knotenpunkten),
- Progressionsgeschwindigkeit zwischen 90 % und 100 % der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und
- Geschwindigkeitssignale bei Festzeitsteuerungen, um Durchfahrten ohne Halt zu erreichen.

Im HBS 2015 (FGSV, 2015b) wird ein Verfahren zur Bewertung von koordinierten Zufahrten in Anlehnung an das Verfahren aus dem HCM 2010 (TRB, 2010) angegeben. Als Bewertungsgröße wird darin ebenfalls die mittlere Wartezeit anstelle der Anzahl der Durchfahrten ohne Halt nach HBS 2001 verwendet. Die Ermittlung der Wartezeit unterscheidet sich dabei nicht grundlegend von der Berechnung der Wartezeit an festzeitgesteuerten Einzelknotenpunkten nach Gleichung (2-1). Die Effekte der Koordinierung auf den Verkehrsablauf werden durch die Progressionsfaktoren f_{k1} und f_{k2} berücksichtigt. Im HBS 2015 erfolgt die Ermittlung der Faktoren analog zum HCM 2010. In WU (2014) wird ein auf der Methodik nach HCM 2010 aufbauendes Verfahren beschrieben. In der vorliegenden Untersuchung werden beide Verfahren gegenübergestellt und auf deren Eignung für deutsche Verkehrsverhältnisse analysiert. Im Folgenden wird die Ermittlung der Progressionsfaktoren nach HCM 2010 sowie nach WU (2014) beschrieben. Dabei wird zunächst auf den Faktor f_{k2} eingegangen, da die Herleitung des Faktors f_{k1} darauf aufbaut.

Herleitung des Progressionsfaktors f_{k2} nach WU (2014)

Der Progressionsfaktor f_{k2} bildet den Einfluss einer stromaufwärts gelegenen LSA auf die Varianz der Fahrzeugankünfte am betrachteten Knotenpunkt ab. Das stromaufwärts gelegene Signal reduziert

die Streuung der Ankünfte und verringert dadurch die Wahrscheinlichkeit, dass die Kapazität eines Umlaufes temporär überschritten wird. Der Progressionsfaktor f_{k2} fließt in die Berechnung des mittleren Reststaus am Freigabezeitende ein:

$$N_{GE,k,j} = \max \left\{ \begin{aligned} & \frac{0,58 \cdot T \cdot C_{0,j}}{4} \cdot \left[(f_{in,j} \cdot x_j - 1) + \sqrt{\frac{(f_{in,j} \cdot x_j - 1)^2 + 4 \cdot f_{in,j} \cdot f_{k2,j} \cdot x_j}{0,58 \cdot T \cdot C_{0,j}}} \right] \\ & \frac{T \cdot C_{0,j}}{4} \cdot \left[(x_j - 1) + \sqrt{(x_j - 1)^2 + \frac{4 \cdot f_{k2,j} \cdot x_j}{T \cdot C_{0,j}}} \right] \end{aligned} \right. \quad (2-8)$$

mit

| | | |
|--------------|---|---------|
| $N_{GE,k,j}$ | mittlerer Rückstau bei Freigabezeitende für den betrachteten Untersuchungszeitraum auf dem Fahrstreifen j mit koordiniertem Verkehrsstrom | [Kfz] |
| T | Betrachtungszeitraum (in der Regel: T = 1 h) | [h] |
| $C_{0,j}$ | Kapazität des Fahrstreifens j mit koordiniertem Verkehrsstrom bei unbehindertem Abfluss | [Kfz/h] |
| $f_{in,j}$ | Instationaritätsfaktor der Verkehrsstärke auf dem Fahrstreifen j | [-] |
| x_j | Auslastungsgrad des Fahrstreifens j mit koordiniertem Verkehrsstrom | [-] |
| $f_{k2,j}$ | Progressionsfaktor zweiter Art des Fahrstreifens j | [-] |

Im HCM 2010 und im HBS 2015 wird der Progressionsfaktor $f_{k2,j}$ als Funktion in Abhängigkeit vom gewichteten Auslastungsgrad x_u an der stromaufwärts (mit Index u = upstream) gelegenen LSA angegeben:

$$f_{k2,j} = 1 - 0,91 \cdot x_u^{2,68} \geq 0,09 \quad (2-9)$$

mit

| | | |
|-------|--|-----|
| x_u | gewichteter Auslastungsgrad aller Zuflüsse von der stromaufwärts gelegenen LSA | [-] |
|-------|--|-----|

Anhand des Faktors $f_{k2,j}$ wird das Verhältnis der Wartezeit bei zufälligen Ankünften gegenüber der Wartezeit bei gepulkten Ankünften beschrieben. In WU (2014) wird eine Erweiterung des Verfahrens

aus dem HCM 2010 vorgeschlagen. In G/G/1-Warteschlangensystemen mit beliebiger Ankunftsverteilung und beliebiger Verteilung der Bedienzeit kann die Wartezeit eines Kunden innerhalb des Systems näherungsweise aus dem Quotient der Standardabweichung der Bedienzeit und der Zuflussverkehrsstärke ermittelt werden. Die mittlere Wartezeit eines G/G/1-Warteschlangensystems kann mit folgender Gleichung näherungsweise bestimmt werden:

$$w = \frac{L}{q} = b + k_{st} \cdot \frac{b \cdot x}{1-x} \quad (2-10)$$

Die Länge der Warteschlange wird ermittelt durch:

$$L = x + N = x + k_{st} \cdot \frac{x^2}{1-x} \quad (2-11)$$

mit

- L Gesamtlänge der Warteschlange inklusive der Kunden in Bedienung [Kfz]
- x Auslastungsgrad = $b \cdot q$ [-]
- N Anzahl der Fahrzeuge in der Warteschlange = $L - X$ [Kfz]
- k_{st} Zufälligkeitsfaktor des Warteschlangensystems (MARCHAL, 1974)

$$k_{st} \equiv q^2 \frac{1 + \frac{\sigma_b^2}{b^2}}{1 + \frac{x^2 \cdot \sigma_b^2}{b^2}} \cdot \left(\frac{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}{2} \right) \quad [-]$$

- q Ankunftsrate [Kfz/s]
- b Bedienzeit [s]
- σ_a^2 Varianz der Zeitlücken zwischen den Ankünften [s²]
- σ_b^2 Varianz der Bedienzeiten [s²]

An LSA kann die Bedienzeit b als Konstante mit einer Standardabweichung $\sigma_b = 0$ angenommen werden. Der Erwartungswert der Wartezeit hängt innerhalb des Warteschlangensystems somit nur noch von der (unbekannten) Ankunftsverteilung ab:

$$k_{st} \equiv \frac{q^2}{2} \cdot \sigma_a^2 \quad (2-12)$$

Da die Ankunftszeitlücken innerhalb von Pulks größtenteils als konstant angenommen werden können, tragen lediglich die nicht gepulkten Anteile

von Fahrzeugankünften am betrachteten Knotenpunkt zur Varianz der Zeitlücken der Ankünfte bei. Das Verhältnis I^* zwischen dem Zufälligkeitsfaktor eines Warteschlangensystems mit zufälligen Ankünften und dem Zufälligkeitsfaktor eines Warteschlangensystems mit gepulkten (konstanten) Ankünften kann nach WU (2014) wie folgt ausgedrückt werden:

$$I^* = \frac{k_{st,Pulk}}{k_{st,frei}} = \frac{q_{Pulk}^2 \cdot \frac{\sigma_a^2}{2}}{q_{frei}^2 \cdot \frac{\sigma_a^2}{2}} = \frac{q_{Pulk}^2 \cdot \frac{\sigma_a^2}{2}}{q_{frei}^2 \cdot \frac{\sigma_a^2}{2}} = \frac{q_{Pulk}^2}{q_{frei}^2} = \left(1 - \frac{q_{pl}}{q}\right)^2 = (1 - P_{pl})^2 \quad (2-13)$$

mit

- I^* Verhältnis zwischen dem Zufälligkeitsfaktor eines Warteschlangensystems mit zufälligen Ankünften und dem Zufälligkeitsfaktor eines Warteschlangensystems mit gepulkten (konstanten) Ankünften [-]
- P_{pl} Anteil der Fahrzeuge in Kolonne [-]

Das Verhältnis I^* ist nach Gleichung (2-13) nur noch vom Anteil P_{pl} der in Kolonne eintreffenden Fahrzeuge am Gesamtverkehr abhängig.

Der Anteil der frei am Knotenpunkt (zufällig) eintreffenden Fahrzeuge ergibt sich zu:

$$P_{frei} = 1 - P_{pl} \quad (2-14)$$

Diese freien Anteile der Ankunftsverteilung setzen sich aus den Ankünften der einbiegenden Verkehrsströme $q_{ein,1}$ und $q_{ein,2}$ gemäß der Prinzipskizze in Bild 2-1 sowie dem Teil des koordinierten Verkehrsstroms, der nicht mit Sättigungsverkehrsstärke während der Abflusszeit t_A abfließt ($q_g - q_{pl}$), zusammen. In Bild 2-1 ist der Kolonnenanteil P_{pl} im Zufluss des betrachteten Knotenpunkts KP2 grafisch dargestellt. Der koordinierte Verkehrsstrom q_g (rot schraffiert) fährt am Knotenpunkt KP1 in die Koordination ein und erreicht den Knotenpunkt KP2 zum Zeitpunkt t_a . Der Zeitpunkt t_a entspricht dem Eintreffenszeitpunkt des koordinierten Verkehrsstroms am untersuchten Knotenpunkt KP2. Im Beispiel in Bild 2-1 fällt der Zeitpunkt auf den Grünbeginn am Knotenpunkt KP2. Die einbiegenden Verkehrsströme $q_{ein,1}$ und $q_{ein,2}$ erreichen den Knotenpunkt KP2 vorher bzw. danach. Der koordinierte Verkehrsstrom trifft somit auf bereits wartende Fahrzeuge am Kno-

tenpunkt KP2. Der Faktor P_{pl} am Knotenpunkt KP1 entspricht dem Verhältnis der Verkehrsstärke von q_{pl} zur Summe der einfahrenden Fahrzeuge $q_{ein,1}$ und $q_{ein,2}$ und der Differenz von q_g und q_{pl} in Abhängigkeit von der zeitlichen Verteilung der Ankünfte innerhalb der Umlaufzeit t_U :

$$P_{pl,KP1} = \frac{q_{pl} \cdot t_{A,KP1}}{(q_g - q_{pl} + q_{ein,1} + q_{ein,2}) \cdot (t_U - t_{A,KP1})} \quad (2-15)$$

Der Faktor $f_{k2,j}$ kann auch als das Verhältnis zwischen der Staulänge des Pulkanteils und der Staulänge der freien Anteile oder als das Verhältnis der Wartezeiten beider Anteile zueinander angegeben werden. Die Gesamtlänge L der Warteschlange kann nach WU (2014) anhand der Gleichung (2-11) durch die Summe der Anzahl der Fahrzeuge N in der Warteschlange und dem Auslastungsgrad ausgedrückt werden:

$$f_{k2} = \frac{L_{pulk}}{L_{frei}} = \frac{w_{pulk}}{w_{frei}} = \frac{l \cdot N_{frei} + X_d}{N_{frei} + X_d} = \frac{(1 - P_{u,pl})^2 \cdot N_{frei} + X_d}{N_{frei} + X_d} \quad (2-16)$$

mit

- $P_{u,pl}$ Anteil der Fahrzeuge am Knotenpunkt stromaufwärts, die in Kolonne auf dem Fahrstreifen j am betrachteten Knotenpunkt eintreffen [-]
- X_d Auslastungsgrad des koordinierten Verkehrsstroms am betrachteten Knotenpunkt [-]

Der Anteil $P_{u,pl,i}$ (am Knotenpunkt KP1 in Bild 2-2) kann aber auch als das Verhältnis der mit der Sättigungsverkehrsstärke abfließenden Fahrzeuge zur gesamten Verkehrsstärke der am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt einfahrenden Verkehrsströme betrachtet werden. Daraus ergibt sich die folgende Gleichung:

$$P_{u,pl} = \frac{1 - f_u}{1 - f_u \cdot X_u} \quad (2-17)$$

mit

- f_u Abflusszeitanteil des koordinierten Verkehrsstroms an der stromaufwärts gelegenen LSA [-]

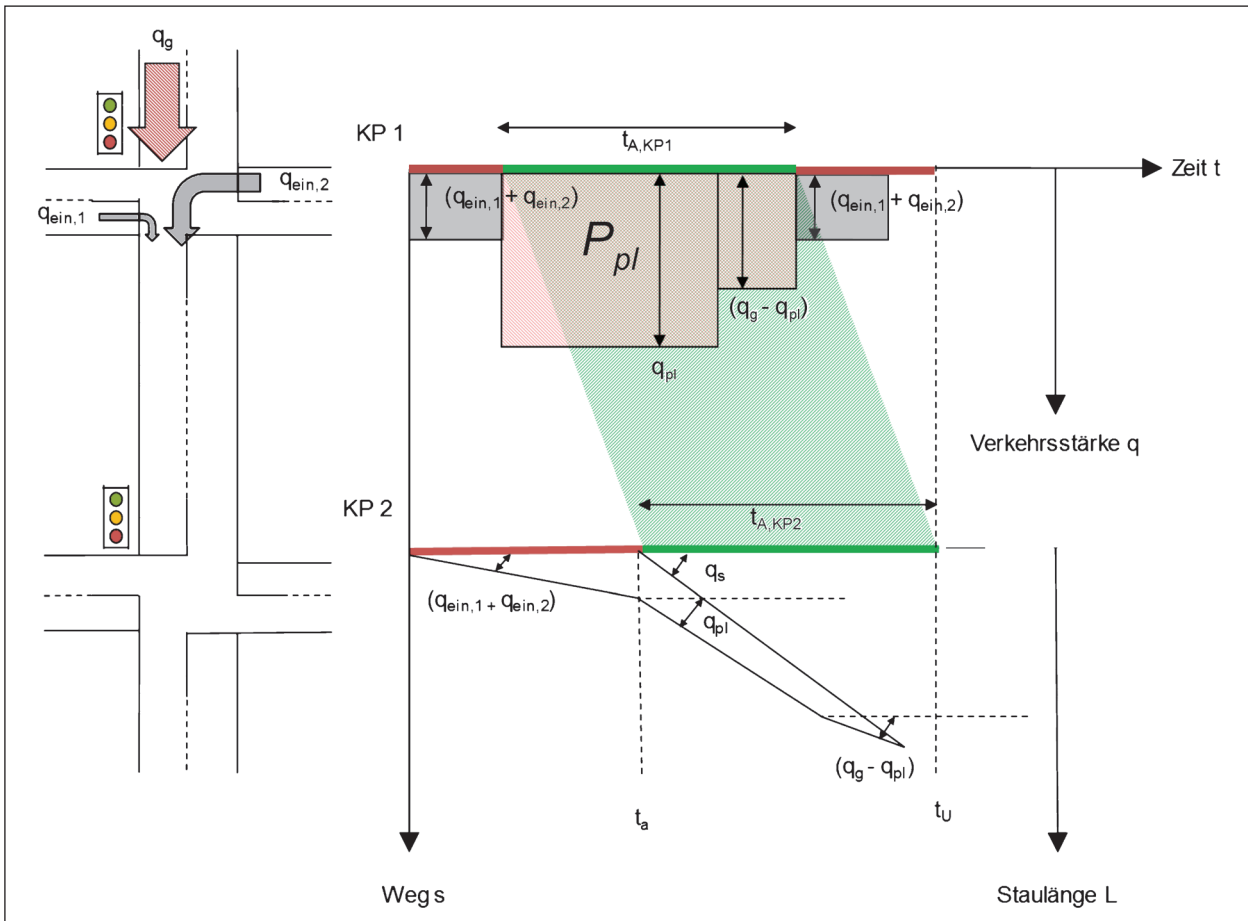


Bild 2-1: Prinzipische Skizze zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung nach WU (2014)

X_u Auslastungsgrad des koordinierten Verkehrstroms am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt [-]

Für den Fall mit $n = 1$ vorgeschalteten koordinierten LSA und unter der Annahme, dass für die Rechtsabbieger der koordinierten Hauptrichtung ein eigener Fahrstreifen zur Verfügung steht, ergibt sich der Anteil der nicht gepulkt eintreffender Fahrzeuge aus der Gleichung (2-14) in Verbindung mit der Gleichung (2-17) zu:

$$P_{u, frei} = 1 - \frac{1 - f_u}{1 - f_u \cdot X_u} = \frac{f_u \cdot (1 - X_u)}{1 - f_u \cdot X_u} \quad (2-18)$$

Werden alle einbiegenden Verkehrsströme q_{ein} als freie Anteile am Gesamtverkehr betrachtet, wie dies für in Deutschland übliche Hauptverkehrsstraßen der Fall ist, können diese zum Anteil der nicht gepulkt am betrachteten Knotenpunkt eintreffenden Fahrzeuge des koordinierten Verkehrstroms addiert werden. Dementsprechend wird $P_{u, frei}$ wie folgt berechnet:

$$P_{u, frei} = \frac{q_u \cdot \frac{f_u \cdot (1 - X_u)}{1 - X_u \cdot f_u} + q_{ein}}{q_u + q_{ein}} \quad (2-19)$$

mit

q_{ein} Verkehrsstärke der aus der Nebenrichtung einbiegenden Verkehrsströme am stromaufwärts des betrachteten Knotenpunkts gelegenen Knotenpunkt [Kfz/h]

Werden in Gleichung (2-19) alle Verkehrsstärken q als Verhältnisse zum koordinierten Verkehrstrom q_u ausgedrückt, kann die Gleichung wie folgt erweitert werden:

$$P_{u, frei} = \frac{\frac{f_u \cdot (1 - X_u)}{1 - X_u \cdot f_u} + \frac{q_{ein}}{q_u}}{1 + \frac{q_{ein}}{q_u}} = \frac{\frac{f_u \cdot (1 - X_u)}{1 - X_u \cdot f_u} + Q_{ein}}{1 + Q_{ein}} = \sqrt{I^*} \quad (2-20)$$

Damit ist der Anteil der gepulkten Fahrzeuge am betrachteten Knotenpunkt $P_{u, pl}$ durch Einsetzen von Gleichung (2-20) in Gleichung (2-14):

$$P_{u, pl} = 1 - P_{u, frei} = 1 - \frac{\frac{f_u \cdot (1 - X_u)}{1 - X_u \cdot f_u} + Q_{ein}}{1 + Q_{ein}} = \frac{1 - \frac{f_u \cdot (1 - X_u)}{1 - X_u \cdot f_u}}{1 + Q_{ein}} = \frac{1 - f_u}{1 + Q_{ein}} \quad (2-21)$$

Der Progressionsfaktor f_{k2} aus Gleichung (2-16) ergibt sich nach WU (2014) daraus folgend durch Einsetzen der Gleichung (2-21):

$$f_{k2} = \frac{I^* \cdot N_{frei} + X_d}{N_{frei} + X_d} = \frac{\left(1 - \frac{1 - f_u}{(1 - X_u \cdot f_u) \cdot (1 + Q_{ein})}\right)^2 \cdot N_{frei} + X_d}{N_{frei} + X_d} \quad (2-22)$$

mit

$$N_{frei} = \frac{X_d^2}{2 \cdot (1 - X_d)} \quad (2-23)$$

Rückstaulänge näherungsweise nach dem M/D/1-Warteschlangensystem [-]

f_u Abflusszeitanteil des koordinierten Verkehrstroms am stromaufwärts des betrachteten Knotenpunkts gelegenen Knotenpunkt [-]

X_u gewichteter Auslastungsgrad aller Zuflüsse an der stromaufwärts gelegenen LSA [-]

Q_{ein} Verhältnis der aus der Nebenrichtung einbiegenden Fahrzeuge zu den aus der koordinierten Hauptrichtung des stromaufwärts gelegenen Knotenpunkts am betrachteten Knotenpunkt ankommenden Fahrzeuge [-]

X_d Auslastungsgrad des koordinierten Verkehrstroms an der betrachteten LSA [-]

In Bild 2-2 ist der Verlauf von f_{k2} für drei unterschiedliche Verhältnisse Q_{ein} in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad des stromaufwärts gelegenen Knotenpunkts dargestellt. In den Grafiken ist jeweils auch der Faktor nach HCM 2010 ohne die Berücksichtigung des Freigabezeitanteils f_u des koordinierten Verkehrstroms am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt sowie der einbiegenden Verkehrsströme q_{ein} am selben Knotenpunkt (vgl. Gleichung (2-9)) angegeben. Die Verläufe zeigen, dass die zusätzliche Betrachtung von f_u und q_{ein} einen deutlichen Einfluss auf den Progressionsfaktor f_{k2} und demnach auch auf die Wartezeit in Koordinierungen hat. Die Ermittlung nach HCM 2010 ergibt in etwa einen Mittelwert über die Freigabezeitanteile f_u .

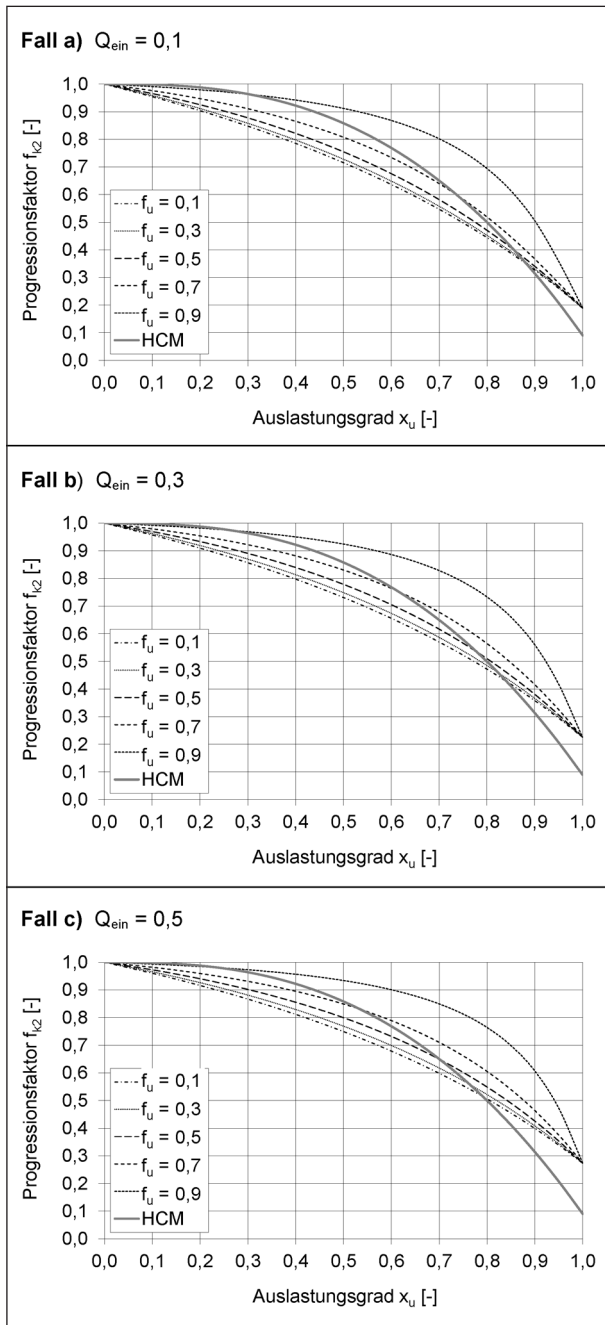


Bild 2-2: Verlauf des Progressionsfaktors f_{k2} in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad eines stromaufwärts gelegenen koordinierten Verkehrsstroms mit Berücksichtigung dessen Abflusszeitanteils f_u sowie der einbiegenden Verkehrsströme q_{ein} für unterschiedliche Verhältnisse $Q_{ein} = q_{ein}/q_u$ (WU, 2014)

Herleitung des Progressionsfaktors f_{k1} nach WU (2014)

Mit dem Progressionsfaktor f_{k1} wird der Verringerung der Grundwartezeit eines betrachteten Verkehrsstroms durch die Qualität der Koordinierung der Signale Rechnung getragen. Die Grundwarte-

zeit für koordinierte Verkehrsströme wird wie folgt berechnet:

$$t_{W,G,j} = f_{k1,j} \cdot \frac{t_U \cdot (1 - f_{A,j})^2}{2 \cdot \left(1 - \frac{q_j}{q_{s,j}}\right)} \tag{2-24}$$

mit

$t_{W,G,j}$ Grundwartezeit infolge des periodischen Wechsels zwischen Freigabezeit und Sperrzeit auf dem Fahrstreifen j [s]

$f_{k1,j}$ Progressionsfaktor zur Berücksichtigung der Ganglinie des Zuflusses innerhalb eines Umlaufs [-]

t_U Umlaufzeit [s]

$f_{A,j}$ $t_{A,j}/t_U$ Abflusszeitanteil [-]

$t_{A,j}$ Abflusszeit des Fahrstreifens j [s]

q_j Verkehrsstärke auf dem Fahrstreifen j [Kfz/h]

$q_{s,j}$ Sättigungsverkehrsstärke des Fahrstreifens j [Kfz/h]

Der Progressionsfaktor $f_{k1,j}$ ist eine Funktion in Abhängigkeit von dem Anteil der Fahrzeuge an der Gesamtbelastung, die auf dem betrachteten Fahrstreifen in einer Kolonne eintreffen, dem Zeitpunkt des Eintreffens dieser Kolonne innerhalb eines Umlaufs sowie dem Abflusszeitanteil des betrachteten Fahrstreifens:

$$f_{k1,j} = \frac{1 - P_j}{1 - f_{A,j}} \tag{2-25}$$

mit

$$P_j = \min(R_{p,j} \cdot f_{A,j}; 1) \tag{2-26}$$

Anteil der Fahrzeuge auf dem Fahrstreifen j, die den Knotenpunkt ohne Halt passieren können [s]

$f_{A,j}$ Abflusszeitanteil des Fahrstreifens j [-]

$R_{p,j}$ Parameter zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung (abhängig von der Ankunftszeit der Kolonne innerhalb der Umlaufzeit und vom Anteil der Fahrzeuge in Kolonne) [s]

Der Abflusszeitanteil kann analytisch bestimmt werden. Zur Ermittlung des Anteils der Fahrzeuge

auf dem Fahrstreifen j, die den Knotenpunkt ohne Halt passieren können (Parameter P in Gleichung (2-25)), muss zunächst der Parameter R_p bestimmt werden. Der Parameter dient der Berücksichtigung der Kolonnenbildung und ist abhängig von der Ankunftszeit der Kolonne innerhalb der Umlaufzeit und vom Anteil der Fahrzeuge in Kolonne. Das HCM 2010 sieht eine tabellarische Bestimmung durch unterschiedliche Anknunftstypen vor. Die Anknunftstypen unterscheiden sich durch mögliche Anknunftzeitpunkte der Fahrzeugpulk innerhalb der Umlaufzeit sowie dem Anteil der Fahrzeuge in Kolonnenfahrt an der gesamten Verkehrsstärke des koordinierten Verkehrsstroms. Das HCM 2010 unterscheidet sechs dieser Anknunftstypen. Eine gute Koordinierungsqualität mit einem Kolonnenanteil von mehr als 80 % des Verkehrsstroms, der am Beginn der Freigabezeit am untersuchten Knotenpunkt eintrifft, ergibt einen maximalen Wert von 2,0 für R_p . Eine unvorteilhafte Koordinierung bei einem Kolonnenanteil von mehr als 80 % und einer Ankunftszeit zum Beginn der Sperrzeit am untersuchten Knotenpunkt ergibt einen Wert von $R_p = 0,0$.

Der Parameter R_p in Gleichung (2-26) zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung in Koordinierungen wird nach HBS 2015 mithilfe von Tabelle 2-5 bestimmt. Die Tabelle enthält die Werte des HCM 2010 ergänzt um weitere Zwischenwerte, die eine exaktere Bestimmung von R_p erlauben.

Der Ankunftszeitpunkt t_a kann aus der grafischen Darstellung der Koordinierung im Zeit-Weg-Diagramm abgelesen werden. Der Anteil der Fahrzeuge, die in Kolonne am Knotenpunkt eintreffen, ist jedoch schwieriger festzustellen. Näherungsweise wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge, die aus der koordinierten Zufahrt am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt am betrachteten Knotenpunkt ankommen, als Kolonnenanteil am Gesamtverkehr gelten. Das Verfahren berücksichtigt jedoch nur den Einfluss des Kolonnenanteils auf

die Wartezeit. Die am Knotenpunkt stromaufwärts des untersuchten Knotenpunkts einbiegenden Verkehrsströme werden in diesem Verfahren nicht berücksichtigt.

Eine analytische Schätzung des Parameters R_p mit Berücksichtigung aller am Knotenpunkt auf dem untersuchten Fahrstreifen eintreffenden Verkehrsströme ist durch die Erweiterung des Verfahrens nach WU (2014) möglich. Analog zum Faktor f_{k2} kann auch der Faktor f_{k1} als Verhältnis der Wartezeit an festzeitgesteuerten LSA mit Ankünften von Fahrzeugkolonnen zur Wartezeit an Einzelknotenpunkten mit einer zufälligen Ankunftszeitverteilung aufgefasst werden. Der Anteil der Fahrzeuge in Kolonne P_{pl} wird nach WU (2014) mit Gleichung (2-27) ermittelt. Dieser Wert entspricht dem Faktor I^* in Gleichung (2-21). Die Berücksichtigung der Verkehrsströme der Nebenrichtungen erfolgt über das Verhältnis Q_{ein} der Einbieger zum koordinierten Verkehrsstrom am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt.

$$P_{pl} = \frac{1 - f_u}{(1 - x_u \cdot f_u) \cdot (1 + Q_{ein})} \quad (2-27)$$

mit

f_u Abflusszeitanteil des koordinierten Verkehrsstroms am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt [-]

x_u Auslastungsgrad des koordinierten Verkehrsstroms am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt [-]

$Q_{ein} = \frac{q_{ein}}{q_u}$
Verhältnis der aus der Nebenrichtung einbiegenden Fahrzeuge zu den aus der koordinierten Hauptrichtung des stromaufwärts gelegenen Knotenpunkts am betrachteten Knotenpunkt ankommenden Fahrzeuge [-]

| Ankunftszeitpunkt t_a der Kolonne innerhalb der Umlaufzeit | Anteil der Fahrzeuge in Kolonne P_{pl} | | | |
|--|--|------|------|-------|
| | 40 % | 60 % | 80 % | 100 % |
| Beginn der Sperrzeit | 1,00 | 0,83 | 0,33 | 0,00 |
| Mitte der Sperrzeit | 1,00 | 0,67 | 0,92 | 1,00 |
| Beginn der Freigabezeit | 1,00 | 1,17 | 1,67 | 2,00 |
| Mitte der Freigabezeit | 1,00 | 1,33 | 1,08 | 1,00 |

Tab. 2-5: Parameter R_p zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung nach HBS 2015 (FGSV, 2015b)

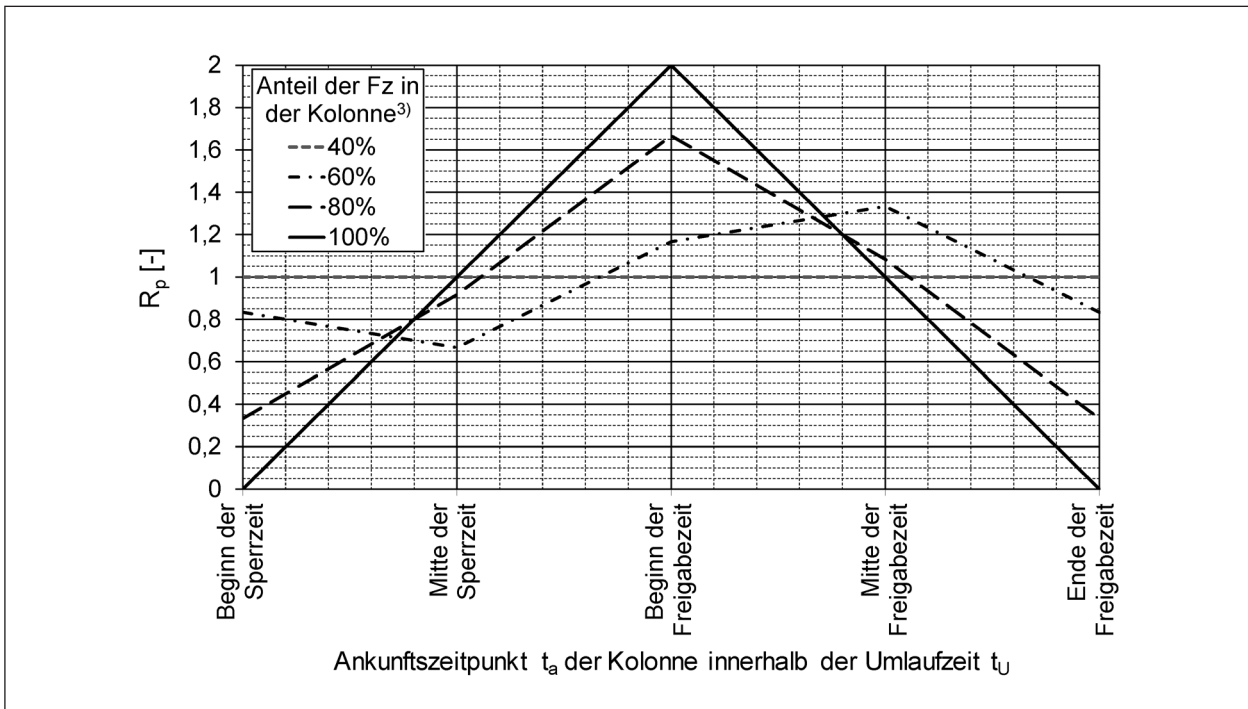


Bild 2-3: Grafische Ermittlung des Parameters R_p in Abhängigkeit vom Anteil der in Kolonne am Knotenpunkt auf dem betrachteten Fahrstreifen eintreffenden Fahrzeuge P_{pi} (Gleichung (2-27)) nach WU (2014)

| | | | | | |
|-----------|---|---------|-------|---|-----|
| q_{ein} | Verkehrsstärke der aus der Nebenrichtung einbiegenden Verkehrsströme am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt | [Kfz/h] | t_a | Ankunftszeit der Kolonne innerhalb der Umlaufzeit | [s] |
| | | | t_u | Umlaufzeit | [s] |

q_u Verkehrsstärke des aus der koordinierten Hauptrichtung ankommenden Verkehrsstroms des stromaufwärts gelegenen Knotenpunkts am betrachteten Knotenpunkt

[Kfz/h]

Für die Bestimmung von R_p wird von WU (2014) auch eine Möglichkeit zur grafischen Ermittlung des Parameters R_p vorgeschlagen. Das Diagramm in Bild 2-3 enthält die Werte für R_p nach Gleichung (2-28) für die Ankunftszeitpunkte t_a aus Tabelle 2-5 unter den Bedingungen, dass die Freigabezeit und die Sperrzeit innerhalb der Umlaufzeit in etwa gleich verteilt sind. Das Diagramm zur Ermittlung von R_p ist in dieser Form im HBS 2015 (FGSV, 2015b) enthalten.

Mithilfe der Gleichung (2-27) berechnet sich der Faktor R_p zu:

$$R_p = \min \left\{ \begin{aligned} &\left(1 - P_{pi}\right) + \frac{2}{1/P_{pi} - f_A} \cdot \frac{t_a}{t_u} \\ &\left(1 - P_{pi}\right) + \frac{2}{f_A} \cdot \left(1 - \frac{t_a}{t_u}\right) \end{aligned} \right. \quad (2-28)$$

mit

P_{pi} Anteil der Fahrzeuge, die in Kolonne auf dem Fahrstreifen j am betrachteten Knotenpunkt eintreffen

[-]

f_A Abflusszeitanteil

[-]

Die Fußnote 3 in Bild 2-3 bezieht sich auf die Ermittlung des Kolonnenanteils nach HBS 2015. Darin ist der Anteil der Fahrzeuge in der Kolonne definiert als das Verhältnis aus der Verkehrsstärke des Verkehrsstroms, welcher den stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt mit LSA in der koordinierten Fahrtrichtung passiert (Verkehrsstärke der Fahrzeuge im Grünband), zur gesamten Verkehrsstärke (Fahrzeuge im Grünband und einbiegende Fahrzeuge) auf dem Fahrstreifen j am betrachteten Knotenpunkt.

2.5 Verkehrsqualität an Einzelknotenpunkten mit verkehrsabhängiger Steuerung

Die verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren für LSA an Einzelknotenpunkten können in zwei Gruppen unterteilt werden:

- vollverkehrsabhängige Steuerung, bei der sowohl die Freigabezeiten als auch die Signalstrukturen online verkehrsabhängig angepasst werden können, und
- teilverkehrsabhängige Steuerung (auch Freigabezeitanpassung oder Freigabezeitmodifizierung genannt), bei der die Signalstrukturen und die Umlaufzeit vorgegeben sind und nur die Längen einiger Freigabezeiten online verkehrsabhängig ermittelt werden.

Im Gegensatz zum HBS (FGSV, 2001, 2015b) wird im amerikanischen HCM 2000 (TRB, 2000) ein Verfahren für die Bewertung von verkehrsabhängig gesteuerten LSA angegeben, welches auch in veränderter Darstellung im HCM 2010 (TRB, 2010) enthalten ist. Mit diesem Verfahren kann die mittlere Umlaufzeit iterativ ermittelt werden. Zur Bewertung der Verkehrsqualität wird – wie bei festzeitgesteuerten LSA – die mittlere Wartezeit verwendet. Die Wartezeit wird in Abhängigkeit von der verwendeten Abbruchzeitlücke berechnet.

Voraussetzung für die Bewertung von verkehrsabhängig gesteuerten LSA ist die Schätzung der mittleren Umlaufzeit und der zugehörigen Freigabezeiten. Nach AKÇELIK (1994) sind die mittleren Freigabezeiten und die mittlere Umlaufzeit Funktionen der Verkehrsstärken, der Zwischenzeiten und der Abbruchzeitlücken. Die mittlere Umlaufzeit \bar{t}_U und die mittleren Freigabezeiten $\bar{t}_{F,j}$ können mit den Gleichungen (2-29) bis (2-31) geschätzt werden (vgl. WU, 2004):

$$\bar{t}_U = \frac{\sum_{j=1}^n \left[\left(1 - \frac{q_j}{q_{s,j}} \right) \cdot \bar{t}_{F,e,j} \right] + TZ}{1 - \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{q_{s,j}}} \quad (2-29)$$

mit

| | | |
|-------------------|---|-----|
| \bar{t}_U | mittlere Umlaufzeit | [s] |
| TZ | Summe der maßgebenden Zwischenzeiten | [s] |
| $\bar{t}_{F,e,j}$ | mittlere Freigabezeitverlängerung der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j | [s] |

q_j Verkehrsstärke der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [Kfz/s]

$q_{s,j}$ Sättigungsverkehrsstärke der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [Kfz/s]

n Anzahl der maßgebenden Signalgruppen im Sperrzyklus innerhalb der Umlaufzeit

$$\bar{t}_{F,j} = \frac{q_j}{q_{s,j}} \cdot \bar{t}_U + \left(1 - \frac{q_j}{q_{s,j}} \right) \cdot \bar{t}_{F,e,j} \quad (2-30)$$

mit

$\bar{t}_{F,j}$ mittlere Freigabezeit der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [s]

$\bar{t}_{F,e,j}$ mittlere Freigabezeitverlängerung der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [s]

\bar{t}_U mittlere Umlaufzeit [s]

q_j Verkehrsstärke der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [Kfz/s]

$q_{s,j}$ Sättigungsverkehrsstärke der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [Kfz/s]

$$\bar{t}_{F,e,j} = -\frac{1}{q_j} + \left(\frac{\Delta_j}{1 - \Delta_j \cdot q_j} + \frac{1}{q_j} \right) \cdot e^{q_j \cdot (ZL_j - \Delta_j)} \quad (2-31)$$

mit

$\bar{t}_{F,e,j}$ mittlere Freigabezeitverlängerung der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [s]

q_j Verkehrsstärke der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [Kfz/s]

ZL_j Abbruchzeitlücke für die Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [s]

Δ_j Mindestzeitlücke zwischen Fahrzeugen der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [s]

Die mittlere Umlaufzeit nimmt mit zunehmender Gesamtverkehrsstärke und mit zunehmender Länge der Abbruchzeitlücke zu. Für die Bewertung der LSA müssen die ermittelten mittleren Freigabezeiten durch die Mindestfreigabezeit $t_{F,min,j}$ bzw. die Maximalfreigabezeit $t_{F,max,j}$ ersetzt werden, wenn sie außerhalb des gültigen Bereichs liegen. Es ist auch denkbar, dass eine Maximalumlaufzeit vorgegeben wird und die Maximalfreigabezeiten innerhalb der Maximalumlaufzeit aufgeteilt werden.

Die Wartezeit an LSA setzt sich nach Gleichung (2-1) aus der Grundwartezeit $t_{W,G,j}$ und der Reststauwartezeit $t_{W,R,j}$ zusammen. Die Berücksichtigung von verkehrsabhängigen Steuerungen erfolgt analog zur Schätzung der Wartezeiten an koordiniert festzeitgesteuerten Knotenpunktzufahrten über die Korrektur der Wartezeiten für festzeitgesteuerte Einzelknotenpunkte. Für eine zweiphasige vollverkehrsabhängige Steuerung entwickelte NEWELL (1969) einen Ansatz zur Ermittlung der mittleren Grundwartezeit, der auch auf LSA mit beliebig vielen Phasen erweitert werden kann (WU, 2004). Die Wartezeitformel kann demnach vereinfacht dargestellt werden in der Form:

$$t_{W,G,j} \approx \frac{\bar{t}_U \cdot (1 - \bar{f}_{A,j})^2}{2 \cdot (1 - \min\{1; \bar{x}_j\} \cdot \bar{f}_{A,j})} \cdot [1 + K_j] \quad (2-32)$$

mit

$t_{W,G,j}$ Grundwartezeit der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j

\bar{t}_U mittlere Umlaufzeit [s]

$\bar{f}_{A,j}$ mittlerer Abflusszeitanteil der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [s]

\bar{x}_j mittlerer Auslastungsgrad der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [-]

K_j Korrekturfaktor der Grundwartezeit der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j zur Berücksichtigung der verkehrsabhängigen Steuerung [-]

Der Ansatz nach HCM 2000 zur Ermittlung des Korrekturfaktors der Grundwartezeit K sieht einen linearen Zusammenhang zum Auslastungsgrad vor:

$$K_j = 0,08 \cdot (1 - \bar{x}_j) \quad (2-33)$$

mit

K_j Korrekturfaktor der Grundwartezeit der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j zur Berücksichtigung der verkehrsabhängigen Steuerung [-]

\bar{x}_j Auslastungsgrad der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [-]

Der Faktor K zur Korrektur der Grundwartezeit kann auch in Abhängigkeit von der Sperrzeit ermittelt werden. Erste Ansätze wurden dafür von NEWELL (1969) für 2-phasige vollverkehrsabhängige Steuerungen entwickelt und von WU (2004) auf ihre Gültigkeit für beliebig viele Phasen geprüft. Als Resultat ging die Gleichung (2-34) hervor.

$$K_j = \frac{\text{VAR}(\bar{t}_{s,j}^*)}{\bar{t}_{s,j}^2} \quad (2-34)$$

mit

$\bar{t}_{s,j}$ mittlere Sperrzeit der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j [s]

$\bar{t}_{s,j}^*$ $\bar{t}_{s,j} - \text{TZ}$ [s]

TZ Summe der maßgebenden Zwischenzeiten [s]

Der Wert von K liegt für normale Verkehrsverhältnisse zwischen 0,05 und 0,25.

Neben der Korrektur der Grundwartezeit sieht das Verfahren nach HCM 2000 auch Korrekturwerte k für die Reststauwartezeit vor. Wenn die Freigabezeit frei wählbar ist, ist die Reststauwartezeit immer gleich null, solange keine Überlastung vorliegt. Die Gesamtwartezeit besteht folglich nur aus der Grundwartezeit. Da auch bei vollverkehrsabhängigen Steuerungen die Mindest- und Maximalfreigabezeiten eingehalten werden müssen, entstehen in der Realität auch hier Reststauwartezeiten. Die Reststauwartezeit ist jedoch in der Regel deutlich kleiner als bei der Festzeitsteuerung.

Zur Berücksichtigung der Mindest- und Maximalfreigabezeit bei der Schätzung der mittleren Wartezeit haben LI et al. (1994) ausführliche Simulationsuntersuchungen unter verschiedenen Verkehrsbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind als Korrekturwerte k im HCM 2000 integriert.

Die Ansätze des HCM 2000 wurden im HBS 2015 (FGSV, 2015b) in modifizierter Form für die Ermittlung der Wartezeit bei Festzeitsteuerung übernommen. Für die Berechnung der mittleren Reststauwartezeit an vollverkehrsabhängig gesteuerten LSA kann analog zum HCM 2000 ein zusätzlicher Korrekturfaktor k_j eingefügt werden, der in der vorliegenden Untersuchung angepasst wird. Daraus ergeben sich die folgenden Formeln für die Berechnung der mittleren Reststauwartezeit:

$$t_{W,R,j} = \frac{N_{GE,j} \cdot 3600}{C_{0,j}} \quad (2-35)$$

| x | ZL = 2,0 s | ZL = 2,5 s | ZL = 3,0 s | ZL = 3,5 s | ZL = 4,0 s | ZL = 4,5 s | ZL = 5,0 s | Festzeit |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 0,5 | 0,04 | 0,08 | 0,11 | 0,13 | 0,15 | 0,19 | 0,23 | 0,50 |
| 0,6 | 0,13 | 0,16 | 0,19 | 0,2 | 0,22 | 0,25 | 0,28 | 0,50 |
| 0,7 | 0,22 | 0,25 | 0,27 | 0,28 | 0,29 | 0,31 | 0,34 | 0,50 |
| 0,8 | 0,32 | 0,33 | 0,34 | 0,35 | 0,36 | 0,38 | 0,39 | 0,50 |
| 0,9 | 0,41 | 0,42 | 0,42 | 0,43 | 0,43 | 0,44 | 0,45 | 0,50 |
| 1,0 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |

Tab. 2-6: Korrekturfaktor k_j^* zur Berücksichtigung der verkehrsabhängigen Steuerung bei der Ermittlung der Reststauwartezeit nach HCM 2000 (TRB, 2000)

$$N_{GE,j} = \max \left\{ \frac{0,58 \cdot T \cdot C_{0,j}}{4} \cdot \left[(f_{in,j} \cdot x_j - 1) + \sqrt{\frac{(f_{in,j} \cdot x_j - 1)^2 + 4 \cdot f_{in,j} \cdot k_j \cdot x_j}{0,58 \cdot T \cdot C_{0,j}}} \right], \frac{T \cdot C_{0,j}}{4} \cdot \left[(x_j - 1) + \sqrt{(x_j - 1)^2 + \frac{4 \cdot k_j \cdot x_j}{T \cdot C_{0,j}}} \right] \right\} \quad (2-36)$$

mit

| | | |
|-------------|--|---------|
| $t_{W,R,j}$ | Reststauwartezeit der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j | [s/Kfz] |
| $N_{GE,j}$ | mittlerer Rückstau bei Freigabezeitende für den betrachteten Untersuchungszeitraum auf dem Fahrstreifen j bei verkehrsabhängiger Steuerung | [Kfz] |
| T | Betrachtungszeitraum (in der Regel eine Stunde) | [h] |
| $C_{0,j}$ | Kapazität des Fahrstreifens j | [Kfz/h] |
| x_j | Auslastungsgrad des Fahrstreifens j | [-] |
| $f_{in,j}$ | Instationaritätsfaktor des Fahrstreifens j | [-] |
| k_j | Korrekturfaktor der Reststauwartezeit der Signalgruppe auf dem Fahrstreifen j zur Berücksichtigung der verkehrsabhängigen Steuerung | [-] |

Der Korrekturfaktor k_j ist allgemein eine Funktion der Abbruchzeitlücke ZL und des mittleren Auslastungsgrades. Die Werte in Tabelle 2-6 stammen aus Simulationsuntersuchungen von LI et al. (1994) und sind in das HCM 2000 eingeflossen. Für die Anwendung in Gleichung (2-36) zur Berechnung der mittleren Reststauwartezeit sind die Korrekturfaktoren k_j^* aus Tabelle 2-6 mit dem Faktor 2 zu multiplizieren, d. h. $k_j = 2 \cdot k_j^*$. Aus Gründen der einfacheren

Handhabbarkeit und der geringen Unterschiede im Bereich der für praktische Anwendungen relevanten Werte von x und ZL wird in der vorliegenden Untersuchung ein konstanter Wert für k_j angenommen und für deutsche Verkehrsverhältnisse kalibriert.

3 Erhebungskonzept

3.1 Untersuchungskollektiv

3.1.1 Straßenzüge mit koordiniert festzeitgesteuerten LSA

Für die vorliegende Untersuchung wurden fünf Straßenzüge mit jeweils mindestens fünf koordiniert festzeitgesteuerten LSA analysiert. Für vier der fünf Straßenzüge wurden Messungen im Zuge dieser Untersuchung durchgeführt. Ergänzt wird das Kollektiv durch eine Messung aus einem früheren Forschungsprojekt. Das Untersuchungskollektiv setzt sich folgendermaßen zusammen:

Neue Messungen

- Bochum: Berliner Straße/Zeppeindamm,
- Wuppertal: Carnaper Straße/Steinweg,
- Lünen: Konrad-Adenauer-Straße/Dortmunder Straße,
- Hamburg: Eiffestraße.

Messung aus früherer Untersuchung

- Bochum: Königsallee.

Zudem wurden zehn Streckenabschnitte zwischen benachbarten koordinierten LSA untersucht. Sechs der zehn untersuchten Abschnitte liegen innerhalb von Straßenzügen, die für die Gesamtbetrachtung ausgewählt wurden (Bochum: Berliner Straße/

Zeppelindamm, Bochum: Königsallee und Wuppertal: Carnaper Straße/Steinweg). Vervollständigt wurde die Auswahl durch die Abschnitte von zwei weiteren Straßenzügen in Bochum (Herner Straße und Castroper Straße). Die Messungen wurden jeweils für beide Fahrtrichtungen vorgenommen.

- Bochum: Berliner Straße/Zeppelindamm zwischen den Knotenpunkten Burgstraße/Schlaraffiastraße (LSA 898) und Wattenscheider Hellweg (LSA 848).
- Bochum: Königsallee zwischen den Knotenpunkten Arnikastraße (LSA 127) und Waldring (LSA 130).
- Wuppertal: Carnaper Straße/Steinweg zwischen den Knotenpunkten Alter Markt (LSA 353) und Bleicherstraße (LSA 354).
- Bochum: Herner Straße zwischen den Knotenpunkten Freiligrathstraße/Emscher Straße (LSA 616) und Feldsieper Straße (LSA 614).
- Bochum: Castroper Straße zwischen den Knotenpunkten Klinikstraße (LSA 411) und Stationring/Gersteinring (LSA 413).

Die Auswahl der Untersuchungsstrecken erfolgte nach verschiedenen Kriterien hinsichtlich der Umfeldbedingungen der Straßenzüge sowie der technischen Ausstattung der LSA in den Kommunen. Zum einen wurde nach möglichst anbaufreien Straßen gesucht, um die Beeinflussungen durch Parksuchverkehr und andere Störfaktoren auf den Verkehrsablauf gering zu halten. Zum anderen sollten die LSA über einen Verkehrsrechneranschluss verfügen. Dadurch wird die einwandfreie Synchroni-

sierung der Steuergeräte innerhalb der Koordinierung sichergestellt. Dazu wurden Gespräche mit den zuständigen Vertretern mehrerer Städte geführt. Dabei stellte sich heraus, dass der Großteil der angefragten Städte über einen zentralen Verkehrsrechner verfügt, die angeschlossenen Anlagen jedoch selten mit einer Festzeitsteuerung betrieben werden. Für die Untersuchung erklärten sich jedoch einige Städte bereit, für den Zeitraum der Messungen Festzeitsteuerungsprogramme auf den Straßenzügen zu aktivieren. Daraus ergab sich die Möglichkeit, die Verkehrslage über die angeschlossenen Detektoren mit geringem Aufwand zu erfassen. Bis auf den Straßenzug Berliner Straße/Zeppelindamm und die LSA auf den Abschnitten der Herner Straße und der Castroper Straße in Bochum verfügen alle Anlagen der analysierten Straßenzüge über einen Anschluss an einen Verkehrsrechner. Die Synchronisierung der Anlagen der Straßenzüge in Bochum wird über eine Funkverbindung zwischen den Steuergeräten der LSA hergestellt.

Die Termine der Messungen sind der Tabelle 3-1 zu entnehmen. An jedem Straßenzug wurden sowohl der Morgen- als auch der Abendspitzenzeitraum erfasst. Die zusätzlichen Abschnittsmessungen an den Straßenzügen Berliner Straße/Zeppelindamm und Carnaper Straße/Steinweg fanden zeitgleich mit den Messungen der gesamten Straßenzüge über einen Zeitraum von zwei Stunden statt.

Die Termine der Abschnittsmessungen an Straßenzügen, die nicht zeitgleich mit anderen Messungen stattfanden, sind in Tabelle 3-2 enthalten. Die Erfassungszeiträume betragen jeweils zwei Stunden.

| Straßenzug | Anzahl der Knotenpunkte | Messtermin |
|---|-------------------------|--------------------|
| Bochum: Berliner Straße/Zeppelindamm | 9 | 27.09.2012 |
| Bochum: Königsallee | 9 | 09. und 10.11.2005 |
| Lünen: Konrad-Adenauer-Straße/Dortmunder Straße | 8 | 26. und 27.10.2013 |
| Wuppertal: Carnaper Straße/Steinweg | 9 | 05.11.2013 |
| Hamburg: Eiffestraße | 10 | 20. und 21.05.2014 |

Tab. 3-1: Untersuchungskollektiv für Straßenzüge mit koordiniert festzeitgesteuerten LSA

| Straßenzug | Abschnitt | Messtermin |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Bochum: Königsallee | LSA 127 – LSA 130 | 17.09.2013 |
| Bochum: Herner Straße | LSA 616 – LSA 614 | 10.10.2013 |
| Bochum: Castroper Straße | LSA 411 – LSA 413 | 14.10.2013 |
| Bochum: Berliner Straße/Zeppelindamm | LSA 898 – LSA 848 | siehe Tabelle 3-1 |
| Wuppertal: Carnaper Straße/Steinweg | LSA 353 – LSA 354 | siehe Tabelle 3-1 |

Tab. 3-2: Untersuchungskollektiv für Abschnittsmessungen zwischen benachbarten LSA mit koordinierter Festzeitsteuerung

In den Kapiteln 4.1 bis 4.4 werden die einzelnen Untersuchungsobjekte detailliert beschrieben.

3.1.2 Einzelknotenpunkte mit verkehrsabhängiger LSA-Steuerung

Das Untersuchungskollektiv verkehrsabhängig gesteuerter Einzelknotenpunkte umfasst zehn Knotenpunkte. Die Messungen wurden ausschließlich an vollverkehrsabhängig gesteuerten Knotenpunkten durchgeführt. Objekte mit teilverkehrsabhängiger Steuerung, die die Voraussetzungen für die vorliegende Untersuchung hinsichtlich der Eigenschaften des Verkehrsablaufs im Zu- und Abfluss erfüllen, konnten nicht gefunden werden. Der Einsatz einer aufwendigen verkehrsabhängigen Steuerung ist nur dann gegenüber einer Festzeitsteuerung gerechtfertigt, wenn die Randbedingungen eingehalten sind. Die Voraussetzungen betreffen hauptsächlich den freien, ungebundenen Zufluss in den untersuchten Zufahrten. Die Randbedingungen stellen sich ein, wenn der untersuchte Knotenpunkt möglichst isoliert, also unbeeinflusst von anderen Knotenpunkten gelegen ist. Geeignete Messobjekte sind folglich fast ausschließlich außerorts gelegene Knotenpunkte. Diese werden hauptsächlich aus Sicherheitsgründen und aufgrund der hohen Verkehrsstärken über kurze Zeiträume im Tagesverlauf signalgeregelt betrieben. Um den teilweise stark schwankenden Verkehrsbelastungen in den einzelnen Zufahrten gerecht zu werden, erfolgt die Steuerung der Knotenpunkte hauptsächlich vollverkehrsabhängig.

Die Steuerungsverfahren unterscheiden sich in Bezug auf die Anzahl der Freiheitsgrade zur Anpassung der Signalstruktur an die Verkehrslage. Ziel der Messungen war es, Verlustzeiten der Verkehrsteilnehmer in den einzelnen Zufahrten zu ermitteln.

Daher war es nicht zwingend notwendig, alle Zufahrten eines Knotenpunkts zu betrachten, um aussagekräftige Ergebnisse für die Untersuchung zu erhalten. Zur Berechnung der Wartezeiten müssen die mittleren Freigabe- und Sperrzeiten sowie Umlaufzeiten während des Messzeitraums bekannt sein. Daher wurde neben der Einhaltung der Randbedingungen hinsichtlich der Lage des Knotenpunkts auch auf die Möglichkeit zur Protokollierung der Daten der Steuergeräte geachtet. Das Auslesen der Daten direkt aus den Steuergeräten kann nur durch die Signalbaufirmen selbst erfolgen und ist daher sehr kostenintensiv. Zudem ist das direkte Auslesen aus den Steuergeräten fehleranfällig, da im Vorfeld einer Messung keine Überprüfung der Daten erfolgen kann. Eine andere Möglichkeit ist die Aufzeichnung der Daten durch die Betreiber der Signalanlage. Voraussetzung dafür ist allerdings eine Verbindung vom Steuergerät der Anlage zu einem zentralen Verkehrsrechner. Zum einen ist diese Voraussetzung nur selten gegeben, da außerorts gelegene Knotenpunkte häufig von Landesstraßenbauverwaltungen betrieben werden. Verkehrsrechner hingegen werden in der Regel von Städten eingerichtet und betrieben. Zum anderen ist die Entfernung zwischen den Knotenpunkten und dem Verkehrsrechner für eine stabile, kabelgebundene Datenübertragung in der Regel zu groß. Eine geeignete kabellose Datenübertragung zwischen Steuergeräten und Verkehrsrechner z. B. über Mobilfunk ist zurzeit noch sehr teuer oder zu instabil und im Vergleich zu den Kosten wenig leistungsfähig.

Die Knotenpunkte, an denen Messungen durchgeführt wurden, sind in Tabelle 3-3 enthalten. Anhand der Messergebnisse wurden verschiedene Wartezeitmodelle analysiert sowie die Simulationsmodelle der Untersuchungsobjekte kalibriert und validiert. Die Knotenpunkte im Untersuchungskollektiv unter-

| Knotenpunkt | Knotenpunkttyp | Steuerungsverfahren | Datum der Messung |
|---|----------------|---------------------|-------------------|
| Bochum: Kirchharpener Straße/Heinrichstraße | Einmündung | „Alles-Rot“ | 08.11.2012 |
| Bochum: Kirchharpener Straße/Ecksee | Einmündung | „Alles-Rot“ | 08.11.2012 |
| Bochum: Bövinghauser Hellweg/Dieselstraße | Einmündung | „Alles-Rot“ | 15.11.2012 |
| Kassel: B 83/Nürnberger Straße | Kreuzung | „HDG“ | 12.11.2013 |
| Karlsruhe: Haid-und-Neu Straße/Ostring | Einmündung | „HDG“ | 17.10.2013 |
| Lünen: Kamener Straße/Kreuzstraße | Kreuzung | „HDG“ | 21.11.2013 |
| Hennef: A 560/B 8 | Kreuzung | „HDG“ | 03.06.2014 |
| Hattingen: Wuppertaler Straße/Denkmalstraße | Kreuzung | „HDG“ | 05.05.2014 |
| Hamm: Wittekindstraße/Am Lausbach | Kreuzung | „Alles-Rot“ | 24.07.2014 |
| Drensteinfurt: B 58/L 585 | Kreuzung | „Alles-Rot“ | 18.09.2014 |

Tab. 3-3: Untersuchungskollektiv der Einzelknotenpunkte mit verkehrsabhängiger Steuerung

scheiden sich hinsichtlich der Grundstellung der Steuerung, wenn keine Phasenanforderungen vorliegen. Die untersuchten Steuerungsverfahren verteilen sich je zur Hälfte auf die Verfahren mit der Grundstellung der Anlage in Dauerfreigabe für die Hauptrichtung (HDG) sowie der Grundstellung mit einer Alles-Rot-Phase, aus der heraus die anderen Phasen bei Anforderung freigegeben werden („Alles“-Rot).

3.2 Erhebungsmethodik

3.2.1 GPS-gestützte Befahrungen

Die Datengrundlage der vorliegenden Untersuchung bilden eigene Messungen. Dazu wurden GPS-gestützte Befahrungen an koordiniert gesteuerten Straßenzügen durchgeführt. Für die Befahrungen wurden Pkw mit magnetisch auf dem Fahrzeugdach angebrachten GPS-Empfängern ausgerüstet. Mithilfe der GPS-Empfänger wurde sekundlich die genaue Position der Fahrzeuge aufgezeichnet und über den NMEA 0183 Kommunikationsstandard in einer Textdatei auf einem mitgeführten Notebook gespeichert.

Für die Messungen wurden jeweils fünf bis zehn Fahrzeuge eingesetzt, die vorab festgelegte Routen befuhren. Die Fahrer wurden angewiesen, ihre Fahrweise an das Verkehrsgeschehen auf dem Straßenzug anzupassen. An den Wendepunkten wurden unterschiedlich lange Pausen eingelegt, um nicht immer zur gleichen Umlaufsekunde am ersten Knotenpunkt in die Straßenzüge einzufahren. Behinderungshalte, die offensichtlich nicht durch LSA verursacht wurden, wurden an den Wendepunkten protokolliert und aus der späteren Auswertung ausgeschlossen.

Jeder Straßenzug wurde in zwei unterschiedlichen Zeiträumen befahren. Die Messzeiträume erstreckten sich jeweils über zwei Stunden während der Spitzenverkehrszeiten und/oder der Nebenverkehrszeiten. Die Messungen fanden in enger Abstimmung mit den jeweils zuständigen Kommunalverwaltungen statt.

Die Daten der GPS-Empfänger der Fahrzeuge wurden über ein java-basiertes Programm sekundlich in eine Textdatei protokolliert. Das Programm erlaubt die Filterung der NMEA-Daten, sodass nur der für die weitere Auswertung relevante GPGGA-Datensatz aufgezeichnet wird. Der GPGGA-Datensatz enthält alle erforderlichen Daten zur

Positionsbestimmung. Die aufgezeichneten Positionsangaben in Längen- und Breitengraden in den GPGGA-Daten des NMEA-Protokolls wurden für die weitere Auswertung zunächst in X-Y-Koordinaten in Dezimalgrad transformiert. Eine Umformung in UTM-Koordinaten, welche die Erdkrümmung berücksichtigen, war nicht nötig, da aufgrund der geringen Distanzen zwischen zwei Koordinatenpaaren der Einfluss der Erdkrümmung auf die Genauigkeit der Koordinaten vernachlässigt werden kann.

Für die Berechnung der einzelnen Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Koordinatenpaaren wurde die Haversine-Formel (ROBUSTO, 1957) verwendet. Die Haversine-Formel liefert für nah beieinander liegende Koordinaten sehr genaue Daten. Für den Erdradius, der zur Berechnung der Haversine-Formel nötig ist, wird der Mittelwert des World Geodetic System 1984 (WGS 84) verwendet. Über die zurückgelegte Entfernung zwischen zwei Koordinatenpaaren innerhalb einer Sekunde wird die gefahrene Geschwindigkeit ermittelt. Durch Aufsummieren der Einzelabstände berechnet sich die Gesamtlänge der gefahrenen Strecke. Die auf diese Weise erhaltenen Daten wurden als Fahrtverlauf dargestellt. Die Wendepunkte am Anfang und am Ende der Strecke wurden nicht in die Auswertung einbezogen und daher entfernt. Dafür wurden die Koordinaten der Haltlinien der Knotenpunktzufahrten am Anfang und am Ende des Straßenzugs ermittelt. Die Fahrtverläufe aller Messfahrten wurden ab dem Überqueren der ersten bis zur letzten Haltlinie je Fahrtrichtung betrachtet. Mithilfe der umgerechneten GPS-Daten und der Koordinaten der Haltlinien können die Fahrtverläufe über die zurückgelegte Distanz dargestellt werden. Bild 3-1 zeigt die Geschwindigkeitsprofile am Beispiel der sechs durchgeführten Fahrten eines Fahrers in Fahrtrichtung Süd während der Morgenspitze zwischen 08:00 und 10:00 Uhr auf dem Straßenzug Berliner Straße/Zeppelindamm in Bochum.

Anhand der Koordinaten der Haltlinien an den einzelnen Knotenpunkten lässt sich eine detaillierte Auswertung der Daten für die Abschnitte zwischen den Haltlinien erstellen. Die Fahrzeugpositionen wurden den einzelnen Abschnitten zwischen den Haltlinien zugeordnet. Neben den direkt ableitbaren Größen Fahrtzeit und Anzahl der Halte werden der Prozentsatz an Durchfahrten ohne Halt sowie die Verlustzeit gegenüber einer idealen Fahrtzeit ermittelt. Die ideale Fahrtzeit entspricht der Fahrtzeit bei freier Fahrt mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit

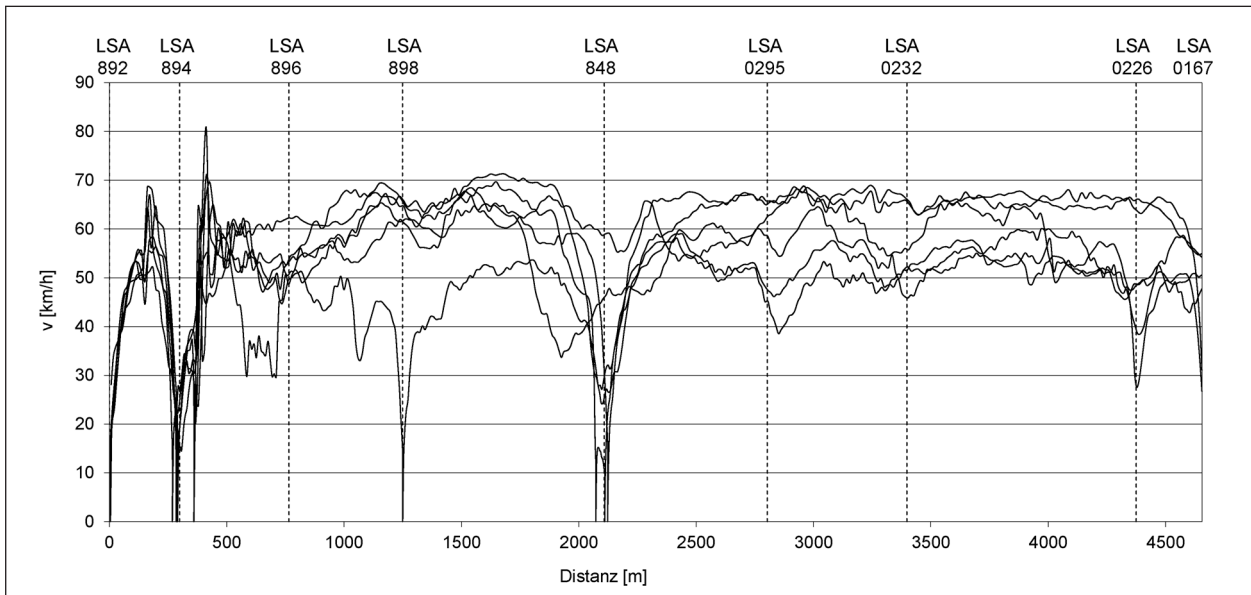


Bild 3-1: Geschwindigkeitsprofile der Fahrten eines Messfahrzeugs auf dem Straßenzug Berliner Straße/Zeppelindamm in Bochum in Fahrtrichtung Süd (08:00-10:00 Uhr)

ohne Einwirkungen von Knotenpunkten und anderen Fahrzeugen. Auf Abschnitten mit wechselnder zulässiger Höchstgeschwindigkeit wurde für die Ermittlung der idealen Fahrtzeit ein längengewichteter Mittelwert zugrunde gelegt.

3.2.2 Fahrtzeiterhebungen

Straßenzüge mit koordiniert festzeitgesteuerten LSA

An Straßenzügen wurden Fahrtzeitmessungen zur Erweiterung der Daten der GPS-Befahrungen eingesetzt. Dazu wurden im Umfeld der Anfangs- und Endknotenpunkte Erfassungsgeräte positioniert. Über eine anonymisierte Fahrzeugverfolgung wurden die Fahrtzeiten zwischen den Erfassungsquerschnitten ermittelt. Zur Auswertung der Fahrtzeitmessungen wurde ein java-basiertes Auswerteprogramm verwendet. Die automatisch ermittelten Einzelwerte wurden manuell geprüft und nicht plausible Werte aus der Auswertung entfernt. Die Ermittlung der Verlustzeiten erfolgte analog zu den GPS-Befahrungen. Die Ergebnisse der Messungen über gesamte Straßenzüge dienen der Kalibrierung der Simulationsmodelle.

Darüber hinaus wurde das Verkehrsgeschehen auf einzelnen Abschnitten zwischen zwei aufeinanderfolgenden LSA aufgezeichnet. Die Ergebnisse dienen wie die Verlustzeiten auf den Abschnitten zwischen aufeinanderfolgenden LSA aus den GPS-Befahrungen der Analyse der Berechnungsmodelle.

Einzelknotenpunkte mit verkehrsabhängiger LSA-Steuerung

Die Verlustzeiten an verkehrsabhängig gesteuerten Einzelknotenpunkten wurden über die Erfassung der Kennzeichen der Fahrzeuge in allen Zufahrten ermittelt. Die Positionierung der Erfassungsgeräte erfolgte dabei in einer Entfernung zu den Haltlinien der Knotenpunkte, die größer als die längste zu erwartende Rückstaulänge in der Zufahrt war. Die Messergebnisse werden einerseits für die Kalibrierung der Simulationsmodelle und andererseits als Grundlage für die Analyse der Wartezeitmodelle verwendet.

3.2.3 Signalzeiten von verkehrsabhängigen LSA-Steuerungen

Unabhängig von der Steuerungsart einer LSA ist neben den Verkehrsstärken die Kenntnis der Signalzeiten für die Berechnung der mittleren Wartezeiten an Knotenpunkten mit LSA erforderlich. An verkehrsabhängig gesteuerten LSA sind die Signalzeiten im Gegensatz zu Festzeitsteuerungen nicht konstant. Zur Berechnung der Wartezeiten werden daher Mittelwerte der Signalzeiten zugrunde gelegt. Dafür wurden zusätzlich zur Beobachtung des Verkehrsgeschehens die Signalzeiten an den Knotenpunkten mit verkehrsabhängig gesteuerten LSA aufgezeichnet. Soweit verfügbar wurden hierfür Mitschriften der Steuergeräte der LSA herangezogen.

Die gemessenen mittleren Signalzeiten werden als Eingangsgrößen zur Berechnung der Wartezeiten anhand der Gleichungen (2-32) und (2-35) verwendet. Dazu gehören die mittlere Umlaufzeit sowie die mittlere Freigabe- und Sperrzeit je Signalgruppe der LSA. Innerhalb eines Ablaufs des Signalprogramms werden an festzeitgesteuerten LSA unabhängig vom Verkehrsgeschehen nacheinander alle Signalgruppen in den zugehörigen Phasen freigegeben. Bei vollverkehrsabhängig gesteuerten LSA (Ordnungszahl B6 gemäß RiLSA, vgl. Bild 2-1) ist es nicht ohne weiteres möglich, einen Ablauf des Signalprogramms aus dem Mitschrieb des Steuergeräts festzulegen, da die Signalprogramme in Abhängigkeit vom Verkehrsgeschehen am Knotenpunkt ständig neu gebildet werden. Nur wenn alle Phasen angefordert werden, ergibt sich ein Signalprogramm mit einer Phasenfolge, die mit dem Signalprogramm einer festzeitgesteuerten LSA vergleichbar ist. Werden einzelne Phasen bzw. Signalgruppen nicht angefordert, werden diese auch nicht freigegeben. Dies ist beispielsweise an gering belasteten Nebenzufahrten der Fall.

Die Ermittlung der mittleren Signalzeiten erfolgte daher über die Analyse der aufgezeichneten Phasenwechsel. Ausgehend vom Zeitpunkt der Freigabe einer Signalgruppe werden die Dauer bis zur darauffolgenden Freigabe ermittelt und die in diesem Zeitraum aufgezeichneten Phasenwechsel analysiert. Ein vollständiger Ablauf des Signalprogramms liegt vor, wenn im Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Freigaben einer Signalgruppe alle weiteren Signalgruppen freigegeben werden. Je nach Phasenfolge und Dauer der Freigaben der einzelnen Signalgruppen ergeben sich unterschiedliche Dauern. Der Mittelwert dieser Zeitdauern ergibt die mittlere Umlaufzeit für die Berechnung der mittleren Wartezeit.

In Bild 3-2 ist zur Verdeutlichung der Vorgehensweise ein Phasenfolgeplan schematisch dargestellt. Zunächst wird die Häufigkeit der geschalteten Phasenfolgen untersucht. Gemäß den Planungsunterlagen der LSA in Bild 3-2 wird bei Anforderungen aller Signalgruppen die Phasenfolge 1-2-3-5-1 geschaltet. Aus der Anzahl der Phasenwechsel in der Darstellung geht jedoch hervor, dass die Folgen 1-2-3-6-1 und 1-2-3-1 deutlich häufiger auftreten. In diesem Fall wurde nur die am häufigsten auftretende Phasenfolge zur Bestim-

mung der Signalzeiten verwendet. Ergibt die Verteilung der Phasenübergänge jedoch kein so deutliches Bild wie in diesem Beispiel, wird die Datengrundlage durch die Filterung nach vollständigen Abläufen des Signalprogramms im Sinne einer Festzeitsteuerung zu stark eingeschränkt. In solchen Fällen wurden alle Phasenübergänge in die Auswertung einbezogen. Alternativ wäre eine nach der Anzahl gewichtete Berücksichtigung der unterschiedlichen Programmabläufe denkbar.

Die Einbeziehung aller Phasenübergänge in die Auswertung der Signalzeiten wirkt sich jedoch an LSA, die nach dem Prinzip der Signalprogrammierung vollverkehrsabhängig gesteuert werden, nachteilig auf die Berechnung der Wartezeit für gering belastete Verkehrsströme aus. Diese Verkehrsströme werden an vollverkehrsabhängig gesteuerten LSA nur nach Anforderung freigegeben. Die Wartezeit hängt dann hauptsächlich von der Programmierung der Logik der LSA-Steuerung ab. Die nach den Gleichungen (2-32) und (2-35) berechnete Wartezeit an verkehrsabhängig gesteuerten LSA in Verbindung mit den gemessenen Signalzeiten entspricht demnach nicht der tatsächlich auftretenden Wartezeit, da der Ankunftszeitpunkt bzw. der Anforderungszeitpunkt eines Fahrzeugs an der LSA nicht explizit in die Berechnung der Wartezeit eingeht.

Für den Fall, dass eine Aufzeichnung der Schaltvorgänge aus dem Steuergerät nicht möglich war, wurden die Signalgeber mit Videotechnik aufgezeichnet. In diesem Fall war jedoch eine Filterung anhand von Phasenfolgen, wie für die aufgezeichneten Daten von Steuergeräten, nicht möglich. Aufgrund der im Vergleich zur Analyse der Protokolldaten der Steuergeräte deutlich aufwendigeren Auswertung der Videoaufzeichnungen wurde nur ein Teilzeitraum der Messungen analysiert oder vollständig auf Simulationsdaten zurückgegriffen. Die Simulationsdaten können in gleicher Weise ausgewertet werden wie die Protokolldaten der Steuergeräte.

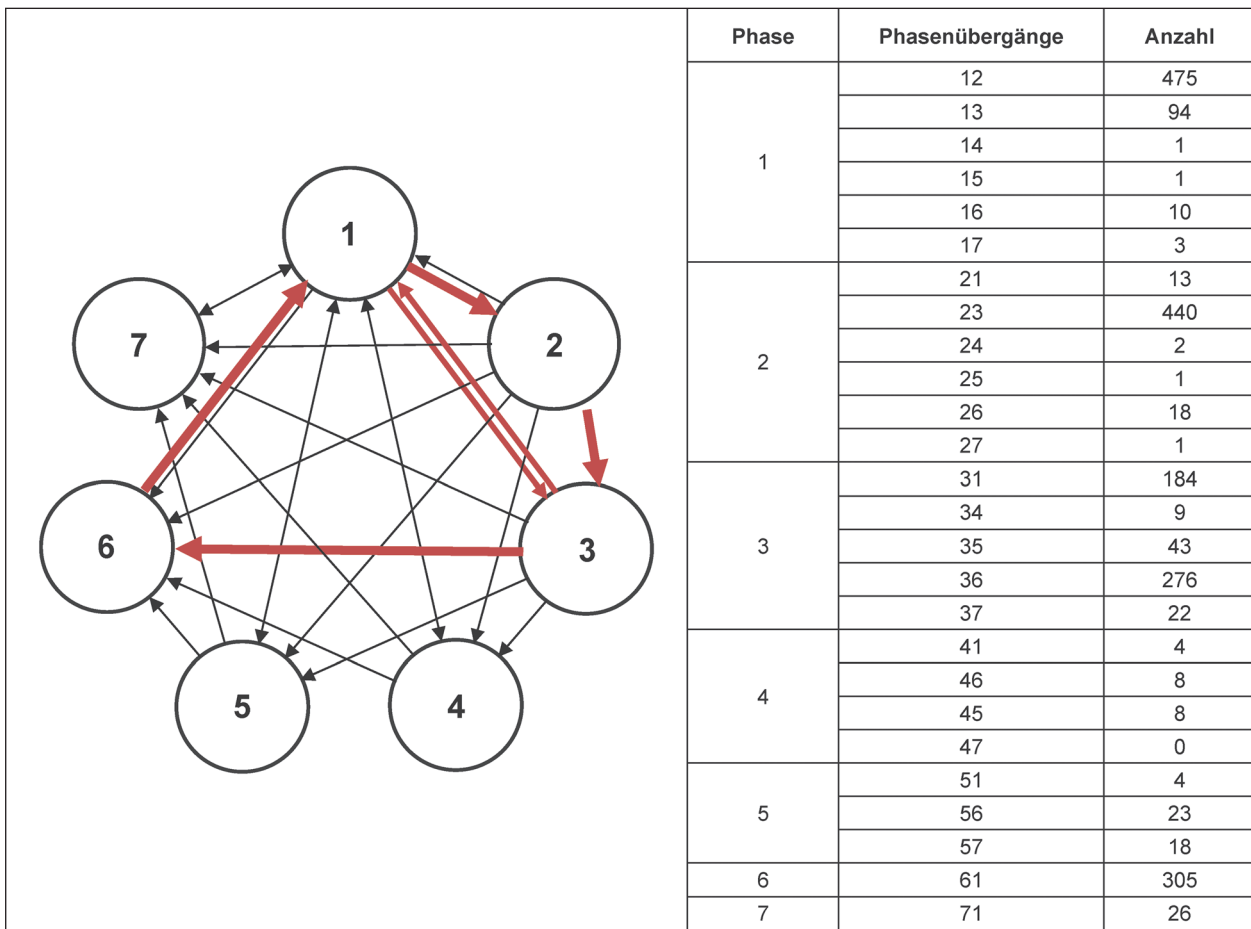


Bild 3-2: Beispiel für die Filterung aufgezeichneter Signalphasenfolgen (Knotenpunkt Drensteinfurt, vgl. Kapitel 5.10)

4 Messungen an Straßenzügen mit koordiniert festzeitgesteuerten Knotenpunkten


4.1 Bochum: Berliner Straße/Zeppelindamm

4.1.1 Beschreibung des Straßenzugs

Der Straßenzug Berliner Straße/Zeppelindamm ist ca. 5 km lang und liegt westlich des Bochumer Stadtzentrums in Bochum-Wattenscheid. Der Straßenzug stellt die Hauptverbindung zwischen den Stadtteilen im Südwesten Bochums und der Anschlussstelle Wattenscheid-West an der Autobahn A 40 dar. Der Straßenzug weist hohe Pendlerverkehrsströme in den Morgen- und Abendstunden auf und ist weitgehend anbaufrei. Der Knotenpunkt Wattenscheider Hellweg teilt den Straßenzug in eine nördliche und eine südliche Hälfte. Nördlich des Knotenpunkts liegt die Berliner Straße und im Süden schließt sich der Zeppelindamm an. Die Ber-

liner Straße ist durchgehend vierstreifig mit baulich getrennten Richtungsfahrbahnen ausgebaut. Der Zeppelindamm ist hingegen zweistreifig ausgebaut. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt auf weiten Teilen des Straßenzugs 70 km/h. Im Bereich der Anschlussstelle Wattenscheid-West an der Autobahn A 40 gilt eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 50 km/h. Am hoch belasteten Knotenpunkt Wattenscheider Hellweg sowie am südlichen Ende der Untersuchungsstrecke ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit ebenfalls auf 50 km/h beschränkt.

Die Untersuchungsstrecke umfasst neun Knotenpunkte mit LSA. In Bild 4-1 sind die signalisierten Knotenpunkte auf dem Straßenzug dargestellt. Die Bezeichnungen der Anlagen wurden den Planungsunterlagen entnommen, die von der Stadt Bochum und dem Landesbetrieb Straßenbau NRW, Regionalniederlassung Ruhr, zur Verfügung gestellt wurden. Die LSA im Zuge der Berliner Straße (892, 894, 896, 898 und 848) werden von der



| LSA | Nebenstraßen |
|------|---|
| 892 | AS Wattenscheid-West Autobahn A 40 |
| 894 | Ottostraße / Fritz-Reuter-Straße |
| 896 | Friedrich-Lueg-Straße / Wilhelm-Leithe-Weg |
| 898 | Burgstraße / Schlaraffiastraße |
| 848 | Wattenscheider Hellweg |
| 0295 | Todts Feld / Zollstraße |
| 0232 | Varenholzstraße |
| 0226 | Fußgängeranlage |
| 0167 | Ruhrstraße |

Bild 4-1: LSA-Bezeichnungen und kreuzende Nebenstraßen des Straßenzugs Berliner Straße/Zeppeindamm in Bochum (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

Stadt Bochum festzeitgesteuert und koordiniert betrieben. Diese fünf LSA werden mit einem Festzeitprogramm mit einer Umlaufzeit von 90 s gesteuert. Das Festzeitprogramm der LSA 892, 894, 896 und 898 läuft von morgens bis abends. Für die LSA 848 gibt es drei verschiedene Festzeitprogramme je nach Tageszeit für morgens, mittags und nachmittags.

Die LSA der Berliner Straße werden bis zum Knotenpunkt Wattenscheider Hellweg (LSA 848) von der Stadt Bochum festzeitgesteuert und koordiniert betrieben. Die weiteren LSA an den Knotenpunkten entlang des Zeppelindamms (0295, 0232, 0226 und 0167) werden vom Landesbetrieb Straßenbau NRW betrieben. Diese Anlagen sind teilweise koordiniert und in geringem Grad verkehrsabhängig gesteuert.

Sowohl auf der Berliner Straße als auch auf dem Zeppelindamm befinden sich im Umfeld des Knotenpunkts Wattenscheider Hellweg stationäre Ruhrpilot-Messeinrichtungen. Der Ruhrpilot ist ein Verkehrsmanagementsystem im Ruhrgebiet zur Unterstützung der Straßenbulasträger bei der Steuerung und Lenkung des Verkehrs. Die Daten der beiden Messstellen auf dem Straßenzug wurden für die vorliegende Untersuchung bereitgestellt.

Die Messung auf dem Straßenzug Berliner Straße/Zeppeindamm in Bochum fand am 27.09.2012 statt. Dabei wurden die Zeiträume zwischen 08:00 und 10:00 Uhr (Morgenspitze) sowie zwischen 16:00 und 18:00 Uhr (Abendspitze) aufgenommen. Während beider Zeiträume wurde die gesamte Strecke mit zehn Fahrzeugen, ausgestattet mit GPS-Empfängern, befahren. Die Fahrzeuge entsprachen der Kompakt- und Mittelklasse mit unterschiedlicher Motorisierung.

An den Knotenpunkten Berliner Straße/Burgstraße/Schlaraffiastraße (LSA 898) und Berliner Straße/Wattenscheider Hellweg/Zeppeindamm (LSA 848) wurden die Fahrzeiten der geradeaus fahrenden sowie aller einbiegenden Fahrzeuge (LSA 898) und aller abbiegenden Fahrzeuge (LSA 848) analog zur Gesamtstrecke gemessen. Daraus konnten detaillierte Aussagen zum Einfluss der Pulkbildung im Zufluss an der LSA 848 bezogen auf die Wartezeit an der LSA 848 abgeleitet werden.

Aufgrund der Witterungsbedingungen konnten die Messungen nicht über die gesamten Messzeiträume ausgewertet werden. Sowohl während des Morgenspitzen- als auch während des Abendspitzenzeitraums traten Regenschauer auf. Diese Zeiträume wurden aus der Auswertung ausgeschlossen.

sen. Die Aufzeichnungen während der Morgenspitze konnten daher nicht über einen ausreichend langen zusammenhängenden Zeitraum ausgewertet werden.

4.1.2 GPS-Befahrungen

In Tabelle 4-1 sind die Ergebnisse der Befahrung auf dem Straßenzug Berliner Straße/Zeppelindamm getrennt nach Fahrrichtungen dargestellt. Die Fahrtzeiten auf dem ca. 5 km langen Straßenzug liegen in der Morgenspitze bei ca. 6 Minuten. Die Ergebnisse im Zeitraum der Abendspitze von

16:00 bis 18:00 Uhr ergaben im Vergleich zur Morgenspitze für die Fahrtrichtung Süd deutlich höhere Fahrtzeiten. Dies ist vor allem auf den überlasteten einstreifigen Bereich auf dem Zeppelindamm südlich der LSA 848 (Knotenpunkt Berliner Straße/Wattenscheider Hellweg/Zeppelindamm) zurückzuführen.

Aus den Daten der Ruhrpilot-Messstellen auf den Abschnitten zwischen den LSA 898 und 848 sowie 848 und 0295 (vgl. Bild 4-1) ergab sich, dass die Belastung während der Morgenspitze in Fahrtrichtung Süd zwischen 500 und 600 Kfz/h und Fahrtrichtung Nord zwischen 900 und 1.250 Kfz/h lag.

| Messzeitraum | | Fahrtrichtung Süd | | Fahrtrichtung Nord | |
|-------------------------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | | 08:00-10:00 Uhr | 16:00-18:00 Uhr | 08:00-10:00 Uhr | 16:00-18:00 Uhr |
| Anzahl der Messfahrten | [-] | 51 | 51 | 53 | 51 |
| Fahrtzeit | μ [min] | 5,96 | 9,69 | 6,64 | 6,45 |
| | σ [min] | 0,96 | 1,85 | 0,76 | 0,68 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 1,6 | 8,0 | 2,3 | 2,2 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 118 | 342 | 154 | 147 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 46,9 | 28,8 | 42,6 | 43,3 |

Tab. 4-1: Ergebnisse der GPS-Befahrungen über den gesamten Straßenzug Berliner Straße/Zeppelindamm

| LSA | | 894 | 896 | 898 | 848 | 0295 | 0232 | 0226 | 0167 |
|--|--------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 21,6 | 23,9 | 24,9 | 44,2 | 35,7 | 30,6 | 58,6 | 20,2 |
| Messzeitraum 16:00-17:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 38,5 | 93,7 | 51,3 | 77,2 | 88,6 | 44,1 | 73,9 | 35,0 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 1,2 | 1,4 | 0,5 | 1,2 | 1,4 | 0,1 | 0,5 | 1,1 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 0 | 0 | 55 | 0 | 0 | 86 | 52 | 0 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 16,9 | 69,8 | 26,5 | 32,9 | 52,9 | 13,5 | 15,2 | 14,8 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 28,0 | 17,8 | 33,3 | 40,4 | 28,2 | 48,8 | 47,7 | 28,4 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | D | B | B | D | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | E | C | C | D | B | B | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | F | F | E | F | F | B | E | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | E | C | B | D | B | B | C |
| Messzeitraum 17:00-18:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 38,1 | 93,8 | 48,3 | 130,6 | 117,1 | 45,4 | 72,2 | 35,8 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 1,0 | 1,2 | 0,4 | 1,0 | 1,1 | 0,1 | 0,4 | 0,9 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 3 | 0 | 61 | 0 | 0 | 88 | 58 | 9 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 16,5 | 69,9 | 23,4 | 86,4 | 81,4 | 14,8 | 13,6 | 15,6 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 28,2 | 17,8 | 39,3 | 19,1 | 17,1 | 46,5 | 51,3 | 27,6 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | D | B | E | E | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | E | C | F | F | B | B | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | F | F | E | F | F | B | E | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | E | C | E | E | B | A | C |

Tab. 4-2: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Berliner Straße/Zeppelindamm in der Abendspitze in Fahrtrichtung Süd

In der Abendspitze war die Fahrtrichtung Süd deutlich höher belastet. Für die Fahrtrichtung Nord wurden an beiden Messstellen im Zeitraum von 16:00 bis 18:00 Uhr wieder etwa 1.000 Kfz/h aufgezeichnet, während in der Gegenrichtung Verkehrsstärken zwischen 1.600 und 1.700 Kfz/h auf dem Abschnitt zwischen den LSA 898 und 848 sowie ca. 1.300 Kfz/h auf dem einstreifigen Abschnitt zwischen den LSA 848 und 0295 ermittelt wurden. Neben den Verkehrsstärken zeichnet das Ruhrpilot-System auch Belegungsgrade und Geschwindigkeiten auf. An der Messstelle zwischen den LSA 848 und 0295 wurden deutliche Überlastungserscheinungen mit mittleren Belegungsgraden von 15 % bis 20 % und mittleren Geschwindigkeiten unter 35 km/h im Stundenintervall von 17:00 bis 18:00 Uhr verzeichnet.

Die detaillierte abschnittsweise Auswertung der Messdaten wurde aufgrund der schlechten Witterungsbedingungen während des Morgenspitzenzeitraums nur für die Abendspitze durchgeführt. Die

Überlastung des Straßenzugs im Zeitraum von 17:00 bis 18:00 Uhr für die Fahrtrichtung Süd zeigt sich in der abschnittweisen Auswertung an den Ergebnissen der LSA 848 und 0295. Die Messergebnisse sind in Tabelle 4-2 dargestellt. Am deutlichsten wirken sich die Überlastungen auf die Anzahl der Halte auf den einzelnen Abschnitten aus. Alle Qualitätskriterien geben die Überlastung auf den Abschnitten vor den LSA 848 und 0295 wieder. Die Messstellen des Ruhrpilot-Verkehrsmagementsystems ergaben hier Verkehrsstärken von über 1.700 Kfz/h.

In der Gegenrichtung liegt die Verkehrsstärke in der Abendspitze mit ca. 1.000 Kfz/h im Bereich der Belastung während der Morgenspitze. Die Ergebnisse der Befahrungen in Tabelle 4-3 unterscheiden sich ebenfalls nur geringfügig von denen der Morgenspitze, obwohl die Koordinierung der LSA des Straßenzugs auf die wesentlich stärker belastete Gegenrichtung ausgelegt ist.

| LSA | | 0226 | 0232 | 0295 | 848 | 898 | 896 | 894 | 892 |
|--|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 23,5 | 56,0 | 31,4 | 34,8 | 44,1 | 24,9 | 27,8 | 21,9 |
| Messzeitraum 16:00-17:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 44,6 | 71,0 | 46,8 | 59,6 | 55,2 | 40,5 | 53,9 | 26,2 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,7 | 0,0 | 0,2 | 0,3 | 0,3 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 67 | 43 | 73 | 0 | 93 | 87 | 53 | 70 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 21,1 | 15,0 | 15,5 | 24,8 | 11,1 | 15,6 | 26,1 | 4,4 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 26,3 | 47,3 | 46,9 | 40,9 | 55,9 | 43,1 | 31,0 | 41,7 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | A | B | A | A | B | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | B | B | C | B | B | C | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | D | F | D | F | B | B | E | D |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | B | B | B | B | B | C | A |
| Messzeitraum 17:00-18:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 46,1 | 69,1 | 45,2 | 58,3 | 56,8 | 37,2 | 50,7 | 23,6 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,6 | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,2 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 80 | 53 | 83 | 30 | 90 | 97 | 77 | 87 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 22,6 | 13,1 | 13,8 | 23,5 | 12,7 | 12,2 | 22,8 | 1,7 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 25,5 | 48,6 | 48,6 | 41,8 | 54,3 | 47,0 | 33,0 | 46,4 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | A | B | A | A | B | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | B | B | C | B | B | C | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | C | E | C | F | B | A | C | B |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | B | B | B | B | B | C | A |

Tab. 4-3: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Berliner Straße/Zepplindamm in der Abendspitze in Fahrtrichtung Nord

4.1.3 Fahrtzeiterhebungen

Im Diagramm in Bild 4-2 sind die Einzelwerte der Fahrtzeiten in der Abendspitze von 16:00 bis 18:00 Uhr dargestellt. Wie in den Ergebnissen der GPS-Befahrungen und den Daten der Ruhrpilot-Messstationen zeigt sich in den Ergebnissen ein kontinuierlicher Anstieg der Fahrtzeiten über den Messzeitraum. Die Wiedererkennungsrates der Fahrzeuge hängt stark von den örtlichen Lichtverhältnissen sowie der Einrichtung der Erfassungsgereäte ab. Die Lichtverhältnisse im Messzeitraum variierten stark, sodass einzelne Zeitbereiche mit hohen Wiedererkennungsrates und Zeitbereiche mit geringen Raten auftraten. Der Rückgang der Anzahl der Werte gegen Ende des Erfassungsbereichs ist jedoch eine Folge der Überlastung des Straßenzugs. Dadurch stiegen die Fahrtzeiten so stark an,

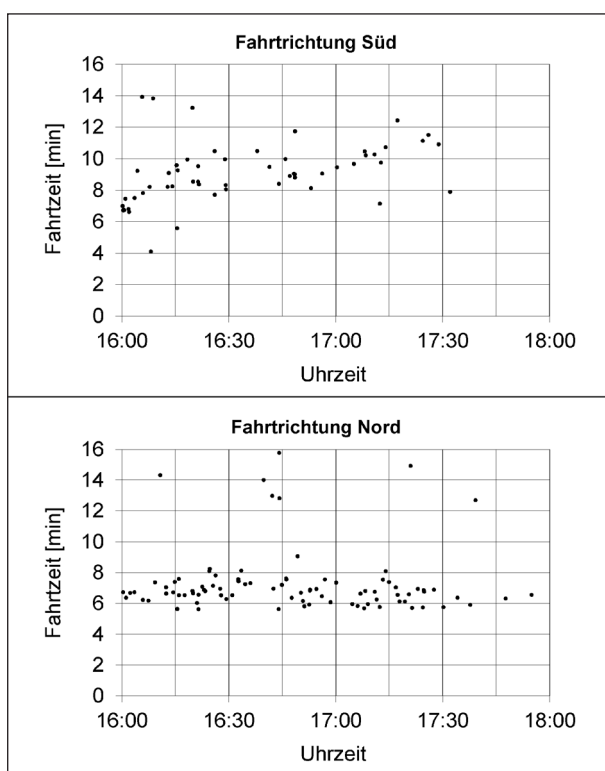


Bild 4-2: Einzelwerte der Fahrtzeiterhebungen über den gesamten Straßenzug Berliner Straße/Zepplindamm

dass Fahrten mit Beginn nach 17:30 Uhr nicht vor Ende der Aufzeichnungen beendet wurden, und außerdem verringerten sich die Abstände zwischen den einzelnen Fahrzeugen so stark, dass viele Fahrzeuge von nachfolgenden Fahrzeugen verdeckt und nicht zuverlässig erfasst werden konnten. Die in Tabelle 4-4 angegebenen Mittelwerte der Fahrtzeiten liegen im Bereich der Ergebnisse der GPS-Befahrungen (vgl. Tabelle 4-1) und liefern somit plausible Ergebnisse.

In Fahrtrichtung Nord liegen im selben Zeitraum die meisten Einzelwerte zwischen fünf und neun Minuten Fahrtzeit, einzelne Werte liegen jedoch deutlich über diesem Bereich. Die Standardabweichung der Fahrtzeiten von 2,08 Minuten (Tabelle 4-4) gegenüber dem Wert von 0,68 Minuten der GPS-Befahrungen (Tabelle 4-1) ist auf den Einfluss dieser Ausreißerwerte zurückzuführen.

Während der Befahrungen des gesamten Straßenzugs Berliner Straße/Zepplindamm wurden für den Abschnitt zwischen den LSA 848 und 898 weitere Erhebungen von Fahrtzeiten im Zeitraum von 16:00 bis 18:00 Uhr durchgeführt. Die Erfassungsgereäte an den beiden Knotenpunkten wurden so positioniert, dass eine Unterscheidung von einbiegenden und geradeaus fahrenden Fahrzeugen direkt nach der LSA 898 und von abbiegenden und geradeaus fahrenden Fahrzeugen an der LSA 848 möglich war. An der LSA 898 diente ein virtueller Querschnitt im Abfluss des Knotenpunkts als Bezugsquerschnitt. An der LSA 848 wurde die Überfahrzeit der Haltlinien möglichst exakt festgehalten. Die Distanz zwischen den beiden Querschnitten beträgt ca. 780 m. Die Darstellung in Bild 4-3 zeigt alle Fahrtzeiten zwischen den beiden Querschnitten, die Mittelwerte und Standardabweichungen enthält Tabelle 4-5. Analog zu den bisherigen Auswertungen ist der Anstieg der Fahrtzeiten gegen Ende des Erhebungszeitraums zu erkennen. Die Umlaufzeit der LSA 848 beträgt 90 s. Die reine Freigabezeit für den geradeaus fahrenden Verkehrstrom liegt bei 26 s. Ausgehend von einer Fahrt

| Messzeitraum 16:00-18:00 Uhr | | Fahrtrichtung Süd | Fahrtrichtung Nord |
|------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Anzahl erfasster Fahrzeuge | [-] | 58 | 90 |
| Fahrtzeit | μ [min] | 9,07 | 7,29 |
| | σ [min] | 1,89 | 2,08 |
| Fahrtgeschwindigkeit | μ [km/h] | 31,4 | 40,8 |
| | σ [km/h] | 7,5 | 7,2 |

Tab. 4-4: Ergebnisse der Fahrtzeitermittlung über den gesamten Straßenzug Berliner Straße/Zepplindamm in der Abendspitze

ohne Behinderungen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h ergibt sich eine Fahrtzeit von ca. 40 s zwischen den beiden Erfassungsquerschnitten. Die Fahrtzeit auf dem Abschnitt liegt in der Stunde von 16:00 bis 17:00 Uhr bei etwa 77 s. Daraus ergibt sich eine Verlustzeit von ca. 37 s gegenüber einer freien Durchfahrt. Zwischen 16:20 und 16:30 Uhr zeigt sich eine geringfügige Störung des Verkehrsablaufs. Nach 17:15 Uhr steigen alle Fahrtzeiten deutlich an und die Fahrzeuge können den Abschnitt nur noch mit Verlustzeiten von 120 s und mehr passieren.

Bild 4-4 (links) zeigt die Fahrtzeiten aller an der LSA 898 geradeaus in den Abschnitt einfahrenden Fahr-

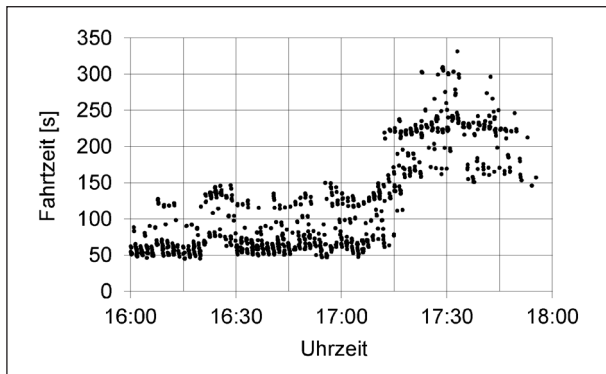


Bild 4-3: Einzelwerte der Fahrtzeiterhebungen auf dem Abschnitt zwischen den LSA 898 und 848 des Straßenzugs Berliner Straße in Fahrtrichtung Süd

zeuge unterteilt in abbiegende und geradeaus fahrende Fahrzeuge an der LSA 848. Aus der Grafik wird deutlich, dass ein Großteil der Fahrzeuge, die an beiden Knotenpunkten geradeaus fahren, den Abschnitt mit einer Fahrtzeit von etwa 60 s durchfahren konnte. Die Betrachtung des Grünbandes zwischen den beiden Knotenpunkten zeigte, dass die zu Beginn der Freigabezeit an der LSA 898 in den Straßenzug einfahrenden Fahrzeuge während der Sperrzeit an der LSA 848 etwa 15 s vor Beginn der Freigabezeit eintreffen. Da die einbiegenden Fahrzeuge an der LSA 898 vor den geradeaus fahrenden Fahrzeugen freigegeben werden, treffen die an der LSA 898 geradeaus fahrenden Fahrzeuge auf die bereits wartenden Fahrzeuge an der LSA 848. Nur in Ausnahmefällen erreichten die Rechtsabbieger von der LSA 898 die Freigabezeit der Linksabbieger an der LSA 848 (Bild 4-4 rechts).

4.2 Lünen: Konrad-Adenauer-Straße/ Dortmundener Straße

4.2.1 Beschreibung des Straßenzugs

Die Stadt Lünen mit ca. 90.000 Einwohnern liegt am nordöstlichen Rand des Ruhrgebiets. Aus der geografischen Lage ergibt sich ein hoher Anteil an Pendler- und Durchgangsverkehr innerhalb des

| Fahrtrichtung Süd von LSA 898 nach LSA 848 | | | | | | | | |
|--|------------------------|--------------------------|-------------|-------|-----------|-------|----------------------|-------|
| Messzeitraum | q _g [Kfz/h] | q _{ein} [Kfz/h] | Verlustzeit | | Fahrtzeit | | Fahrtgeschwindigkeit | |
| | | | μ [s] | σ [s] | μ [s] | σ [s] | μ [s] | σ [s] |
| 16:00-17:00 Uhr | 1.588 | 125 | 37,4 | 31,0 | 77,5 | 31,0 | 40,4 | 12,0 |
| 17:00-18:00 Uhr | 1.994 | 377 | 131,5 | 68,5 | 171,3 | 68,3 | 20,7 | 12,1 |
| 16:00-18:00 Uhr | 3.282 | 502 | 80,1 | 68,9 | 120,1 | 68,7 | 31,2 | 15,3 |

Tab. 4-5: Ergebnisse der Fahrtzeiterhebungen auf dem Abschnitt zwischen den LSA 898 und 848 des Straßenzugs Berliner Straße in der Abendspitze in Fahrtrichtung Süd

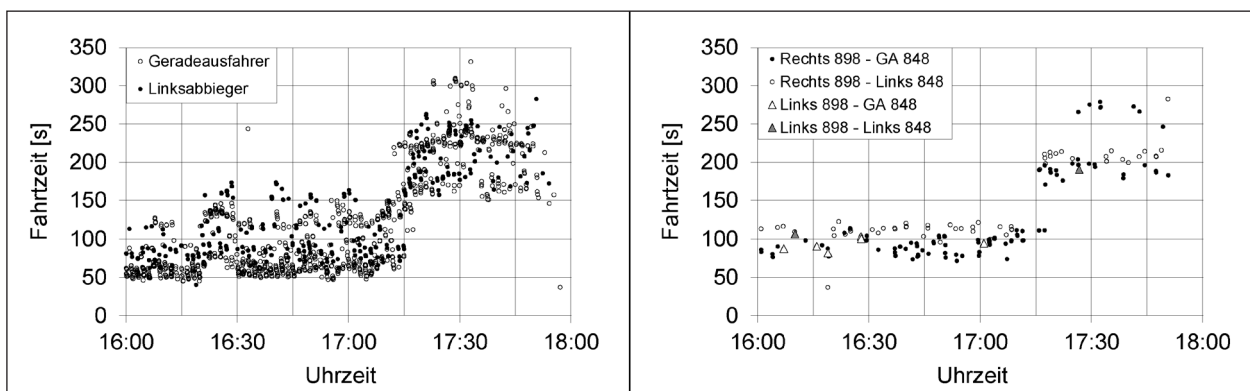


Bild 4-4: Fahrtzeiten zwischen den LSA 898 und 848 des Straßenzugs Berliner Straße in Fahrtrichtung Süd nach Fahrbeziehungen


Stadtgebiets. Zudem sorgen die beiden Brücken über die Lippe östlich und westlich des Stadtzentrums für eine zusätzliche Bündelung der Verkehrsströme auf den Hauptverkehrsstraßen. Der Straßenzug Konrad-Adenauer-Straße/Dortmunder Straße liegt westlich des Stadtzentrums und bildet in Verbindung mit der Bundesstraße B 236n die Hauptverbindung zum Ruhrgebiet über die südlich gelegene Anschlussstelle der Autobahn A 2 am Autobahnkreuz Dortmund-Nordost.

Die Untersuchungsstrecke ist in Bild 4-5 dargestellt. Der Straßenzug besteht aus zwei Abschnitten. Der erste Abschnitt, die Dortmunder Straße (B 54/B 236), beginnt am Kreuzungsbereich mit der Kupferstraße und verläuft bis zum Knotenpunkt Dortmunder Straße/Konrad-Adenauer-Straße/Viktoriastraße. Die Konrad-Adenauer-Straße zweigt an diesem Knotenpunkt nach Norden ab. Für die Linksabbieger stadteinwärts in Fahrtrichtung Norden sind zwei Abbiegefahrstreifen eingerichtet. Den Rechtsabbiegern aus der Konrad-Adenauer-Straße in die Dortmunder Straße in Richtung stadtauswärts steht ein Abbiegefahrstreifen zur Verfügung. Die Konrad-Adenauer-Straße verläuft weiter in Richtung Norden über eine vorfahrtsregelte Einmündung mit einer signalgeregelten Fußgängerquerungsanlage (Friedrichstraße). Bis zum darauffolgenden Knotenpunkt Moltkestraße ist die Konrad-Adenauer-Straße in Richtung Norden zweistreifig und in Richtung Süden einstreifig ausgebaut. Der Abbiegeverkehr in die Moltkestraße wird in beiden Fahrrichtungen über eigene Fahr-

streifen geführt. Im weiteren Streckenverlauf der Konrad-Adenauer-Straße wird der durchgehende Verkehr in beiden Fahrtrichtungen einstreifig über die Lippebrücke bis zum Knotenpunkt am Hallenbad geführt. Von diesem Knotenpunkt bis zum Ende der Untersuchungsstrecke sind beide Fahrtrichtungen zweistreifig ausgebaut. Am Knotenpunkt Hallenbad steht der linke Fahrstreifen in Fahrtrichtung stadtauswärts dem Abbiegeverkehr zur Verfügung und wird im folgenden einstreifigen Abschnitt nicht weitergeführt. Sowohl an den einstreifigen als auch an den zweistreifigen Streckenabschnitten stehen den Linksabbiegern über den gesamten Straßenzug eigene Fahrstreifen zur Verfügung.

Zwischen der Lippebrücke und dem Knotenpunkt Konrad-Adenauer-Straße/Hallenbad sind beidseitig etwa 150 m lange Parkstreifen angeordnet. Ansonsten herrscht durch den straßenbegleitenden Radfahrweg ein Halteverbot an den Fahrbahnrändern über den gesamten Straßenzug. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt auf dem gesamten Straßenzug 50 km/h.

Die Stadt Lünen hat ihr Verkehrsrechnersystem in den Jahren 2011 und 2012 erneuert. Die LSA des Untersuchungsgebietes werden verkehrabhängig betrieben mit einem zusätzlichen Verfahren zur Online-Versatzzeit-Optimierung. Für den Zeitraum der Messungen im Rahmen dieser Untersuchung wurden die Anlagen durch die Stadt Lünen in die vorhandenen Festzeiterersatzprogramme umge-



| LSA | Nebenstraßen |
|-----|---|
| K24 | Dortmunder Straße / Kupferstraße |
| K33 | Dortmunder Straße / Konrad-Adenauer-Straße / Viktoriastraße |
| K38 | Konrad-Adenauer-Straße / Friedrichstraße |
| K34 | Konrad-Adenauer-Straße / Moltkestraße |
| K35 | Konrad-Adenauer-Straße / Marie-Juchacz-Straße |
| K40 | Konrad-Adenauer-Straße / Hallenbad |
| K41 | Konrad-Adenauer-Straße / Altstadtstraße |
| K39 | Konrad-Adenauer-Straße / Borker Straße |

Bild 4-5: LSA-Bezeichnungen und kreuzende Nebenstraßen des Straßenzugs Dortmunder Straße/Konrad-Adenauer-Straße in Lünen (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

schaltet. Bei einer Länge von etwa 2.150 m umfasst der Straßenzug insgesamt sieben LSA-gesteuerte Knotenpunkte und eine Fußgängerschutzanlage. Alle Knotenpunkte sind mit Schleifendetektoren in den Zufahrten ausgestattet, zum Teil werden auch die Abflüsse detektiert. Die Verkehrsbelastungen werden über die Detektorprotokolle aufgezeichnet und wurden für die Verwendung in dieser Untersuchung zur Verfügung gestellt. Die Programmwechsel werden über eine Wochenautomatik tageszeitabhängig über den Verkehrsrechner geschaltet. In der Morgen- und Abendspitze beträgt die Umlaufzeit jeweils 100 s.

Die Messung des Abendspitzenzeitraums von 16:00 bis 18:00 Uhr wurde am 26.09.2013 durchgeführt. Am darauffolgenden Tag wurde die Morgenspitze von 07:00 bis 10:00 Uhr aufgenommen. Dieser Messzeitraum wurde von den geplanten zwei Stunden auf drei Stunden ausgedehnt, da die Verbindungen zwischen einigen LSA und dem Hauptverkehrsrechner durch einen technischen Defekt zeitweise unterbrochen waren. In beiden Zeiträumen wurden sowohl GPS-Aufzeichnungen als auch Fahrtzeiterhebungen mit Videotechnik vorgenommen.

4.2.2 GPS-Befahrungen

Tabelle 4-6 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse der GPS-Befahrungen. Die Kennwerte in Fahrtrichtung Ost liegen deutlich über den Werten in der Gegenrichtung. Die niedrigeren Werte sind im Wesentlichen auf die Ausrichtung der Koordinierung der Signalprogramme zurückzuführen. Die Hauptrichtung der Koordinierung ist sowohl im Abend- als auch im Morgenspitzenzeitraum die Fahrtrichtung West. Die gleichzeitigen Messungen mit Seitenradargeräten lieferten in der Abendspitze Verkehrsstärken von 1409 Kfz/2h in Fahrtrichtung

West gegenüber 1132 Kfz/2h in der Gegenrichtung. Die Messung in der Morgenspitze von 08:00 bis 10:00 Uhr ergab Verkehrsstärken von 2857 Kfz/4h in Fahrtrichtung West und 1671 Kfz/4h in Fahrtrichtung Ost.

In Tabelle 4-7 sind die Abschnittsergebnisse in Fahrtrichtung Ost enthalten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bewertung unter Berücksichtigung der Halte bzw. der mittleren Geschwindigkeit auf den Abschnitten tendenziell zu einer niedrigeren Einstufung der Verkehrsqualität führen als unter Berücksichtigung der Verlustzeiten auf den Abschnitten. Die am Ende des Straßenzugs stadteinwärts gelegenen Knotenpunkte zeigen in allen Bewertungsverfahren eine mangelhafte oder ungenügende Verkehrsqualität.

Die Ergebnisse der abschnittsbezogenen Auswertung der Befahrungen für die Fahrtrichtung West sind in Tabelle 4-8 dargestellt. Wiederum wird deutlich, dass das Kriterium nach HBS 2001 (Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt) zur niedrigsten Bewertung aller vier betrachteten Qualitätskriterien führt.

Während der Morgenspitze war die Verbindung zwischen dem Hauptverkehrsrechner und einigen LSA gestört. Für diese Anlagen konnten daher keine Verkehrsstärken aufgezeichnet werden. Die Verkehrsstärken dienen als Eingangswerte für die späteren Berechnungen der Verlustzeiten. Die Ergebnisse der abschnittswisen Auswertungen bilden in dieser Untersuchung in erster Linie die Grundlage für die Analyse der analytischen Verfahren zur Schätzung der Verlustzeiten an koordiniert gesteuerten Knotenpunkten. Für den Morgenspitzenzeitraum wurde daher keine detaillierte abschnittswise Auswertung der GPS-Messungen durchgeführt.

| Messzeitraum | Fahrtrichtung Ost | | Fahrtrichtung West | | |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|------|
| | 08:00-10:00 Uhr | 16:00-18:00 Uhr | 08:00-10:00 Uhr | 16:00-18:00 Uhr | |
| Anzahl der Messfahrten [-] | 19 | 17 | 21 | 17 | |
| Fahrzeit | μ [min] | 4,96 | 6,32 | 4,39 | 3,72 |
| | σ [min] | 0,71 | 1,13 | 1,02 | 0,66 |
| Mittlere Anzahl der Halte [-] | 3,7 | 5,2 | 2,8 | 1,2 | |
| Mittlere Verlustzeit [s] | 143 | 225 | 110 | 70 | |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit [km/h] | 25,6 | 20,0 | 28,9 | 34,1 | |

Tab. 4-6: Ergebnisse der GPS-Befahrungen über den gesamten Straßenzug Dortmunder Straße/Konrad-Adenauer-Straße

| LSA | | K33 | K38 | K34 | K35 | K40 | K41 | K39 |
|--|--------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 46,7 | 9,9 | 17,4 | 21,7 | 29,7 | 20,3 | 8,4 |
| Messzeitraum 16:00-17:00 Uhr | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 77,8 | 42,9 | 22,5 | 28,7 | 36,5 | 110,5 | 84,0 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,5 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 3,2 | 1,4 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 59 | 59 | 88 | 94 | 94 | 6 | 6 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 31,2 | 33,0 | 5,0 | 7,0 | 6,8 | 90,2 | 75,6 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 29,7 | 11,2 | 39,3 | 38,5 | 41,1 | 9,2 | 3,6 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | B | A | A | A | E | E |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | C | A | A | A | F | E |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | E | E | B | B | B | F | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | F | B | B | A | F | F |
| Messzeitraum 17:00-18:00 Uhr | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 78,1 | 40,2 | 21,9 | 31,9 | 36,8 | 90,6 | 83,6 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,5 | 0,4 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 2,7 | 1,2 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 53 | 65 | 88 | 88 | 94 | 6 | 6 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 31,4 | 30,2 | 4,5 | 10,2 | 7,1 | 70,3 | 75,2 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 29,7 | 12,1 | 40,3 | 34,4 | 40,7 | 11,2 | 3,6 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | B | A | A | A | E | E |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | C | A | B | A | E | E |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | E | D | B | B | B | F | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | F | A | B | A | F | F |

Tab. 4-7: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Dortmunder Straße/ Konrad-Adenauer-Straße in der Abendspitze in Fahrtrichtung Ost

| LSA | | K41 | K40 | K35 | K34 | K38 | K33 | K24 |
|--|--------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 8,7 | 19,5 | 29,0 | 22,0 | 20,7 | 7,7 | 45,9 |
| Messzeitraum 16:00-17:00 Uhr | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 17,4 | 30,0 | 40,6 | 37,4 | 33,0 | 13,3 | 65,2 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,1 | 0,0 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,6 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 94 | 100 | 71 | 65 | 82 | 94 | 65 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 8,6 | 10,5 | 11,6 | 15,4 | 12,3 | 5,6 | 19,2 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 23,9 | 33,0 | 36,0 | 29,8 | 31,8 | 30,1 | 33,4 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | A | B | B | B | B | A | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | B | A | D | D | C | B | D |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | D | B | B | C | B | B | B |
| Messzeitraum 17:00-18:00 Uhr | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 27,8 | 28,5 | 37,4 | 29,8 | 30,5 | 16,2 | 48,1 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,3 | 0,0 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 71 | 100 | 82 | 82 | 88 | 88 | 88 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 19,1 | 9,0 | 8,3 | 7,7 | 9,8 | 8,5 | 2,1 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 15,0 | 34,8 | 39,2 | 37,7 | 34,3 | 24,4 | 45,5 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | D | A | C | C | B | B | B |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | E | B | B | B | B | D | A |

Tab. 4-8: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Dortmunder Straße/ Konrad-Adenauer-Straße in der Abendspitze in Fahrtrichtung West

4.2.3 Fahrtzeiterhebungen

Zusätzlich zu den GPS-Befahrungen wurden Fahrtzeitmessungen mit Videotechnik durchgeführt. Tabelle 4-9 enthält die aggregierten Kenngrößen der Messungen. In beiden Messzeiträumen ergab sich für die Fahrtrichtung West eine deutlich höhere Anzahl an Durchfahrern vom ersten Knotenpunkt im Innenstadtbereich (K41) bis zum letzten Knotenpunkt stadtauswärts (K24). Die Fahrtrichtung West entspricht in beiden Zeiträumen der Hauptkoordinierungsrichtung der LSA-Steuerungen. Die ausgewerteten Kenngrößen in beiden Messzeiträumen liegen folglich auch unter den Werten in Fahrtrichtung Ost.

In beiden Messzeiträumen zeigt sich in den Darstellungen der Einzelwerte in Bild 4-6 eine deutlich geringere Streuung der Werte in Fahrtrichtung

West. Die Mehrzahl der erfassten Werte liegt im Bereich einer Fahrtzeit von knapp unter 5 Minuten. Die Werte in Fahrtrichtung Ost streuen hingegen stärker.

4.3 Wuppertal: Carnaper Straße/Steinweg

4.3.1 Beschreibung des Straßenzugs

Der Straßenzug Carnaper Straße/Steinweg liegt im Stadtteil Wuppertal-Barmen und wird als Hauptverbindung zwischen der Bundesstraße B 7 und der Anschlussstelle 35 an die Autobahn A 46 genutzt. Die LSA der zehn auf dem Straßenzug befindlichen Knotenpunkte (Bild 4-7) werden im Normalbetrieb mit einer verkehrsabhängigen Steuerung betrieben. Für die Messungen im Rahmen der vorliegenden

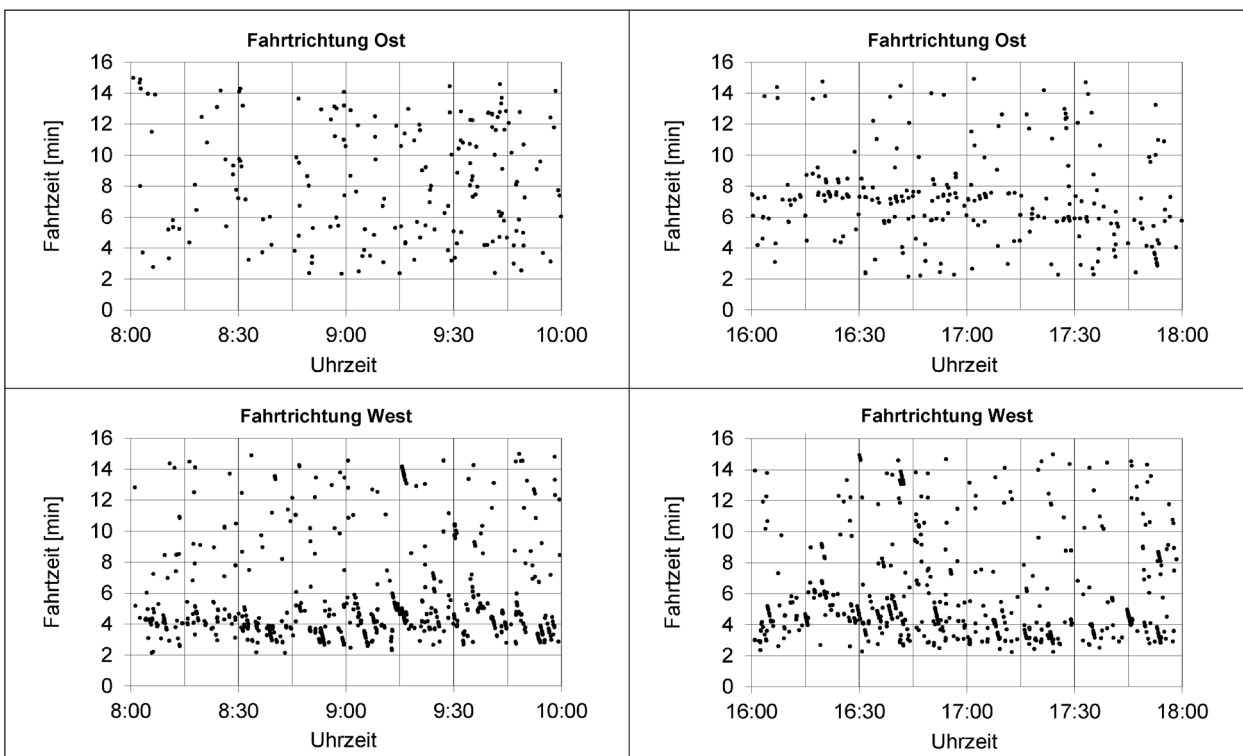


Bild 4-6: Einzelwerte der Fahrtzeiterhebungen über den gesamten Straßenzug Dortmunder Straße/Konrad-Adenauer-Straße

| Messzeitraum | Fahrtrichtung Ost | | Fahrtrichtung West | | |
|----------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|------|
| | 16:00-18:00 Uhr | 08:00-10:00 Uhr | 16:00-18:00 Uhr | 08:00-10:00 Uhr | |
| Anzahl erfasster Fahrzeuge | 297 | 249 | 672 | 1086 | |
| Fahrtzeit | μ [min] | 7,23 | 5,79 | 5,39 | |
| | σ [min] | 2,88 | 3,63 | 3,27 | 3,14 |
| Fahrtgeschwindigkeit | μ [km/h] | 21,2 | 20,2 | 28,0 | 29,7 |
| | σ [km/h] | 10,2 | 11,5 | 11,4 | 11,1 |

Tab. 4-9: Ergebnisse der Fahrtzeiterhebungen über den gesamten Straßenzug Dortmunder Straße/Konrad-Adenauer-Straße

Untersuchung wurden die tageszeitabhängigen Festzeiterersatzprogramme geschaltet. Alle Anlagen sind im Verkehrsrechnersystem der Stadt Wuppertal integriert. Dem Hauptverkehr stehen in beiden Fahrtrichtungen durchgängig zwei Fahrstreifen zur Verfügung. Die Knotenpunkte, an denen links abgebogen werden darf, verfügen über gesonderte Abbiegefahrstreifen. Der Rechtsabbiegerverkehr wird bei besonders hoch belasteten Fahrbeziehungen, wie an den LSA 383 und 354, ebenfalls gesondert geführt oder durch Dreiecksinseln vorfahrtgeregelt abgeleitet (379, 356 und 353). Zwischen den eng aufeinanderfolgenden LSA 355 bis 353 sind die Richtungsfahrbahnen baulich voneinander getrennt. Über den gesamten Straßenzug sind seitliche Park- und Gehwegflächen angeordnet. Der Straßenzug ist größtenteils angebaut mit geschlossener Bebauung. Entlang des Straßenzugs liegen zwei vorfahrtgeregelt Einmündungen, die aufgrund ihrer geringen Belastungen keinen Einfluss auf den Verkehrsablauf haben. Zwischen den LSA 383 und 353 verlaufen neun Buslinien des ÖPNV. Im Verlauf des Straßenzugs befinden sich fünf Haltestellen je Fahrtrichtung, die bis auf drei Bereiche an den LSA 172 und 046 beidseitig als Haltebuchten angelegt sind.

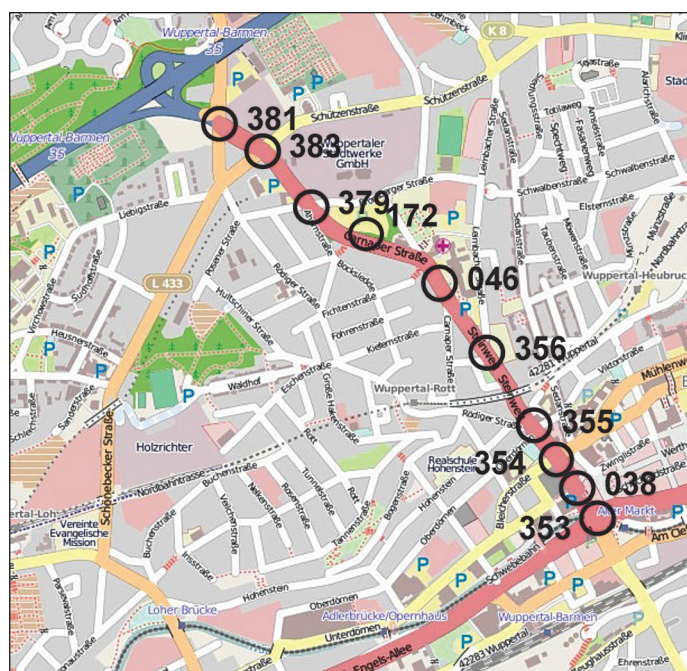
Auf dem Straßenzug wurden die Messungen analog zu den anderen Straßenzügen während der Morgen- und der Abendspitze vorgenommen. Für die Morgenspitze wurde in Absprache mit der Stadt Wuppertal der Zeitraum von 08:00 bis 10:00 Uhr

festgelegt. Die Messung der Abendspitze erfolgte zwischen 14:00 und 17:00 Uhr. Durch den Beginn der Messung um 14:00 Uhr konnte der Anstieg der Verkehrsbelastung im Vorfeld des Spitzenzeitrums zwischen 16:00 und 18:00 Uhr in die Messung einbezogen werden. Der Messaufbau wurde analog zu den anderen Messungen dieser Untersuchung gewählt. Insgesamt zehn Messfahrzeuge unterschiedlicher Motorisierungsklassen wurden für die Befahrung mit GPS-Empfängern eingesetzt. An der LSA 381 (Knotenpunkt Carnaper Straße/AS Wuppertal-Barmen/Hatsfelder Straße) und der LSA 353 (Knotenpunkt Steinweg/Alter Markt) wurden die durchfahrenden Fahrzeuge in beiden Fahrtrichtungen aufgezeichnet.

Von 09:00 bis 15:00 Uhr war der Abschnitt zwischen den LSA 172 und 048 nur ein- und nicht wie üblich zweistreifig befahrbar. Grund für die Einschränkung war eine Tagesbaustelle in diesem Bereich. Während der Messungen konnten jedoch keine erheblichen Beeinträchtigungen des Verkehrsablaufs festgestellt werden.

4.3.2 GPS-Befahrungen

In Tabelle 4-10 sind die Ergebnisse der GPS-gestützten Befahrungen des Straßenzugs getrennt nach Fahrtrichtungen und Messzeitraum dargestellt. Unabhängig von der Fahrtrichtung sind die Kenngrößen in der Morgenspitze nahezu gleich



| LSA | Nebenstraßen |
|-----|-----------------------|
| 381 | AS Wuppertal-Barmen |
| 383 | Schützenstraße |
| 379 | Bromberger Straße |
| 172 | FSA |
| 046 | FSA (Carnaper Straße) |
| 356 | Leimbacher Straße |
| 355 | Oberdörnen |
| 354 | Bleicher Straße |
| 038 | FSA (Unterdörnen) |
| 353 | Alter Markt |

Bild 4-7: LSA-Bezeichnungen und kreuzende Nebenstraßen des Straßenzugs Carnaper Straße/Steinweg in Wuppertal (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

groß. Im Nachmittagszeitraum liegen die Kenngrößen insgesamt über den Werten der Morgenspitze. Die höchsten Werte ergab die Messung für die Nachmittagsspitze in Fahrtrichtung Süd mit einer mittleren Fahrtzeit von 5,07 Minuten.

Die abschnittsbezogenen Auswertungen der Befahrungen in der Morgenspitze für die Fahrtrichtung Süd sind in Tabelle 4-11 und für die Fahrtrichtung Nord in Tabelle 4-12 dargestellt.

Der Straßenzug Carnaper Straße/Steinweg fällt in Fahrtrichtung Süd von der Autobahn A 46 in Richtung Stadtzentrum durchgehend mit teilweise über

7 % Gefälle ab. Ebene Streckenabschnitte sind kaum vorhanden. In den Ergebnissen der abschnittsweisen Auswertungen spiegelt sich der Gradientenverlauf des Straßenzugs jedoch nicht direkt wider. Die mittleren Geschwindigkeiten liegen in Fahrtrichtung Nord sogar teilweise über denen in Gegenrichtung. In beiden Fahrtrichtungen ergibt die Einstufung der Verkehrsqualität nach BRILON, SCHNABEL (2003) auf Basis der mittleren Geschwindigkeit tendenziell die niedrigste Qualitätsstufe.

Die Ergebnisse der Abschnittsbetrachtung für den Nachmittagszeitraum sind in Tabelle 4-13 und Tabelle 4-14 enthalten. In diesem Zeitraum liegt das

| Messzeitraum | Fahrtrichtung Süd | | Fahrtrichtung Nord | |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | 08:00-10:00 Uhr | 14:00-16:00 Uhr | 08:00-10:00 Uhr | 14:00-16:00 Uhr |
| Anzahl der Messfahrten [-] | 55 | 74 | 60 | 66 |
| Fahrtzeit | μ [min] | 3,25 | 5,07 | 3,17 |
| | σ [min] | 0,91 | 3,64 | 0,91 |
| Mittlere Anzahl der Halte [-] | 2,6 | 5,2 | 2,3 | 4,3 |
| Mittlere Verlustzeit [s] | 85 | 194 | 80 | 113 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit [km/h] | 25,3 | 15,2 | 25,6 | 19,5 |

Tab. 4-10: Ergebnisse der GPS-Befahrungen über den gesamten Straßenzug Carnaper Straße/Steinweg in der Morgenspitze

| LSA | 379 | 172 | 046 | 356 | 355 | 354 | 038 | 353 | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| Ideale Fahrtzeit [s] | 16,3 | 11,8 | 23,2 | 15,1 | 18,9 | 9,0 | 9,0 | 6,7 | |
| Messzeitraum 08:00-09:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit [s] | 32,9 | 15,0 | 31,6 | 16,7 | 35,8 | 19,3 | 18,1 | 16,2 | |
| Mittlere Anzahl der Halte [-] | 0,9 | 0,0 | 0,3 | 0,0 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | |
| Durchfahrten ohne Halt [%] | 12 | 95 | 93 | 98 | 78 | 76 | 80 | 76 | |
| Mittlere Verlustzeit [s] | 16,6 | 3,3 | 8,4 | 1,6 | 16,9 | 10,3 | 9,1 | 9,5 | |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit [km/h] | 22,1 | 35,2 | 32,8 | 40,7 | 23,3 | 20,3 | 22,0 | 17,6 | |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | A | A | A | A | A | A | A | A | |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | B | A | A | A | B | B | A | A | |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | F | A | B | A | C | C | C | C | |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | F | B | B | A | D | D | D | E | |
| Messzeitraum 09:00-10:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit [s] | 33,7 | 16,2 | 33,7 | 18,4 | 38,0 | 26,5 | 18,0 | 18,2 | |
| Mittlere Anzahl der Halte [-] | 0,9 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | |
| Durchfahrten ohne Halt [%] | 15 | 90 | 87 | 95 | 74 | 64 | 74 | 69 | |
| Mittlere Verlustzeit [s] | 17,3 | 4,5 | 10,5 | 3,3 | 19,1 | 17,5 | 8,9 | 11,5 | |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit [km/h] | 20,5 | 30,4 | 28,3 | 38,0 | 21,8 | 17,9 | 22,0 | 18,7 | |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | A | A | A | A | A | A | A | A | |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | B | A | B | A | B | B | A | B | |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | F | B | B | A | D | E | D | D | |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | D | B | C | B | D | E | D | E | |

Tab. 4-11: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Carnaper Straße/Steinweg in der Morgenspitze in Fahrtrichtung Süd

| LSA | | 038 | 354 | 355 | 356 | 046 | 172 | 379 | 383 |
|--|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 10,3 | 6,0 | 9,8 | 18,7 | 17,5 | 23,2 | 8,7 | 16,2 |
| Messzeitraum 08:00-09:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 31,4 | 14,8 | 25,3 | 19,1 | 17,4 | 29,2 | 27,9 | 34,2 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,7 | 0,5 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 71 | 78 | 71 | 100 | 98 | 80 | 44 | 51 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 21,0 | 8,8 | 15,5 | 0,4 | 0 | 6,0 | 19,2 | 18,1 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 14,2 | 17,9 | 16,8 | 43,7 | 45,8 | 35,7 | 13,5 | 20,6 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | A | B | A | A | A | B | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | D | C | D | A | A | C | F | E |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | F | E | E | A | A | B | F | D |
| Messzeitraum 09:00-10:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 29,4 | 13,6 | 21,4 | 20,4 | 19,2 | 28,2 | 21,8 | 34,4 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,7 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 74 | 86 | 77 | 95 | 93 | 84 | 65 | 37 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 19,1 | 7,6 | 11,6 | 1,7 | 1,7 | 5,0 | 13,1 | 18,3 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 15,2 | 18,4 | 19,8 | 40,9 | 41,3 | 37,0 | 17,2 | 20,4 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | A | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | A | B | A | A | A | B | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | D | B | C | A | B | C | D | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | E | E | E | A | A | B | E | D |

Tab. 4-12: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Carnaper Straße/Steinweg in der Morgenspitze in Fahrtrichtung Nord

| LSA | | 379 | 172 | 046 | 356 | 355 | 354 | 038 | 353 |
|--|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 16,3 | 11,8 | 23,2 | 15,1 | 18,9 | 9,0 | 9,0 | 6,7 |
| Messzeitraum 14:00-15:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 44,9 | 21,4 | 30,3 | 22,0 | 34,3 | 22,3 | 25,4 | 24,5 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,9 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,7 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 17 | 83 | 85 | 96 | 83 | 72 | 77 | 55 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 28,6 | 9,6 | 7,1 | 6,9 | 15,5 | 13,2 | 16,4 | 17,8 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 16,1 | 25,4 | 35,2 | 32,5 | 29,0 | 17,6 | 15,7 | 10,7 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | A | A | A | B | B | B | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | F | C | B | B | C | D | C | E |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | E | C | B | B | C | E | E | F |
| Messzeitraum 15:00-16:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 45,6 | 22,4 | 44,4 | 42,2 | 55,7 | 31,4 | 34,2 | 24,9 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,9 | 0,2 | 0,7 | 0,5 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,7 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 10 | 74 | 65 | 70 | 54 | 45 | 51 | 51 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 29,3 | 10,6 | 21,2 | 27,1 | 36,9 | 22,4 | 25,1 | 18,2 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 15,8 | 24,2 | 23,3 | 15,5 | 15,9 | 11,8 | 11,3 | 10,5 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | B | B | C | B | B | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | B | C | C | D | C | C | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | F | D | D | D | E | F | E | E |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | E | D | D | E | E | F | F | F |

Tab. 4-13: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Carnaper Straße/Steinweg im Nachmittagszeitraum in Fahrtrichtung Süd

| LSA | | 038 | 354 | 355 | 356 | 046 | 172 | 379 | 383 |
|--|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 10,3 | 6,0 | 9,8 | 18,7 | 17,5 | 23,2 | 8,7 | 16,2 |
| Messzeitraum 14:00-15:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 24,0 | 20,2 | 24,0 | 20,0 | 22,5 | 59,9 | 37,9 | 24,5 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,0 | 0,2 | 1,8 | 1,1 | 0,1 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 85 | 64 | 72 | 100 | 85 | 38 | 11 | 87 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 13,7 | 14,2 | 14,2 | 1,2 | 5,0 | 36,7 | 29,2 | 8,4 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 18,5 | 14,0 | 17,9 | 41,9 | 33,2 | 17,3 | 9,8 | 29,7 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | A | A | A | A | C | B | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | B | B | A | A | D | C | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | B | E | D | A | B | F | F | B |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | E | F | E | A | B | E | F | C |
| Messzeitraum 15:00-16:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 23,0 | 24,4 | 23,8 | 20,0 | 23,3 | 62,7 | 38,4 | 25,0 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,6 | 0,7 | 0,3 | 0,0 | 0,2 | 1,9 | 1,1 | 0,1 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 61 | 44 | 63 | 84 | 69 | 34 | 8 | 71 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 12,6 | 18,4 | 14,0 | 1,3 | 5,7 | 39,5 | 29,7 | 8,9 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 19,5 | 10,6 | 17,7 | 41,8 | 32,5 | 16,3 | 9,7 | 28,3 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | A | A | A | A | C | B | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | B | B | A | A | D | C | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | E | F | E | C | D | F | F | D |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | E | F | E | A | B | E | F | C |

Tab. 4-14: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Carnaper Straße/Steinweg im Nachmittagszeitraum in Fahrtrichtung Nord

Gesamtniveau der Ergebnisse der Qualitätseinstufungen in Fahrtrichtung Süd z. T. deutlich unter dem der Gegenrichtung. Die Ergebnisse sind auf das deutlich höhere Verkehrsaufkommen in Fahrtrichtung Süd zurückzuführen.

4.3.3 Fahrtzeiterhebungen

Die Messergebnisse der Fahrtzeiterhebungen sind in Tabelle 4-15 enthalten. Insgesamt zeigte sich in beiden Messzeiträumen eine unerwartet geringe Anzahl an Durchfahrern. In beiden Zeiträumen ergab die Auswertung mehr Durchfahrer für die Fahrtrichtung Süd (stadteinwärts).

Die Analyse der Einzelwerte in den Diagrammen in Bild 4-8 zeigt insgesamt wenige Ausreißer mit deutlich über den jeweiligen Mittelwerten liegenden Fahrtzeiten. In den Fahrtzeiten ist die Anzahl der Halte der einzelnen Fahrzeuge auf dem Straßenzug erkennbar. Die Fahrtzeit beträgt auf dem ca. 1.500 m langen Straßenzug bei freier Fahrt mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h knapp zwei Minuten. Die Fahrtzeiten von etwas mehr als zwei Minuten lassen daher darauf schließen, dass der Straßenzug mit einem oder keinem Halt befahren wurde. Die längeren Fahrtzeiten zeigen entsprechend mehr Halte. Während beider Messzeiträume konnten deutlich mehr Fahrzeuge

| Messzeitraum | | Fahrtrichtung Süd | | Fahrtrichtung Nord | |
|----------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | | 08:00-10:00 Uhr | 14:00-15:15 Uhr | 08:00-10:00 Uhr | 14:00-15:15 Uhr |
| Anzahl erfasster Fahrzeuge | [-] | 204 | 177 | 100 | 134 |
| Fahrtzeit | μ [min] | 3,99 | 4,72 | 4,15 | 3,65 |
| | σ [min] | 1,52 | 1,96 | 2,36 | 2,08 |
| Fahrtgeschwindigkeit | μ [km/h] | 24,6 | 21,1 | 26,3 | 29,3 |
| | σ [km/h] | 6,6 | 6,1 | 8,8 | 8,8 |

Tab. 4-15: Ergebnisse der Fahrtzeitermittlung über den gesamten Straßenzug Carnaper Straße/Steinweg

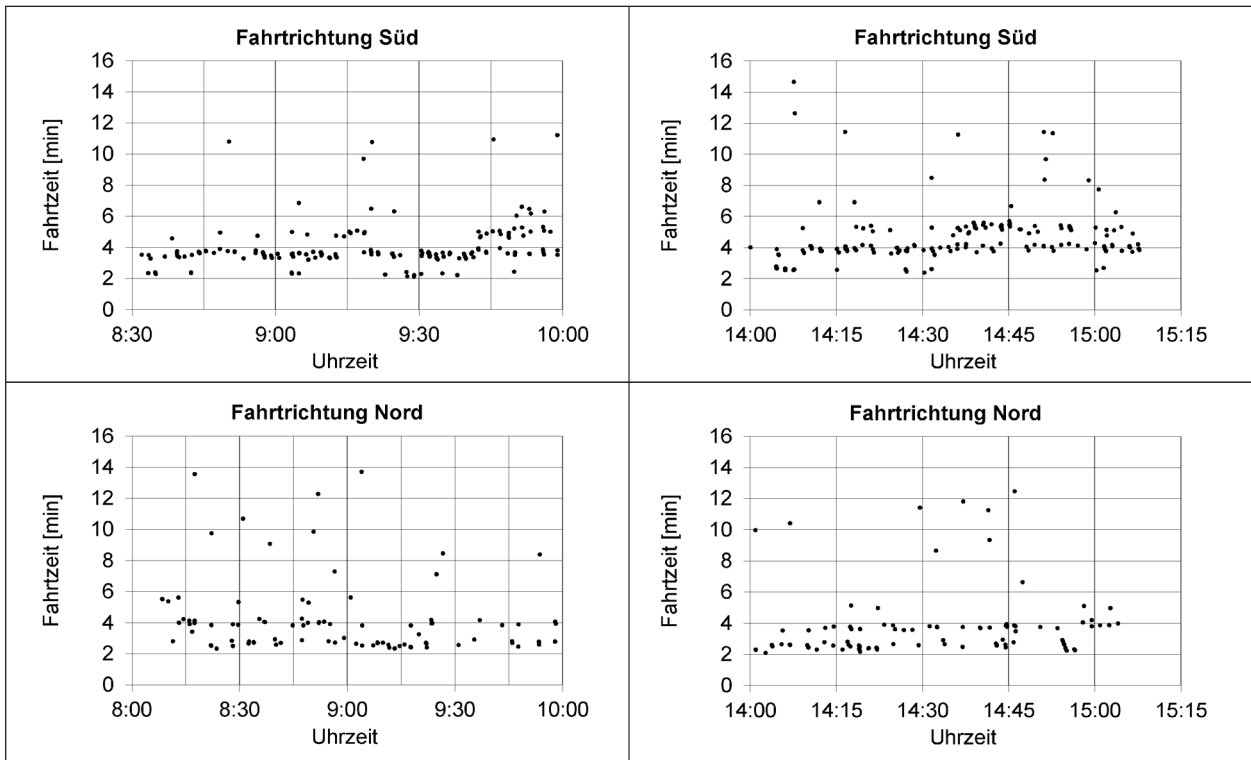


Bild 4-8: Einzelwerte der Fahrzeiterhebungen über den gesamten Straßenzug Carnaper Straße/Steinweg

| Fahrtrichtung Nord von LSA 353 nach LSA 354 | | | | | | | | |
|---|---------------|-------------------|-------------|--------------|-----------|--------------|-----------------------|-----------------|
| Messzeitraum | q_g [Kfz/h] | q_{ein} [Kfz/h] | Verlustzeit | | Fahrzeit | | Fahrtdgeschwindigkeit | |
| | | | μ [s] | σ [s] | μ [s] | σ [s] | μ [km/h] | σ [km/h] |
| 09:00-10:00 Uhr | 662 | 686 | 21,3 | 29,9 | 35,9 | 29,9 | 29,9 | 12,9 |

Tab. 4-16: Ergebnisse der Fahrzeiterhebungen auf dem Abschnitt zwischen den LSA 353 und 354 des Straßenzugs Carnaper Straße/Steinweg in der Morgenspitze in Fahrtrichtung Nord

den Straßenzug in Fahrtrichtung Nord mit weniger als zwei Halten durchfahren als in Gegenrichtung.

Weitere Fahrzeiterhebungen fanden auf dem Abschnitt zwischen den LSA 353 (Knotenpunkt Steinweg/Fischertal/Höhne/Friedrich-Engels-Allee) und 354 (Steinweg/Paul-Humburg-Straße/Bleicher Straße) in Fahrtrichtung Nord statt. Der Zeitraum der Messung erstreckt sich über eine Stunde von 09:00 bis 10:00 Uhr während der Morgenspitze. Die Ergebnisse der Auswertung in Fahrtrichtung Nord sind in Tabelle 4-16 enthalten.

Die mittlere Verlustzeit auf dem 204 m langen Abschnitt ergibt sich zu 21,3 s. Die Verlustzeit entspricht der Differenz zwischen der Fahrzeit für eine Fahrt mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit und der gemessenen Fahrzeit. Im Zeitraum von 09:00 bis 10:00 Uhr liegt demnach eine QSV B nach HBS 2015 vor. Die Einzelwerte der Messung sind in Bild 4-9 dargestellt.

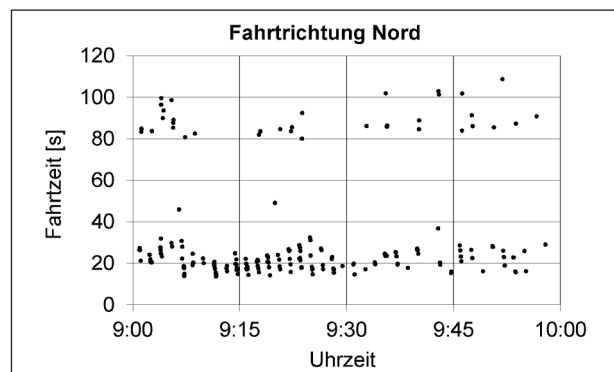


Bild 4-9: Einzelwerte der Fahrzeiterhebungen auf dem Abschnitt zwischen den LSA 353 und 354 des Straßenzugs Carnaper Straße/Steinweg

In Fahrtrichtung Süd ließen die Aufnahmen aufgrund der engen Abstände zwischen den Fahrzeugen und der daraus folgenden zahlreichen Überdeckungen keine sinnvolle Auswertung von Fahrzeiten zu. Dieser Abschnitt wird gesondert in der mikroskopischen Simulation untersucht.

4.4 Hamburg: Eiffestraße

4.4.1 Beschreibung des Straßenzugs

Die Eiffestraße führt durch den Stadtteil Hamm im Südosten Hamburgs. Die Hauptverkehrsstraße ist ein Teil des Straßenzugs der Bundesstraße B 5, die den Innenstadtbereich mit der Autobahn A 1 an der Anschlussstelle Hamburg-Billstedt verbindet. Der östlich der Eiffestraße gelegene Teil der B 5, die Bergedorfer Straße, ist größtenteils planfrei ausgebaut. Die Eiffestraße verläuft bei einer Länge von ca. 2,7 km über zehn Knotenpunkte von der Schurzallee-Nord im Osten bis zum Anckelmannsplatz im Westen. Die Untersuchungsstrecke ist in Bild 4-10 dargestellt.

Die Eiffestraße ist über die gesamte Länge vierstreifig ausgebaut. Im Bereich der Knotenpunkte sind die beiden Richtungsfahrbahnen baulich voneinander getrennt. Die Linksabbieger werden an den Knotenpunkten über separate Fahrstreifen geführt. Zusätzlich stehen den Rechtsabbiegern an sechs Zufahrten getrennte Fahrstreifen zur Verfügung. Die Steuerung der LSA entlang der Eiffestraße erfolgt mit Festzeitsteuerung und tageszeitabhängiger Signalprogrammwahl.

Die Erhebungen an der Eiffestraße fanden am 20. und 21.05.2014 statt. Die Messzeiträume wurden in Absprache mit dem Hamburger Landesbetrieb Stra-

ßen, Brücken und Gewässer LSBG festgelegt. Am 20.05. wurden zwischen 14:00 und 16:00 Uhr GPS-Befahrungen und Videoerfassungen durchgeführt. Am 21.05. wurde der Zeitraum von 08:00 bis 10:00 Uhr für die Erhebungen ausgewählt.

Die Verkehrsstärken der einzelnen Knotenpunkte wurden für die vorliegende Untersuchung in Form von Matrixauswertungen von der Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation (BWVI) zur Verfügung gestellt. Die Zählraten stammen z. T. aus älteren Zählungen aus dem Jahr 1997. Neben den Matrixauswertungen der Knotenpunkte wurden zusätzlich auch Daten zur Verkehrsentwicklung bereitgestellt. Östlich des Knotenpunkts mit der Schurzallee-Nord sowie im Bereich des Knotenpunkts mit dem Ausschläger Weg befindet sich eine Zählstelle der BWVI zur Erfassung durchschnittlicher täglicher Verkehrsstärken. Die Daten der Zählstellen wurden als Tagesganglinien in Stunden-Intervallen aufbereitet. Die automatisierten Erfassungen fanden am 06.05.2014 an der Zählstelle an der Schurzallee-Nord sowie am 16.04.2014 an der Zählstelle am Ausschläger Weg statt. Zusätzlich wurden für die vorliegende Untersuchung Verkehrsentwicklungszahlen von 1990 bis 2012 zur Verfügung gestellt. Aus diesen Daten lässt sich in Verbindung mit den Daten der Videoerhebungen ein ausreichend genaues Bild der Verkehrsstärken ableiten.

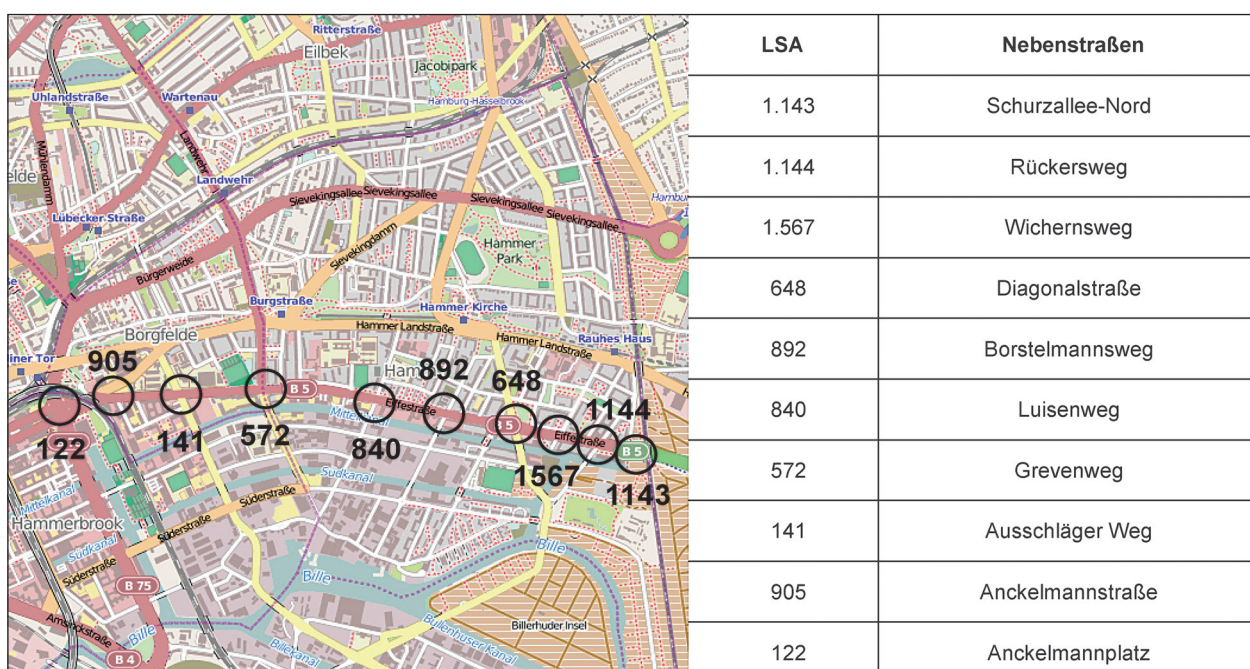


Bild 4-10: LSA-Bezeichnungen und kreuzende Nebenstraßen des Straßenzugs Eiffestraße in Hamburg (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

4.4.2 GPS-Befahrungen

In Tabelle 4-17 sind die aggregierten Kenngrößen der beiden Messzeiträume getrennt nach Fahrtrichtungen enthalten. In beiden Zeiträumen weist die höher belastete Fahrtrichtung niedrigere Kennwerte auf. Im Nachmittagszeitraum ist dies die Fahrtrichtung Ost (stadtauswärts) und in der Morgenspitze die Gegenrichtung. Die Koordinierungen der LSA sind in beiden Zeiträumen entsprechend dieser Hauptlastrichtungen ausgelegt.

Die abschnittsweise Analyse zeigt analog zu den bisherigen Auswertungen anderer Straßenzüge mitunter große Unterschiede bei der Einstufung der Verkehrsqualität in Abhängigkeit vom zugrunde liegenden Qualitätskriterium. Die Ergebnisse für die Hauptrichtung der Koordinierung im Nachmittagszeitraum (Fahrtrichtung Ost) sind in Tabelle 4-18 enthalten. Die Tabelle 4-19 zeigt die Ergebnisse der in diesem Zeitraum untergeordneten Fahrtrichtung West. In beiden Fahrtrichtungen ergeben sich im Nachmittagszeitraum gute bis sehr gute Qualitäts-

| Messzeitraum | | Fahrtrichtung West | | Fahrtrichtung Ost | |
|-------------------------------|----------------|--------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | 14:00-16:00 Uhr | 08:00-10:00 Uhr | 14:00-16:00 Uhr | 08:00-10:00 Uhr |
| Anzahl der Messfahrten | [-] | 35 | 53 | 36 | 55 |
| Fahrzeit | μ [min] | 5,56 | 4,04 | 4,35 | 4,82 |
| | σ [min] | 0,54 | 0,51 | 0,92 | 0,58 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 4,4 | 1,6 | 2,2 | 4,2 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 151 | 83 | 78 | 129 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 29,4 | 38,4 | 32,5 | 29,3 |

Tab. 4-17: Ergebnisse der GPS-Befahrungen über den gesamten Straßenzug Eiffestraße

| LSA | | 141 | 572 | 840 | 892 | 648 | 1.567 | 1.144 |
|--|--------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 25,6 | 28,6 | 39,2 | 24,9 | 23,8 | 17,6 | 11,8 |
| Messzeitraum 14:00-15:00 Uhr | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 52,2 | 36,3 | 47,6 | 31,8 | 31,2 | 24,0 | 12,6 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,8 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,1 | 0,0 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 63 | 96 | 88 | 88 | 79 | 92 | 100 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 26,6 | 7,7 | 8,5 | 6,9 | 7,4 | 6,4 | 0,8 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 24,2 | 39,2 | 41,0 | 38,8 | 38,2 | 36,8 | 43,5 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | E | A | B | B | C | B | A |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | D | B | A | B | B | B | A |
| Messzeitraum 15:00-16:00 Uhr | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 76,5 | 43,1 | 53,5 | 30,1 | 31,9 | 27,7 | 13,7 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 1,7 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 0,0 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 32 | 89 | 75 | 93 | 79 | 89 | 100 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 50,9 | 14,5 | 14,4 | 5,2 | 8,1 | 10,1 | 1,9 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 16,6 | 33,2 | 36,4 | 41,3 | 37,2 | 31,9 | 40,5 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | D | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | D | B | B | A | A | B | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | F | B | C | B | C | B | A |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | E | B | B | A | B | B | A |

Tab. 4-18: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Eiffestraße im Nachmittagszeitraum in Fahrtrichtung Ost

| LSA | | 1.144 | 1.567 | 648 | 892 | 840 | 572 | 141 | 905 |
|--|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 11,6 | 17,4 | 23,7 | 25,0 | 38,6 | 29,2 | 28,7 | 13,4 |
| Messzeitraum 14:00-15:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 36,5 | 33,0 | 44,2 | 48,4 | 56,0 | 57,4 | 38,2 | 20,0 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,4 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 1,0 | 0,1 | 0,1 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 55 | 38 | 28 | 24 | 55 | 0 | 93 | 86 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 24,9 | 15,7 | 20,6 | 23,5 | 17,4 | 28,3 | 9,5 | 6,6 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 28,5 | 26,0 | 26,5 | 25,7 | 34,5 | 25,3 | 37,8 | 32,6 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | B | B | A | B | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | B | C | C | B | C | A | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | E | F | F | F | E | E | B | B |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | C | C | C | B | C | B | B |
| Messzeitraum 15:00-16:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 36,7 | 32,3 | 44,6 | 48,4 | 58,4 | 56,7 | 41,0 | 20,0 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 0,2 | 0,1 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 57 | 39 | 26 | 26 | 30 | 4 | 83 | 91 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 25,1 | 14,9 | 20,9 | 23,4 | 19,8 | 27,5 | 12,2 | 6,7 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 28,4 | 26,5 | 26,4 | 25,7 | 33,2 | 25,7 | 35,3 | 32,8 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | B | B | A | B | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | B | C | C | B | C | B | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | E | F | F | F | F | F | C | B |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | C | C | C | B | C | B | B |

Tab. 4-19: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Eiffestraße im Nachmittagszeitraum in Fahrtrichtung West

| LSA | | 141 | 572 | 840 | 892 | 648 | 1.567 | 1.144 |
|--|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 11,6 | 17,4 | 23,7 | 25,0 | 38,6 | 29,2 | 28,7 |
| Messzeitraum 08:00-09:00 Uhr | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 35,4 | 51,2 | 62,2 | 44,9 | 38,3 | 31,5 | 27,0 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,3 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,6 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 72 | 22 | 22 | 36 | 58 | 56 | 44 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 23,8 | 33,9 | 38,5 | 19,9 | 0 | 2,3 | 0 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 35,8 | 27,8 | 31,6 | 27,7 | 31,1 | 27,7 | 20,5 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | B | C | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | C | D | B | A | A | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | D | F | F | F | E | E | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | B | C | B | C | B | C | D |
| Messzeitraum 09:00-10:00 Uhr | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 37,1 | 48,6 | 60,4 | 46,4 | 39,8 | 30,0 | 25,7 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,4 | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,6 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 70 | 30 | 27 | 30 | 52 | 59 | 45 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 25,4 | 31,8 | 36,8 | 21,1 | 2,1 | 0,1 | 0 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 34,3 | 28,9 | 32,5 | 26,9 | 29,2 | 29,9 | 21,6 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | B | C | B | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | C | D | C | A | A | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | D | F | F | F | E | E | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | B | C | B | B | B | B | D |

Tab. 4-20: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Eiffestraße in der Morgenspitze in Fahrtrichtung Ost

| LSA | | 1.144 | 1.567 | 648 | 892 | 840 | 572 | 141 | 905 |
|--|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 11,6 | 17,4 | 23,7 | 25,0 | 38,6 | 29,2 | 28,7 | 13,4 |
| Messzeitraum 08:00-09:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 25,6 | 22,7 | 26,8 | 26,2 | 42,1 | 33,5 | 32,2 | 32,7 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,5 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,9 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 55 | 89 | 100 | 100 | 96 | 94 | 98 | 38 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 14,0 | 5,4 | 3,2 | 1,2 | 3,5 | 4,3 | 3,4 | 19,3 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 22,0 | 38,2 | 44,2 | 47,6 | 45,8 | 43,6 | 44,7 | 19,8 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | A | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | E | B | A | A | A | B | A | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | D | B | A | A | A | A | A | E |
| Messzeitraum 09:00-10:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 25,6 | 22,7 | 26,8 | 26,2 | 42,1 | 33,5 | 32,2 | 32,7 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,5 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,9 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 55 | 89 | 100 | 100 | 96 | 94 | 98 | 38 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 14,0 | 5,4 | 3,2 | 1,2 | 3,5 | 4,3 | 3,4 | 19,3 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 22,0 | 38,2 | 44,2 | 47,6 | 45,8 | 43,6 | 44,7 | 19,8 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | A | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | E | B | A | A | A | B | A | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | D | B | A | A | A | A | A | E |

Tab. 4-21: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Eiffestraße in der Morgenspitze in Fahrtrichtung West

stufen unter Verwendung der Verlustzeit als Kriterium, wohingegen insbesondere die in diesem Zeitraum in der Koordinierung der LSA untergeordnete Fahrtrichtung West auf der Mehrzahl der Abschnitte keine ausreichende Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs nach dem Kriterium der Durchfahrten ohne Halt (HBS 2001) erreicht.

Im Messzeitraum der Morgenspitze zeigt sich ein ähnliches Bild wie in den Ergebnissen der Messungen im Nachmittagszeitraum (Tabelle 4-20 und Tabelle 4-21). Die durchweg schlechteste Qualitätsstufe wird erreicht unter Verwendung des Qualitätskriteriums aus dem HBS 2001.

4.4.3 Fahrtzeiterhebungen

Zeitgleich zu den GPS-Befahrungen wurden auf der Eiffestraße Fahrtzeiterhebungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 4-22 enthalten. Wie schon in den Ergebnissen der GPS-gestützten Befahrungen ergaben die Messungen in beiden Zeiträumen höhere mittlere Geschwindigkeiten in Fahrtrichtung West als in Fahrtrichtung Ost. Den Grund für dieses Ergebnis zeigt die Analyse der Einzelwerte der Messung. Die Werte sind in den Diagrammen in Bild 4-11 enthalten.

Die Fahrtzeiten und Geschwindigkeiten bleiben in Fahrtrichtung West während des gesamten Mess-

| Messzeitraum | | Fahrtrichtung Ost | | Fahrtrichtung West | |
|----------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | | 14:00-16:00 Uhr | 08:00-10:00 Uhr | 14:00-16:00 Uhr | 08:00-10:00 Uhr |
| Anzahl erfasster Fahrzeuge | [-] | 2.196 | 492 | 1.691 | 1.427 |
| Fahrtzeit | μ [min] | 4,72 | 4,96 | 5,14 | 4,13 |
| | σ [min] | 1,84 | 1,59 | 1,41 | 1,71 |
| Fahrtgeschwindigkeit | μ [km/h] | 31,3 | 26,6 | 38,9 | 39,7 |
| | σ [km/h] | 8,9 | 7,8 | 4,7 | 7,9 |

Tab. 4-22: Ergebnisse der Fahrtzeitermittlung über den gesamten Straßenzug Eiffestraße

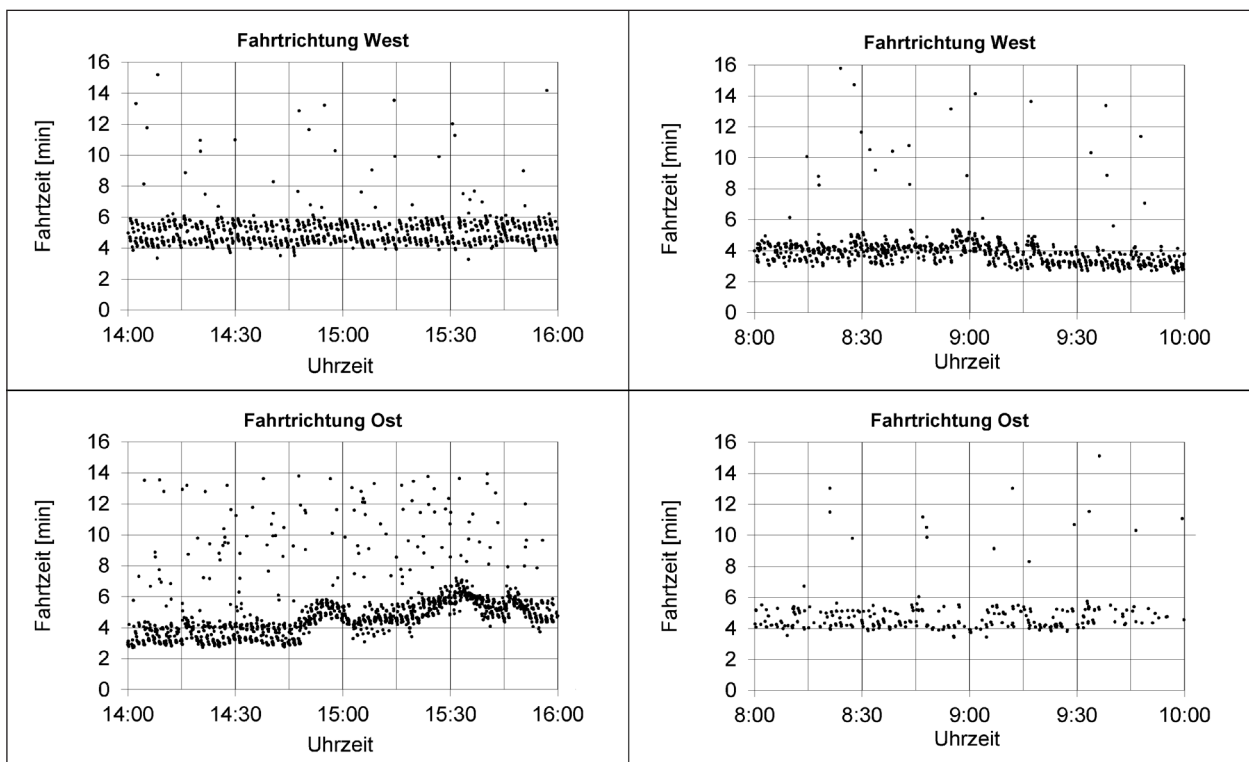


Bild 4-11: Einzelwerte der Fahrzeiterhebungen über den gesamten Straßenzug Eiffestraße

zeitraums auf gleichbleibendem Niveau. Im Vergleich dazu zeigen sich in Gegenrichtung Veränderungen der Kenngrößen gegen Ende des Messzeitraums zwischen 14:45 und 16:00 Uhr. Die Analyse der Geschwindigkeiten verdeutlicht zudem zwei unterschiedliche Geschwindigkeitsniveaus, die auf eine unterschiedliche Anzahl von Halten auf dem Straßenzug schließen lassen.

Die Messergebnisse der Erhebungen während der Morgenspitze zeigen deutlich die veränderte Lastrichtung gegenüber der Abendspitze. In Fahrtrichtung West (stadteinwärts) konnten insgesamt 1427 Kfz in den zwei Stunden des Messzeitraums registriert werden. In der Nachmittagsspitze lag die Anzahl der Durchfahrer in der Gegenrichtung bei 2196 Kfz/2h. Analog zu den Ergebnissen der Nachmittagsmessung ist wiederum die Fahrzeit in der Hauptlastrichtung des Straßenzugs in Fahrtrichtung West niedriger als in Gegenrichtung.

Aus den Einzelwerten in den Diagrammen in Bild 4-11 wird deutlich, dass die Fahrzeiten ab ca. 09:00 Uhr von ca. vier Minuten auf weniger als vier Minuten sinken. In Gegenrichtung bleibt das Niveau hingegen über den gesamten Messzeitraum konstant. Unabhängig vom Anstieg der Geschwindigkeiten in Fahrtrichtung West zeigt sich in den Einzelwerten, dass die Geschwindigkeiten insgesamt homogener

verteilt sind. Die Ergebnisse deuten nicht auf eine unterschiedliche Anzahl von Halten bei der Durchfahrt des Straßenzugs hin.

In den Ergebnissen in Fahrtrichtung Ost hingegen bilden sich ähnlich zu den Ergebnissen der Nachmittagsmessung wiederum über den gesamten Zeitraum der Morgenspitze zwei unterschiedliche Niveaus der gefahrenen Geschwindigkeiten und der Fahrzeiten aus. Hier ist demnach wieder von Unterschieden in der Anzahl der Halte der Verkehrsteilnehmer beim Durchfahren des Straßenzugs auszugehen.

4.5 Bochum: Königsallee

4.5.1 Beschreibung des Straßenzugs

Die Königsallee ist eine Hauptverbindung des Bochumer Innenstadtbereichs mit den im Süden gelegenen Stadtteilen und der angrenzenden Stadt Hattingen. Der betrachtete Abschnitt hat eine Länge von ca. 3 km und verläuft von der Hattinger Straße (LSA 120) bis zur Markstraße (LSA 180), vgl. Bild 4-12. Der Straßenquerschnitt ist auf der gesamten Untersuchungsstrecke vierstreifig ausgebaut. Südlich der LSA 127 (Arnikastraße) sind die Richtungsfahrbahnen durch einen breiten Mittelstreifen bau-

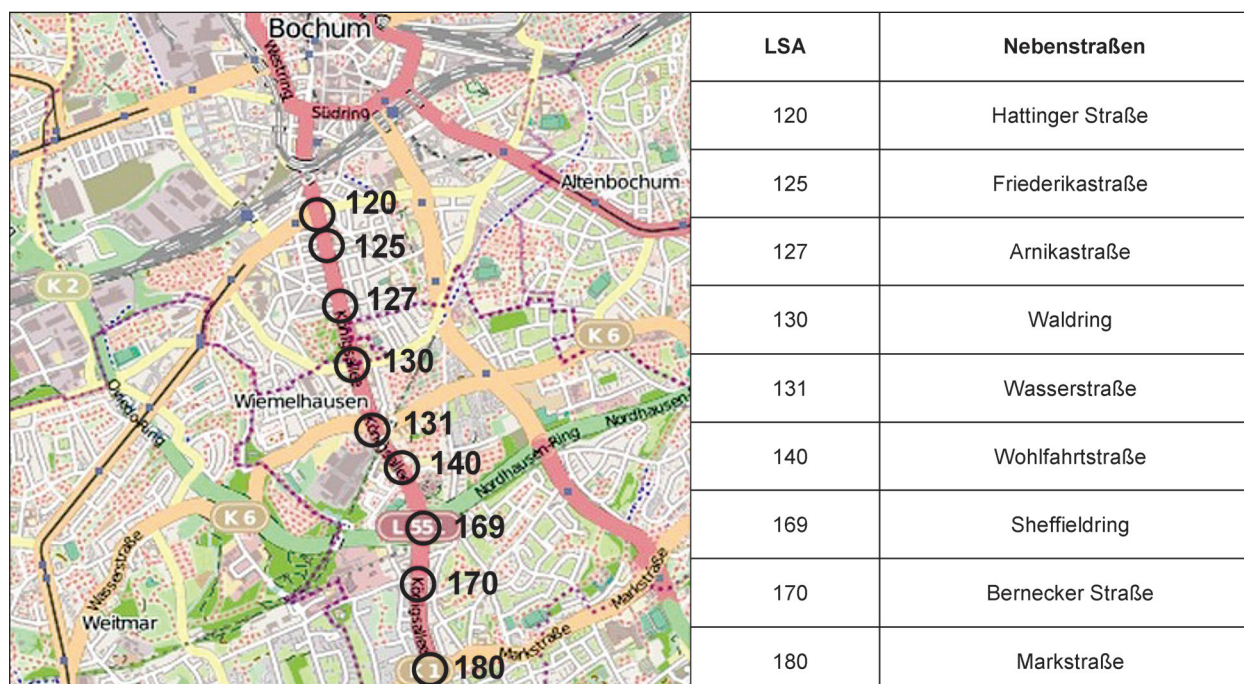


Bild 4-12: LSA-Bezeichnungen und kreuzende Nebenstraßen des Straßenzugs Königsallee in Bochum (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

lich voneinander getrennt. Auf der Untersuchungsstrecke liegen acht koordiniert gesteuerte Knotenpunkte. Die LSA sind mit einer festzeitgesteuerten Grünen Welle koordiniert. Die Steuerung der Knotenpunkte erfolgt mit zwei Festzeitprogrammen. Das Tagesprogramm läuft von 5:30 bis 22:30 Uhr und das Nachtprogramm ab 22:30 Uhr.

Der Straßenzug war bereits Gegenstand einer früheren Untersuchung (BRILON et al., 2007). Am 09.11.2005 von 16:00 bis 18:00 Uhr und am 10.11.2005 von 7:00 bis 9:00 Uhr wurden Befahrungen mit zehn Pkw durchgeführt. Die Messungen wurden für die vorliegende Untersuchung erneut ausgewertet.

4.5.2 GPS-Befahrungen

Die Auswertergebnisse der GPS-Befahrungen sind in Tabelle 4-23 enthalten. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von den Hauptlastrichtungen in den beiden Messzeiträumen. Die Hauptlastrichtungen sind die Fahrtrichtung Nord (stadteinwärts) in der Morgenspitze und die Fahrtrichtung Süd (stadtauswärts) in der Abendspitze.

In Fahrtrichtung Süd liegt die Fahrtzeit in der Morgenspitze um mehr als eine Minute unter der Fahrtzeit in der Abendspitze. In Fahrtrichtung Nord unterscheiden sich die Kenngrößen der beiden Messzeiträume weniger voneinander. Lediglich die Anzahl der durchgeführten Messfahrten zeigt nennenswerte Unterschiede.

| Messzeitraum | | Fahrtrichtung Süd | | Fahrtrichtung Nord | |
|-------------------------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | | 07:00-09:00 Uhr | 16:00-18:00 Uhr | 07:00-09:00 Uhr | 16:00-18:00 Uhr |
| Anzahl der Messfahrten | [-] | 62 | 47 | 67 | 45 |
| Fahrtzeit | μ [min] | 3,55 | 4,61 | 4,33 | 4,47 |
| | σ [min] | 0,56 | 0,62 | 0,75 | 0,67 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,65 | 2,10 | 1,70 | 1,58 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 19,8 | 85,0 | 66,0 | 75,0 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 51,5 | 41,0 | 39,5 | 42,1 |

Tab. 4-23: Ergebnisse der GPS-Befahrungen über den gesamten Straßenzug Königsallee

Die Ergebnisse der abschnittswisen Auswertungen in Tabelle 4-24 bis Tabelle 4-27 zeigen erwartungsgemäß, dass bei höherer Verkehrsbelastung, wie z. B. in der Morgenspitze stadteinwärts (Fahrtrichtung Nord, Tabelle 4-25) und in der Abendspitze stadtauswärts (Fahrtrichtung Süd, Tabelle 4-27), die Koordinierung schlechter wird. Insgesamt ist jedoch zu erkennen, dass die Koordinierungsqualität auf der Königsallee auf einem hohen Niveau liegt. Die höchsten QSV werden nach der Bewertung mit der Verlustzeit nach HBS 2015 und HCM 2010 erreicht. Lediglich mit dem Bewertungsverfahren nach HBS 2001 über den Anteil der Durchfahrten ohne Halt aller ausgewerteten Messfahrten ergaben sich auf einzelnen Abschnitten Qualitätsstufen unterhalb der Stufe C, z. T. auch Abschnitte mit ungenügender Verkehrsqualität (Stufe F). Die niedrigsten Quali-

tätsstufen zeigten sich insbesondere auf den Abschnitten zwischen der ersten und zweiten LSA sowie zwischen der vorletzten und letzten LSA des Straßenzugs.

Die mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf dem Straßenzug war insgesamt sehr hoch. Die Bewertungskriterien nach BRILON, SCHNABEL wurden für eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h angewendet, da die Streckenabschnitte mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 und 70 km/h gleich lang sind. Bei der Bewertung nach den Fahrtgeschwindigkeiten stellt sich, analog zur Bewertung nach der Verlustzeit, auf dem Straßenzug eine höhere QSV ein als nach der Bewertung der Halte. Die QSV liegen im Mittel um eine Stufe höher als beim Verfahren nach HBS 2001.

| LSA | | 125 | 127 | 130 | 131 | 140 | 169 | 170 | 180 |
|--|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 31,2 | 13,4 | 19,8 | 27,0 | 29,2 | 25,2 | 11,8 | 32,7 |
| Messzeitraum 07:00-08:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 47,1 | 22,5 | 18,4 | 28,1 | 29,3 | 29,1 | 19,8 | 44,0 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,55 | 0,08 | 0,00 | 0,10 | 0,10 | 0,33 | 0,23 | 0,08 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 66 | 92 | 100 | 92 | 90 | 77 | 77 | 92 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 15,8 | 9,1 | 0,0 | 1,1 | 0,1 | 3,9 | 8,0 | 11,3 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 32,7 | 41,4 | 53,8 | 48,0 | 49,7 | 43,0 | 41,0 | 51,9 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | A | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | D | B | A | B | B | C | C | B |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | B | A | B | B | B | B | A |
| Messzeitraum 08:00-09:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 50,0 | 19,5 | 18,1 | 27,8 | 27,0 | 24,7 | 14,3 | 40,1 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,62 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,08 | 0,19 | 0,08 | 0,05 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 59 | 100 | 100 | 92 | 92 | 89 | 92 | 95 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 18,8 | 0,7 | 0,0 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 2,5 | 7,4 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 30,8 | 47,8 | 54,6 | 48,4 | 54,1 | 50,7 | 57,7 | 57,0 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | A | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | E | A | A | B | B | B | B | A |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | B | A | B | A | A | A | A |

Tab. 4-24: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Königsallee in der Morgenspitze in Fahrtrichtung Süd

| LSA | 170 | 169 | 140 | 131 | 130 | 127 | 125 | 120 | |
|--|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 32,3 | 12,3 | 25,2 | 28,1 | 27,7 | 20,5 | 18,7 | 32,5 |
| Messzeitraum 07:00-08:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 62,1 | 17,6 | 25,9 | 32,6 | 35,2 | 24,9 | 20,8 | 58,0 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,97 | 0,03 | 0,11 | 0,05 | 0,27 | 0,16 | 0,16 | 0,84 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 14 | 97 | 89 | 95 | 81 | 92 | 89 | 30 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 29,8 | 5,3 | 0,7 | 4,6 | 7,5 | 4,4 | 2,1 | 25,4 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 36,0 | 48,9 | 48,8 | 42,8 | 39,2 | 40,6 | 44,6 | 27,7 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A | B |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | A | A | A | A | A | A | C |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | F | A | B | A | C | B | B | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | B | B | B | B | B | B | B | C |
| Messzeitraum 08:00-09:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 60,5 | 16,7 | 24,6 | 31,7 | 33,9 | 24,5 | 20,7 | 53,6 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,87 | 0,00 | 0,15 | 0,03 | 0,23 | 0,10 | 0,18 | 0,72 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 23 | 100 | 85 | 97 | 85 | 92 | 87 | 41 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 15,3 | 0,0 | 0,0 | 3,6 | 6,2 | 9,8 | 7,3 | 30,4 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 35,2 | 52,3 | 49,5 | 43,8 | 41,1 | 42,9 | 43,9 | 31,8 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | A | A | A | A | A | A | B |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A | C |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | F | A | B | B | B | B | B | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | B | A | B | B | B | B | B | C |

Tab. 4-25: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Königsallee in der Morgenspitze in Fahrtrichtung Nord

| LSA | 125 | 127 | 130 | 131 | 140 | 169 | 170 | 180 | |
|--|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 31,2 | 18,7 | 19,8 | 27,0 | 29,2 | 25,2 | 16,6 | 32,7 |
| Messzeitraum 16:00-17:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 50,8 | 23,8 | 19,4 | 31,7 | 31,8 | 35,9 | 35,2 | 46,8 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,44 | 0,13 | 0,00 | 0,22 | 0,16 | 0,50 | 0,56 | 0,03 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 63 | 88 | 100 | 84 | 84 | 66 | 44 | 97 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 19,5 | 5,0 | 0,0 | 4,7 | 2,6 | 10,7 | 23,3 | 14,1 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 30,4 | 39,4 | 51,0 | 42,3 | 45,9 | 34,7 | 22,9 | 48,9 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | A | A | A | A | A | A | B | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | B | C | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | E | B | A | C | C | D | F | A |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | B | A | B | B | C | D | B |
| Messzeitraum 17:00-18:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 55,8 | 21,9 | 19,1 | 28,6 | 29,4 | 35,4 | 25,7 | 46,0 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,63 | 0,06 | 0,00 | 0,09 | 0,06 | 0,56 | 0,38 | 0,06 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 50 | 94 | 100 | 94 | 94 | 63 | 63 | 94 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 24,6 | 3,2 | 0,0 | 1,6 | 0,2 | 10,2 | 13,9 | 13,3 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 27,7 | 42,7 | 51,8 | 47,1 | 49,6 | 35,2 | 31,5 | 49,6 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A | A |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | A | A | A | A | B | B | B |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | E | B | A | B | B | E | E | B |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | C | B | A | B | B | B | C | B |

Tab. 4-26: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Königsallee in der Abendspitze in Fahrtrichtung Süd

| LSA | | 170 | 169 | 140 | 131 | 130 | 127 | 125 | 120 |
|--|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ideale Fahrtzeit | [s] | 32,9 | 12,3 | 25,2 | 28,1 | 27,7 | 20,5 | 18,7 | 31,7 |
| Messzeitraum 16:00-17:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 58,2 | 15,8 | 23,7 | 31,9 | 26,1 | 20,0 | 18,8 | 67,4 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,86 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 1,07 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 17 | 100 | 100 | 97 | 97 | 100 | 97 | 10 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 25,9 | 3,4 | 0,0 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 34,9 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 38,5 | 54,6 | 53,6 | 43,8 | 53,2 | 51,0 | 49,4 | 23,8 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A | B |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | A | A | A | A | A | A | C |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | F | A | A | A | A | A | A | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | B | A | A | B | A | A | B | D |
| Messzeitraum 17:00-18:00 Uhr | | | | | | | | | |
| Mittlere Fahrtzeit | [s] | 57,6 | 16,1 | 24,0 | 29,7 | 25,4 | 19,7 | 18,5 | 55,9 |
| Mittlere Anzahl der Halte | [-] | 0,97 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,67 |
| Durchfahrten ohne Halt | [%] | 7 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 97 | 37 |
| Mittlere Verlustzeit | [s] | 25,3 | 3,8 | 0,0 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 23,4 |
| Mittlere Fahrtgeschwindigkeit | [km/h] | 38,7 | 53,9 | 52,7 | 47,1 | 54,7 | 51,7 | 50,4 | 28,8 |
| QSV (HBS 2015 – Wartezeit) | | B | A | A | A | A | A | A | B |
| QSV (HCM 2010 – Wartezeit) | | C | A | A | A | A | A | A | C |
| QSV (HBS 2001 – Durchfahrten) | | F | A | A | A | A | A | A | F |
| QSV (BRILON, SCHNABEL – Geschwindigkeit) | | B | A | A | B | A | A | A | C |

Tab. 4-27: Kenngrößen und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der einzelnen Abschnitte des Straßenzugs Königsallee in der Abendspitze in Fahrtrichtung Nord

4.5.3 Fahrtzeiterhebungen

Zusätzliche Fahrtzeiterhebungen fanden auf dem Abschnitt zwischen den LSA 127 (Knotenpunkt Königsallee/Arnikastraße) und 130 (Königsallee/Waldring) statt. Der Abstand zwischen den beiden Knotenpunkten beträgt 250 m. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 50 km/h. In Tabelle 4-28 und Tabelle 4-29 sind die aggregierten Mess-

ergebnisse enthalten. Die Einzelwerte sind in Bild 4-13 dargestellt. Für beide Fahrtrichtungen ergaben die Messungen niedrige mittlere Verlustzeiten von unter 20 s. Die Qualität des Verkehrsablaufs beider Abschnitte ist mit QSV A nach HBS 2015 zu bewerten.

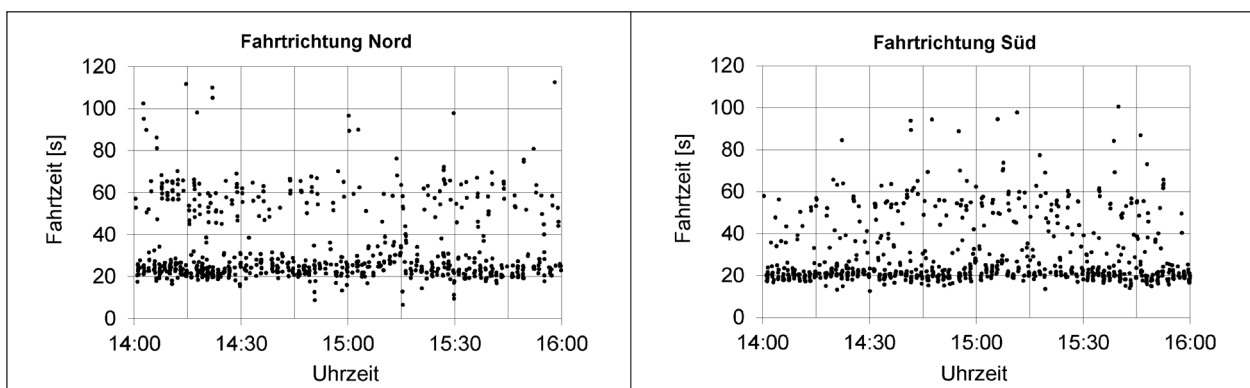


Bild 4-13: Einzelwerte der Fahrtzeiterhebungen auf dem Abschnitt der Königsallee zwischen den LSA 127 und 130

| Fahrtrichtung Süd von LSA 127 nach LSA 130 | | | | | | | | |
|--|---------------|-------------------|-------------|--------------|-----------|--------------|-----------------------|-----------------|
| Messzeitraum | q_g [Kfz/h] | q_{ein} [Kfz/h] | Verlustzeit | | Fahrzeit | | Fahrtdgeschwindigkeit | |
| | | | μ [s] | σ [s] | μ [s] | σ [s] | μ [km/h] | σ [km/h] |
| 14:00-15:00 Uhr | 1.343 | 40 | 10,1 | 15,7 | 28,0 | 15,7 | 38,2 | 12,0 |
| 15:00-16:00 Uhr | 1.421 | 34 | 11,1 | 15,6 | 29,0 | 15,7 | 37,4 | 12,8 |
| 14:00-16:00 Uhr | 2.422 | 74 | 10,6 | 15,6 | 28,5 | 15,7 | 37,8 | 12,4 |

Tab. 4-28: Ergebnisse der Fahrzeiterhebungen auf dem Abschnitt der Königsallee zwischen den LSA 127 und 130 im Nachmittagszeitraum in Fahrtrichtung Süd

| Fahrtrichtung Nord von LSA 130 nach LSA 127 | | | | | | | | |
|---|---------------|-------------------|-------------|--------------|-----------|--------------|-----------------------|-----------------|
| Messzeitraum | q_g [Kfz/h] | q_{ein} [Kfz/h] | Verlustzeit | | Fahrzeit | | Fahrtdgeschwindigkeit | |
| | | | μ [s] | σ [s] | μ [s] | σ [s] | μ [km/h] | σ [km/h] |
| 14:00-15:00 Uhr | 1.056 | 55 | 15,2 | 17,9 | 33,2 | 17,9 | 32,8 | 12,3 |
| 15:00-16:00 Uhr | 1.083 | 55 | 15,7 | 19,2 | 33,7 | 19,4 | 32,9 | 13,9 |
| 14:00-16:00 Uhr | 2.103 | 110 | 15,4 | 18,5 | 33,4 | 18,5 | 32,8 | 13,0 |

Tab. 4-29: Ergebnisse der Fahrzeiterhebungen auf dem Abschnitt der Königsallee zwischen den LSA 130 und 127 im Nachmittagszeitraum in Fahrtrichtung Nord

4.6 Weitere Einzelmessungen an koordiniert gesteuerten Knotenpunktzufahrten

4.6.1 Bochum: Herner Straße

Die Herner Straße ist die Hauptverbindung des Innenstadtrings mit den Anschlussstellen der Autobahn A 40 nach Essen und Dortmund sowie der Autobahn A 43 nach Münster und Wuppertal. Gleichzeitig ist die Herner Straße die wichtigste Verbindung zur Nachbarstadt Herne im Norden. Die betrachteten LSA 614 (Knotenpunkt Herner Straße/Freiligrathstraße/Emscherstraße) und 616 (Knotenpunkt Herner Straße/Feldsieperstraße) liegen zentrumsnah im Bereich zwischen dem Innenstadtring und der Anschlussstelle zur Autobahn A 40. Der Abschnitt ist in beiden Fahrtrichtungen einstreifig befahrbar. An

der LSA 614 steht dem Linksabbiegestrom in der Zufahrt Nord ein zusätzlicher Aufstellstreifen zur Verfügung. Der gesamte Abschnitt verfügt über einen zusätzlichen Mittelstreifen, der in beiden Richtungen für Abbiegevorgänge genutzt werden kann.

Im Gegensatz zu den bisher analysierten Abschnitten sind die Umlaufzeiten an den beiden Knotenpunkten der Herner Straße nicht einheitlich. Die LSA 614 wird mit einem Signalprogramm mit einer Umlaufzeit von 110 s betrieben. Die Umlaufzeit des Signalprogramms der LSA 616 beträgt 90 s. Der Abschnitt hat in beide Fahrtrichtungen eine Länge von 330 m. An beiden Seiten des Abschnitts befinden sich sowohl Radfahrstreifen als auch Parkbuchten. Westlich der Herner Straße befindet sich auf dem Abschnitt ein Einzelhandelsunternehmen mit eigener Tiefgarage. In den Abschnitt mündet

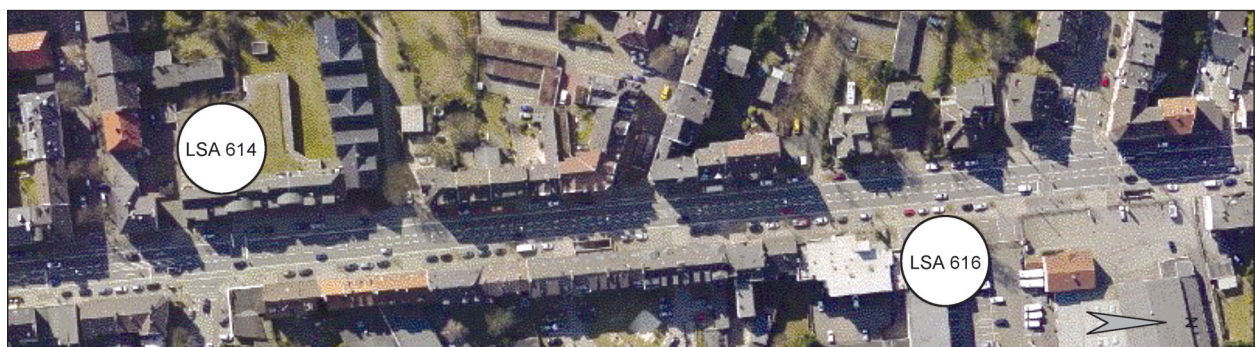


Bild 4-14: Untersuchungsabschnitt der Herner Straße zwischen den LSA 616 und 614 in Bochum (Luftbild: Stadt Bochum)

von Westen die Schmechtingstraße, die nur als Einbahnstraße in Richtung Herner Straße genutzt werden darf. Die Einmündung ist nicht signalisiert. Die Verkehrsstärken aus der Schmechtingstraße sind vernachlässigbar gering.

Die Fahrtzeiten auf dem Abschnitt zwischen den LSA 616 und 614 der Herner Straße in Bochum wurden unabhängig von anderen Erhebungen gemessen. Die Messungen fanden am 10.10.2013 im Zeitraum von 13:30 bis 16:30 Uhr statt. Die Fahrtzeiten wurden in beiden Fahrtrichtungen erhoben und sind in Bild 4-15 jeweils für den Zeitraum von 14:00 bis 16:00 Uhr dargestellt. Die Auswertungsergebnisse sind in Tabelle 4-30 und Tabelle 4-31 enthalten. Für beiden Fahrtrichtungen des Abschnitts ergibt die Qualitätsbewertung die QSV A nach HBS 2015.

4.6.2 Bochum: Castroper Straße

Der Untersuchungsabschnitt der Castroper Straße zwischen den LSA 411 (Knotenpunkt Castroper Straße/Klinikstraße) und 413 (Knotenpunkt Castroper Straße/Stadionring/Gersteinring) befindet sich östlich des Innenstadtrings im Zentrum von Bochum. Die beiden Fahrtrichtungen sind durch einen nicht mehr in Betrieb befindlichen Bahnkörper baulich voneinander getrennt. In diesem Abschnitt verläuft die Straßenbahntrasse unterirdisch. Der Bahnkörper wurde jedoch nicht zurückgebaut, sondern wird heute als Parkstreifen mit Schrägaufstellung genutzt. An den äußeren Fahrbahnrandern sind im Westen des Abschnitts über die gesamte Länge Parkbuchten angelegt. An der gegenüberliegenden Seite wird der rechte Fahrbahnrand über ungefähr ein Drittel der Abschnitts-

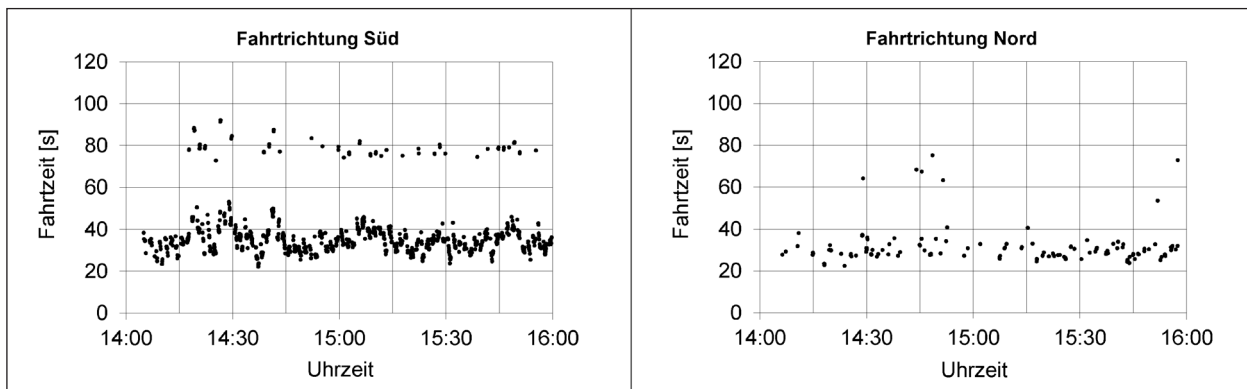


Bild 4-15: Einzelwerte der Fahrzeiterhebungen auf dem Abschnitt der Herner Straße zwischen den LSA 616 und 614

| Fahrtrichtung Süd von LSA 616 nach LSA 614 | | | | | | | | |
|--|------------------------|--------------------------|-------------|-------|----------|-------|----------------------|-------|
| Messzeitraum | q _g [Kfz/h] | q _{ein} [Kfz/h] | Verlustzeit | | Fahrzeit | | Fahrtgeschwindigkeit | |
| | | | μ [s] | σ [s] | μ [s] | σ [s] | μ [s] | σ [s] |
| 14:00-15:00 Uhr | 697 | 90 | 14,2 | 13,9 | 38,3 | 13,9 | 34,2 | 7,9 |
| 15:00-16:00 Uhr | 822 | 25 | 13,1 | 11,2 | 37,3 | 11,2 | 34,2 | 6,5 |
| 14:00-16:00 Uhr | 1.519 | 115 | 13,6 | 12,5 | 37,8 | 12,5 | 34,2 | 7,1 |

Tab. 4-30: Ergebnisse der Fahrzeiterhebungen auf dem Abschnitt der Herner Straße zwischen den LSA 616 und 614 im Nachmittagszeitraum in Fahrtrichtung Süd

| Fahrtrichtung Nord von LSA 614 nach LSA 616 | | | | | | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------|-------|----------|-------|----------------------|-------|
| Messzeitraum | q _g [Kfz/h] | q _{ein} [Kfz/h] | Verlustzeit | | Fahrzeit | | Fahrtgeschwindigkeit | |
| | | | μ [s] | σ [s] | μ [s] | σ [s] | μ [s] | σ [s] |
| 14:00-15:00 Uhr | 770 | 39 | 9,5 | 11,4 | 33,7 | 11,4 | 38,5 | 8,1 |
| 15:00-16:00 Uhr | 803 | 25 | 8,7 | 14,3 | 32,9 | 14,3 | 40,0 | 8,0 |
| 14:00-16:00 Uhr | 1.573 | 64 | 9,0 | 13,1 | 33,2 | 13,1 | 39,4 | 8,0 |

Tab. 4-31: Ergebnisse der Fahrzeiterhebungen auf dem Abschnitt der Herner Straße zwischen den LSA 614 und 616 im Nachmittagszeitraum in Fahrtrichtung Nord

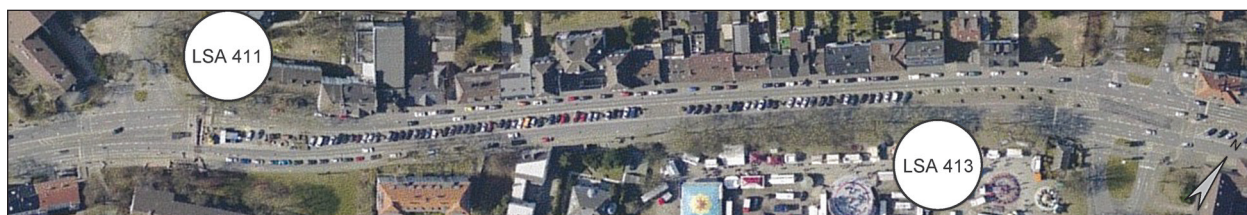


Bild 4-16: Untersuchungsabschnitt der Castroper Straße zwischen den LSA 411 und 413 (Luftbild: Stadt Bochum)

länge zum Parken genutzt. Der Abstand der LSA beträgt in Fahrtrichtung Südwesten von Haltlinie zu Haltlinie ca. 440 m und in der Gegenrichtung 10 m weniger. Der Abschnitt ist in beiden Fahrrichtungen zweistreifig ausgebaut. In Fahrtrichtung Nordosten ist das erste Drittel des Abschnitts aufgrund der Parknutzung jedoch nur einstreifig befahrbar (siehe Bild 4-16).

Aus den Messungen an der Castroper Straße zwischen den LSA 411 und 413 wurden Verkehrsstärken erhoben, die als Eingangsgrößen für die mikroskopische Simulation in Kapitel 6.2 verwendet wurden.

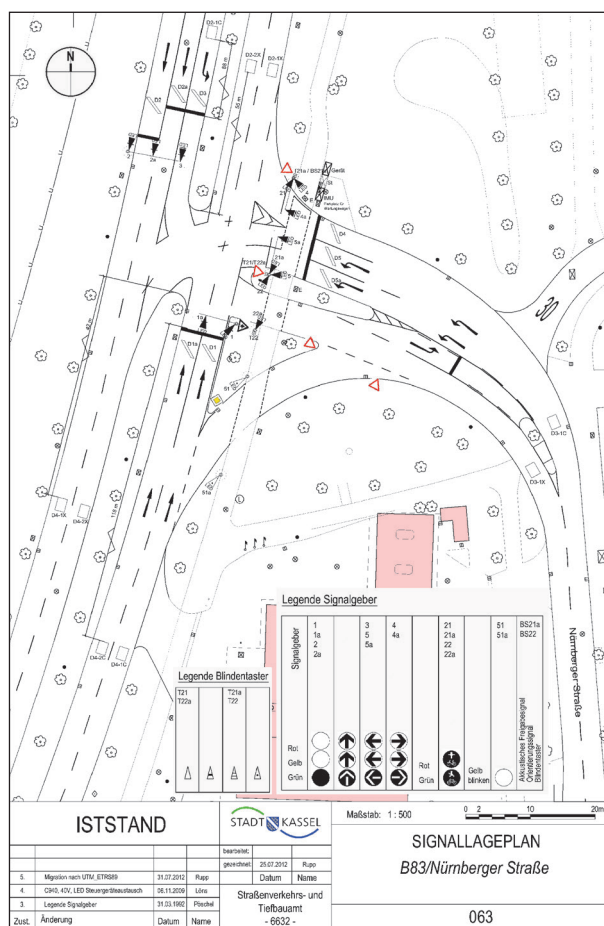
5 Messungen an Einzelknotenpunkten mit verkehrsabhängiger Steuerung

5.1 Kassel: B 83/Nürnberger Straße

5.1.1 Beschreibung des Knotenpunkts

Die Bundesstraße B 83 führt vom Stadtzentrum zur Autobahnanschlussstelle Kassel-Waldau an der Autobahn A 49 südlich der Innenstadt. Der zweibahnige Querschnitt der Bundesstraße ist vierstreifig ausgebaut. Die Nürnberger Straße ist über eine Einmündung an die B 83 angeschlossen. Der Signallageplan der Einmündung ist in Bild 5-1 dargestellt.

Den Hauptrichtungen der B 83 stehen in beiden Zufahrten der Einmündung jeweils zwei durchgehende Fahrstreifen zur Verfügung. Die Linksabbieger in die Nürnberger Straße werden in der nördlichen Zufahrt der B 83 über einen eigenen Fahrstreifen geführt. Die Rechtsabbieger in die Nürnberger Straße aus südlicher Richtung sind dem Linksabbiegestrom über eine Dreiecksinsel vorfahrrechtlich untergeordnet. Die Zufahrt der Nürnberger Straße verfügt über zwei Links- sowie einen Rechtsabbiegestreifen.



sowie durch Fußgänger über Anforderungstaster für Sehbehinderte erfolgen. Die Reihenfolge der Freigabe der Phasen 2 und 3 richtet sich nach der längsten Anforderungsdauer. Die Dauer der Freigabe wird durch maximale Bemessungszeiten sowie durch Mindestfreigabezeiten eingeschränkt. Die Bemessungsbedingungen sind über das Verhältnis der aktuell gemessenen Zeitlücke zur vorherigen Lücke realisiert.

Die Messung fand am Dienstag, den 12.11.2013 zwischen 12:00 und 17:00 Uhr statt. Die Mess-

standorte befanden sich auf Brücken über der B 83 nördlich und südlich des Knotenpunkts sowie am Fahrbahnrand an der Nürnberger Straße.

5.1.2 Messergebnisse

In Bild 5-2 sind die Einzelwerte der Fahrtzeiten der einzelnen Verkehrsströme dargestellt. Die Bezeichnung der Verkehrsströme ist Bild 5-3 zu entnehmen. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Geschwindigkeiten, Fahrtzeiten und Verlust-

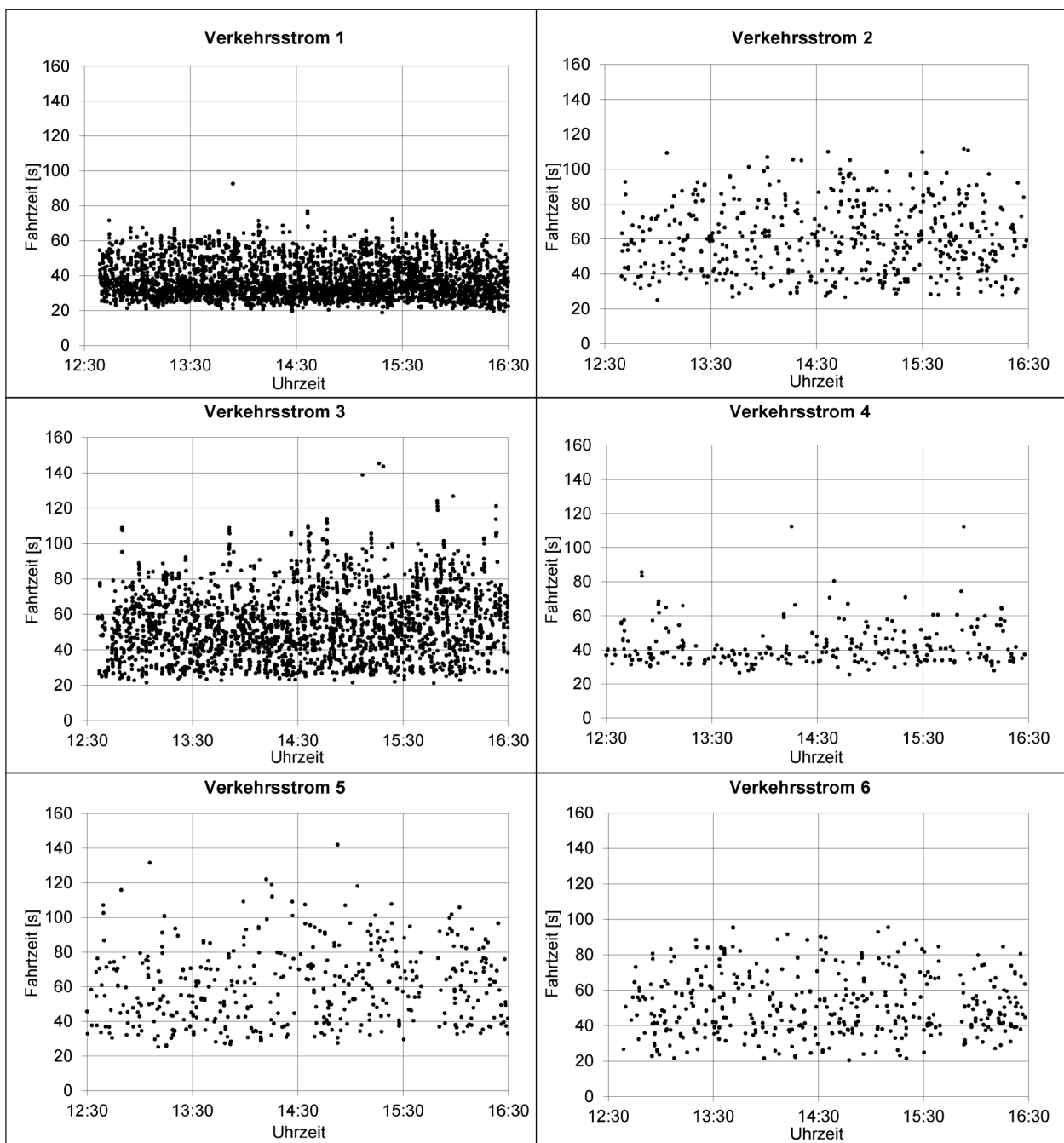


Bild 5-2: Fahrtzeiten am Knotenpunkt B 83/Nürnberger Straße in Kassel

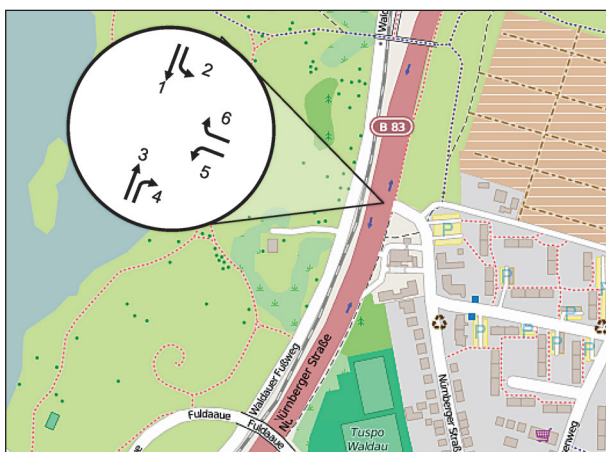


Bild 5-3: Übersichtskarte des Knotenpunkts B 83/Nürnberger Straße in Kassel mit Bezeichnung der Verkehrsströme (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendata commons.org)

zeiten in Stunden-Intervallen sowie die stündlichen Verkehrsstärken der Verkehrsströme der drei Zufahrten sind in Anhang A enthalten.

Insgesamt zeigen sich für den Verkehrsstrom 1 die geringsten Schwankungen der Fahrtzeiten. Die gemessenen Werte liegen bis auf eine Ausnahme alle im Bereich zwischen 20 und 80 s. Alle anderen signalisierten Verkehrsströme weisen deutlich höhere Schwankungsbreiten auf. Der Verkehrsstrom 4 ist nicht signalisiert.

Die Aufzeichnungen des Verkehrsrechners für den Messtag wurden vom Straßenverkehrs- und Tiefbauamt der Stadt Kassel zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden im csv-Format bereitgestellt und VBA-basiert ausgewertet. Aus dem Datensatz wurden die Signalzeiten der einzelnen Signalgruppen ermittelt. In Anhang A sind die mittleren Freigabe- und Umlaufzeiten je Signalgruppe (SG 1 bis SG 5) zu entnehmen. Die Daten dienen in Verbindung mit den gemessenen Verlustzeiten als Grundlage für die Analyse der Modelle zur Ermittlung der Wartezeiten an Einzelknotenpunkten mit verkehrsabhängiger Steuerung.

5.2 Bochum: Kirchharpener Straße/ Heinrichstraße

5.2.1 Beschreibung des Knotenpunkts

Der Knotenpunkt Kirchharpener Straße/Heinrichstraße liegt im Bochumer Stadtteil Gerthe. Die Kirchharpener Straße wurde als Umfahrungsstraße des Stadtteilzentrums angelegt. Die Straße ist als

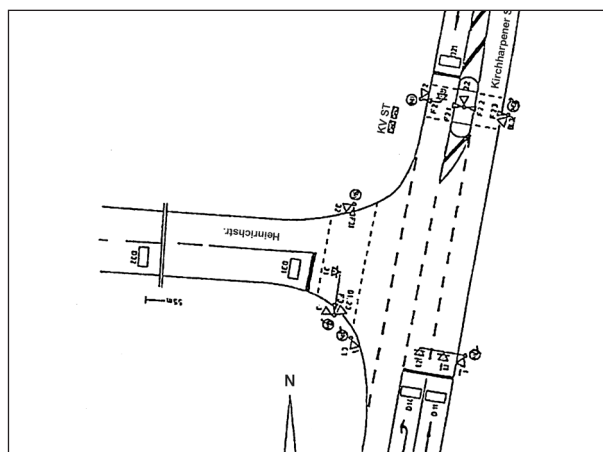


Bild 5-4: Signallageplan des Knotenpunkts Heinrichstraße/ Kirchharpener Straße in Bochum

Kreisstraße klassifiziert und im weiteren Verlauf an eine Landesstraße angeschlossen, die den Stadtteil an die Autobahnen A 40 und A 43 am Autobahnkreuz Bochum anschließt. Entlang der zweistreifigen Straße sind abschnittsweise Parkstreifen im Seitenraum angelegt. Zwischen den Parkstreifen und den Grundstücksgrenzen verlaufen beidseitig Geh- und Radwege. Die Heinrichstraße erschließt Wohngebiete zwischen der Kirchharpener Straße und der Landesstraße. Der Signallageplan der LSA des Knotenpunkts ist in Bild 5-4 dargestellt. Für die Verkehrsströme 1 und 2 auf der Kirchharpener Straße aus südlicher Richtung ist jeweils ein separater Fahrstreifen vorgesehen. Die Verkehrsströme der beiden anderen Zufahrten werden als Mischfahrstreifen geführt. In der Heinrichstraße sind zwei Detektoren angeordnet, zur Erfassung der Zeitlücken ca. 55 m vor der Haltlinie und zur Freigabeanforderung unmittelbar an der Haltlinie. Auf der Kirchharpener Straße ist in beiden Zufahrten zusätzlich jeweils ein weiterer Detektor 100 m vor der Haltlinie eingerichtet.

Bei dem Knotenpunkt handelt es sich um eine Einmündung mit vollverkehrsabhängig gesteuerter LSA. Die Signalsteuerung entspricht dem „Alles-Rot“-Prinzip mit freier Signalprogrammierung (Ordnungszahl B6 nach RiLSA, FGSV, 2015a) ohne feste Umlaufzeit. Findet in einem Zufluss eine Anforderung statt, wird aus der Grundstellung „Alles-Rot“ direkt in die angeforderte Phase geschaltet bzw. die entsprechende Phasenfolge initiiert. Dies ermöglicht eine sehr flexible Steuerung bei geringem Verkehrsaufkommen. In Bild 5-5 ist der Phasenfolgeplan der Steuerung dargestellt. Die Unterlagen wurden von der Stadt Bochum zur Verfügung gestellt.

Die Steuerung der LSA sieht vier Signalgruppen (K1, KL1, K2, K3) für den Kraftfahrzeugverkehr und drei Signalgruppen (F201, F223, F3) für den Fuß- und Radverkehr vor. Der Linksabbiegestrom aus der Kirchharpener Straße in die Heinrichstraße wird in einer eigenen Signalgruppe (KL1) signalisiert. Der Phasenfolgeplan enthält zusätzlich zur „Alles-Rot“-Phase fünf weitere Phasen (Bild 5-5). In der Steuerungslogik sind drei verschiedene Zeitlücken für den Phasenabbruch bzw. die Verlängerung von Phasen definiert. Der Logikablauf sieht eine dreistufige Prüfung der Zeitlücken je nach Dauer der Phasen vor.

Die Messung fand am Donnerstag, den 08.11.2012 statt. Der Messzeitraum betrug insgesamt fünf Stunden zwischen 11:30 und 16:30 Uhr.

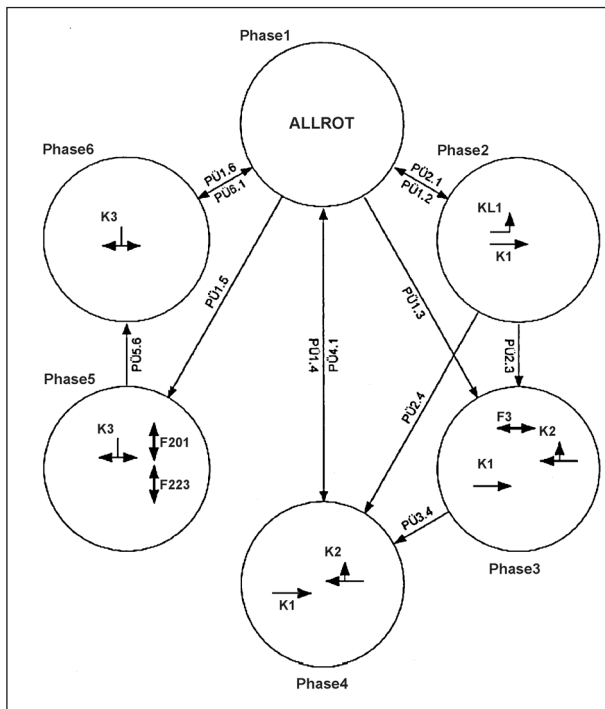


Bild 5-5: Phasenfolgeplan des Knotenpunkts Kirchharpener Straße/Heinrichstraße in Bochum

5.2.2 Messergebnisse

Aus dem Messzeitraum wurden vier Stunden von 12:00 bis 16:00 Uhr in die Auswertung einbezogen. Die Ergebnisse der Auswertung sind in den Diagrammen in Bild 5-7 enthalten. Jedes Diagramm zeigt die Fahrtzeiten für einen Verkehrsstrom. Die Bezeichnung der Verkehrsströme entspricht der Nummerierung in Bild 5-6.

Die tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse je Zufahrt ist Anhang A zu entnehmen. Für die Berechnung der Verlustzeit in den beiden Verkehrsströmen 2 und 3 der Hauptrichtung wurde die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h als Referenzgeschwindigkeit für die Ermittlung der Fahrtzeit bei freier Fahrt auf dem Messabschnitt angesetzt. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Heinrichstraße beträgt 30 km/h. Die Referenzgeschwindigkeit für die ab- und einbiegenden Verkehrsströme wurde in Abhängigkeit von der Länge der Abschnitte mit unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten abgemindert.

Für den Messtag standen aufgrund einer fehlerhaften Aufzeichnung des Verkehrsrechners keine Daten zur Verfügung. Als Anhaltswerte wurden jedoch die Werte eines Vergleichstages für die vorliegende Untersuchung überlassen. Der analysierte Datensatz stammt vom Donnerstag, dem 04.10.2012. Die Ergebnisse sind in tabellarischer Form in Anhang A enthalten.

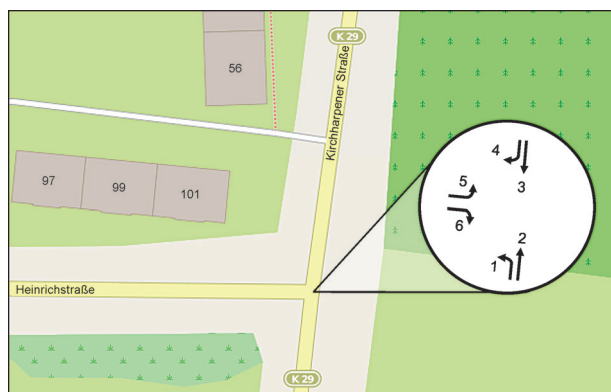


Bild 5-6: Übersichtskarte des Knotenpunkts Kirchharpener Straße/Heinrichstraße in Bochum mit Bezeichnung der Verkehrsströme (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

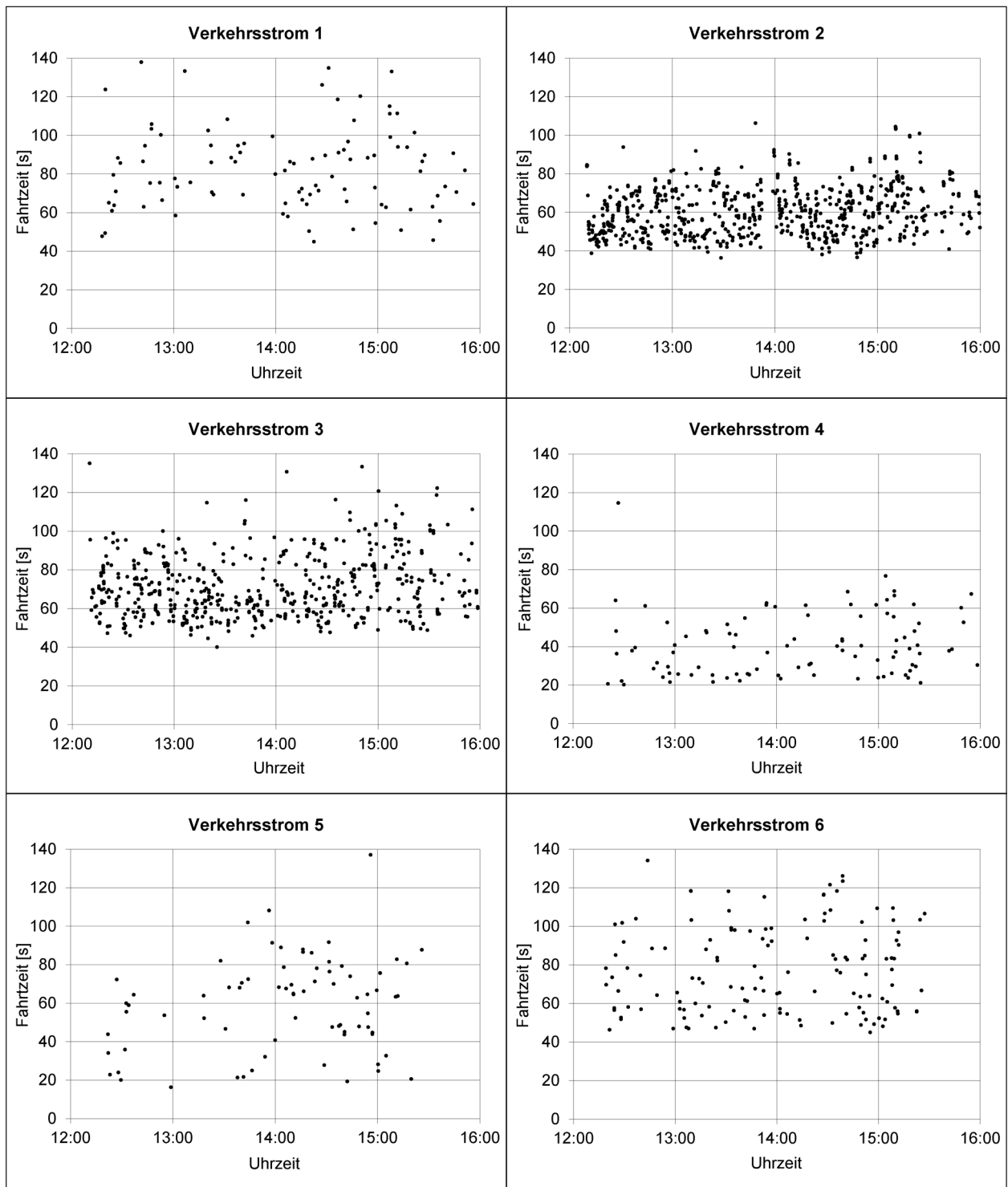


Bild 5-7: Fahrtzeiten am Knotenpunkt Kirchharpener Straße/Heinrichstraße in Bochum

5.3 Bochum: Kirchharpener Straße/ Ecksee

5.3.1 Beschreibung des Knotenpunkts

Der Knotenpunkt Kirchharpener Straße/Ecksee liegt in einem Abstand von ca. 700 m südlich des Knotenpunkts Kirchharpener Straße/Heinrichstraße in Bochum (vgl. Kap. 5.2). Die Entfernung zwischen den beiden LSA liegt im Bereich des Abstands, ab dem nach RILSA (FGSV, 2015a) ein weites Auflösen der Fahrzeugpulks zu erwarten ist. Damit ist eine zufällige Verteilung der Fahrzeugankünfte an beiden Knotenpunkten gewährleistet.

Der Signallageplan des Knotenpunkts ist in Bild 5-8 dargestellt. An der Einmündung verfügen die Links-

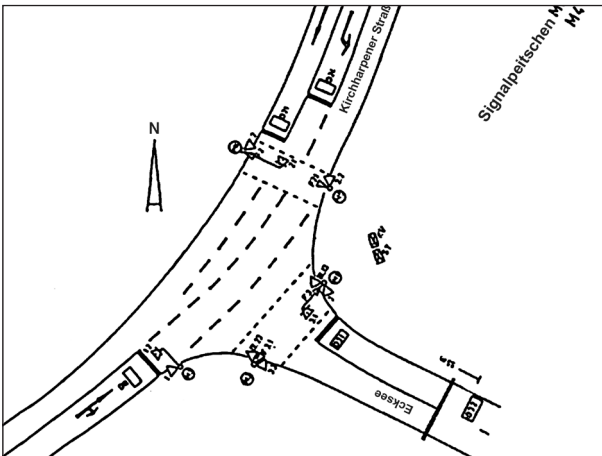


Bild 5-8: Signallageplan des Knotenpunkts Kirchharpener Straße/Ecksee in Bochum

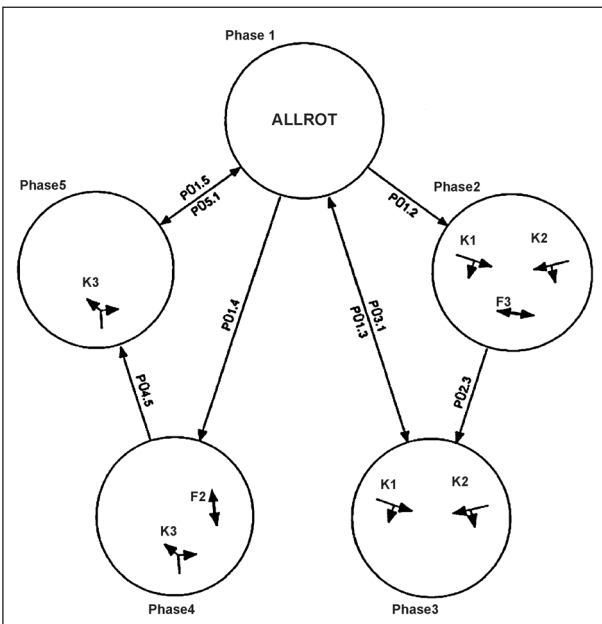


Bild 5-9: Phasenfolgeplan des Knotenpunkts Kirchharpener Straße/Ecksee in Bochum

abbieger aus der Kirchharpener Straße über einen eigenen Fahrstreifen. Im Gegensatz zum Knotenpunkt Kirchharpener Straße/Heinrichstraße werden die Linksabbieger an dieser Einmündung nicht gesichert in einer eigenen Phase geführt, sondern gemeinsam mit dem geradeaus fahrenden Verkehr der Kirchharpener Straße freigegeben. Im Signalprogramm sind daher nur drei Signalgruppen für den Kraftfahrzeugverkehr und zwei Signalgruppen für den Fuß- und Radverkehr vorgesehen. Mit der Alles-Rot-Phase sind fünf Phasen im Signalprogramm enthalten. Die Fußgängersignale werden bei Anforderung gemeinsam mit dem Kraftfahrzeugverkehr freigegeben. Liegen keine Anforderungen vor, wird nur der Kraftfahrzeugverkehr freigegeben. Der zugehörige Phasenfolgeplan ist in Bild 5-9 dargestellt.

Die Messung am Knotenpunkt Kirchharpener Straße/Ecksee fand am Donnerstag, den 08.11.2012 zwischen 07:30 und 12:30 Uhr statt.

5.3.2 Messergebnisse

Die Auswertungen umfassen den Zeitraum von 08:00 bis 12:00 Uhr. Die Zufahrt Nord auf der Kirchharpener Straße verfügt über jeweils einen separaten Fahrstreifen für den Geradeaus- und den Linksabbiegeverkehr in die Straße Ecksee (Verkehrsströme 1 und 2). Die Verkehrsströme 3 und 4 sowie 5 und 6 der beiden anderen Zufahrten werden jeweils auf einem Mischfahrstreifen geführt. Die Bezeichnungen der Verkehrsströme sind in Bild 5-10 dargestellt.



Bild 5-10: Übersichtskarte des Knotenpunkts Kirchharpener Straße/Ecksee in Bochum mit Bezeichnung der Verkehrsströme (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

Die Diagramme in Bild 5-11 zeigen die Einzelwerte der Fahrzeiten jedes Verkehrsstroms. Die zu Stunden-Intervallen aggregierten Ergebnisse der Erhebungen sind den Tabellen in Anhang A zu entnehmen.

Für den Messtag standen aufgrund einer fehlerhaften Aufzeichnung des Verkehrsrechners der Stadt

Bochum keine Daten der Signalsteuerung zur Verfügung. Als Anhaltswerte wurden von der Stadt Bochum jedoch die Werte eines Vergleichstages für die vorliegende Untersuchung überlassen. Der analysierte Datensatz stammt vom Donnerstag, den 04.10.2012. Die Analyseergebnisse sind in Anhang A enthalten.

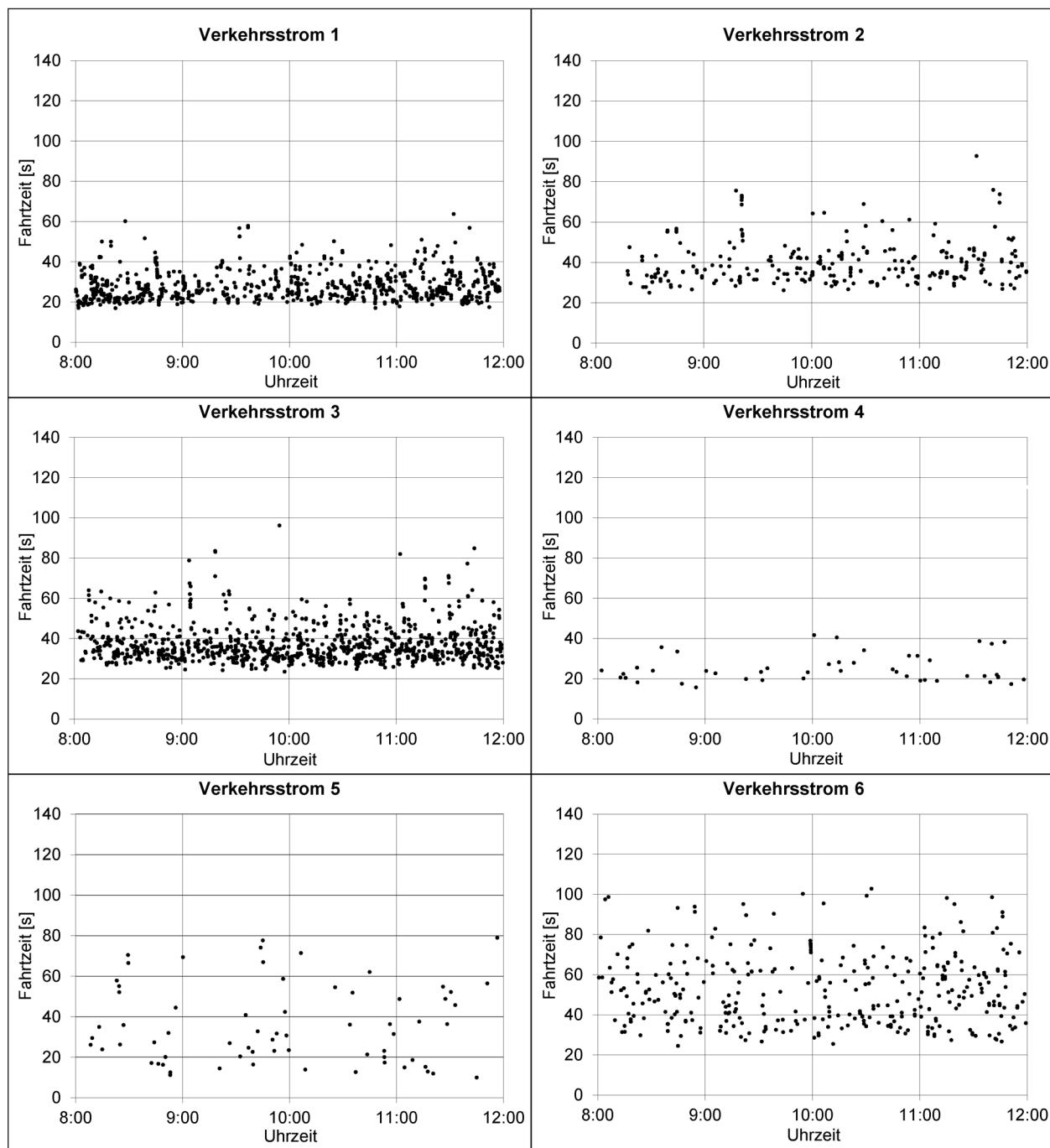


Bild 5-11: Fahrzeiten am Knotenpunkt Kirchharpener Straße/Ecksee in Bochum

5.4 Bochum: Bövinghauser Hellweg/ Dieselstraße

5.4.1 Beschreibung des Knotenpunkts

Der Knotenpunkt Bövinghauser Hellweg/Dieselstraße liegt im Nordosten Bochums an der Stadtgrenze zu Castrop-Rauxel und Herne. Die Planungsunterlagen der LSA-Steuerung der Einmündung wurden von der Stadt Bochum zur Verfügung gestellt. Der Signallageplan ist in Bild 5-13 dargestellt. An der Einmündung stehen den Verkehrsströmen in der östlichen und in der südlichen Zufahrt jeweils ein eigener Fahrstreifen zur Verfügung. Die Fahrstreifen werden auch jeweils durch getrennte Signalgruppen signalisiert.

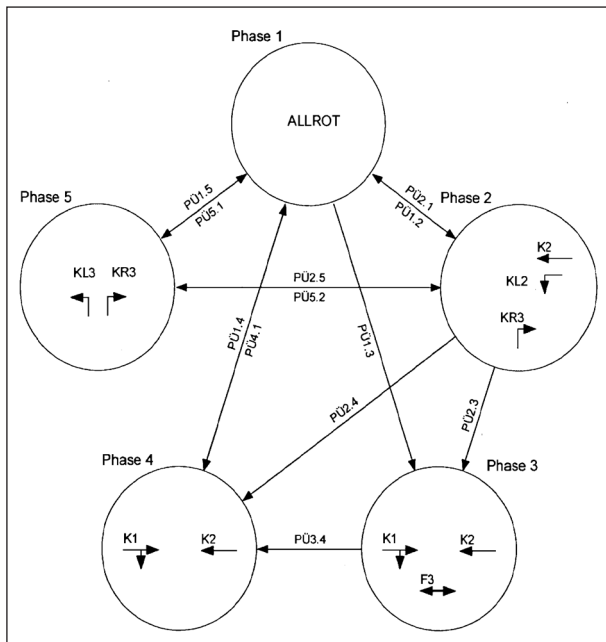


Bild 5-12: Phasenfolgeplan des Knotenpunkts Bövinghauser Hellweg/Dieselstraße in Bochum

Das Signalprogramm besteht aus fünf Phasen. Die Zusammensetzung des Signalprogramms erfolgt vollverkehrsabhängig. Die Verkehrsströme werden durch fünf Signalgruppen gesteuert. Bis auf die Signalgruppe K1 der Zufahrt West steuert jede Signalgruppe nur einen Fahrstreifen. Die Phaseinteilung sieht gesicherte Freigaben der Linksabbieger vor. In Bild 5-12 ist der Phasenfolgeplan der LSA-Steuerung dargestellt. Die Rechtsabbieger aus der Dieselstraße in der Zufahrt Süd werden sowohl in Phase 2 gemeinsam mit der Zufahrt im Osten als auch in Phase 5 gemeinsam mit dem benachbarten Linksabbiegestreifen freigegeben. Die Phase 3 wird nur auf Anforderung durch Fußgänger aktiviert. Der Fuß- und Radverkehr ist bedingt durch die Lage des Knotenpunkts bei der Auswertung der Messungen vernachlässigbar. Die Detektion des Kfz-Verkehrs erfolgt über Induktionsschleifen. Jede Signalgruppe wird über haltliniennahe Detektoren in einem Abstand von 3 m zur Haltlinie erfasst. Die Bemessung der Freigabezeiten der einzelnen Phasen erfolgt über zwei Detektoren je Zufahrt in einem Abstand von ca. 100 m und 55 m zur Haltlinie. Die Anforderung zur Freigabe des Linksabbiegesignals KL2 erfolgt nur über den haltliniennahen Detektor.

5.4.2 Messergebnisse

Die Messungen an der Einmündung Bövinghauser Hellweg/Dieselstraße fanden am Donnerstag, den 15.11.2012 in der Zeit von 12:00 Uhr bis 16:00 Uhr statt. In Bild 5-15 sind die Ergebnisse der Messung dargestellt. Die Diagramme zeigen die Einzelwerte für jeden Verkehrsstrom der Einmündung. Die Bezeichnung der Verkehrsströme ist in Bild 5-14 enthalten. Die stärkste Belastung wurde für den

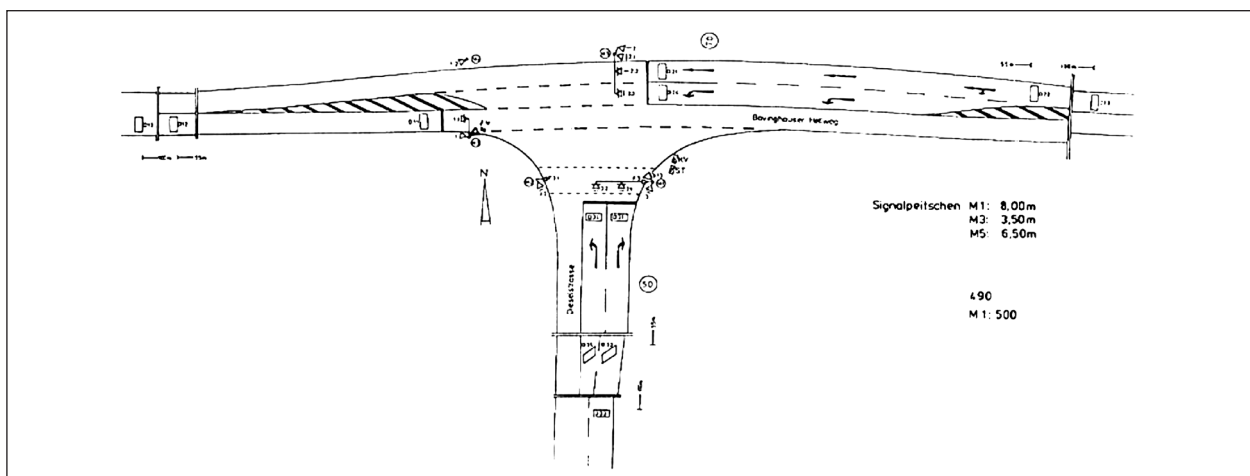


Bild 5-13: Signallageplan des Knotenpunkts Bövinghauser Hellweg/Dieselstraße in Bochum

Rechtsabbiegestrom aus der Dieselstraße (Zufahrt Süd) in den Bövinghauser Hellweg nach Osten erhoben.

Insgesamt konnten an dem Knotenpunkt während der Messungen nur geringe Verkehrsstärken beobachtet werden. Die aggregierten Ergebnisse sind in Anhang A enthalten. Die höchsten Verlustzeiten fallen für den am schwächsten belasteten Verkehrsstrom 4 der Zufahrt West des Bövinghauser Hellwegs an. Zwischen 12:00 Uhr und 13:00 Uhr ergibt sich für diesen Verkehrsstrom die QSV C. In den restlichen Intervallen wird die QSV B erreicht.

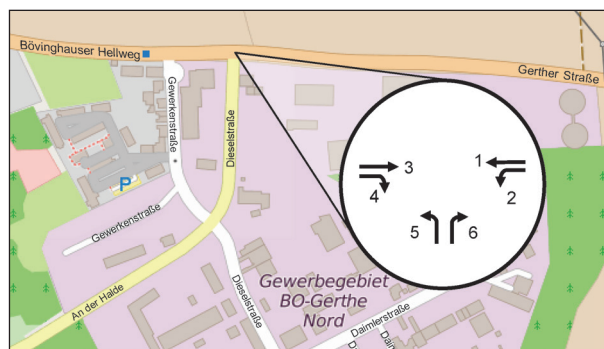


Bild 5-15: Übersichtskarte des Knotenpunkts Bövinghauser Hellweg/Dieselstraße in Bochum mit Bezeichnung der Verkehrsströme (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

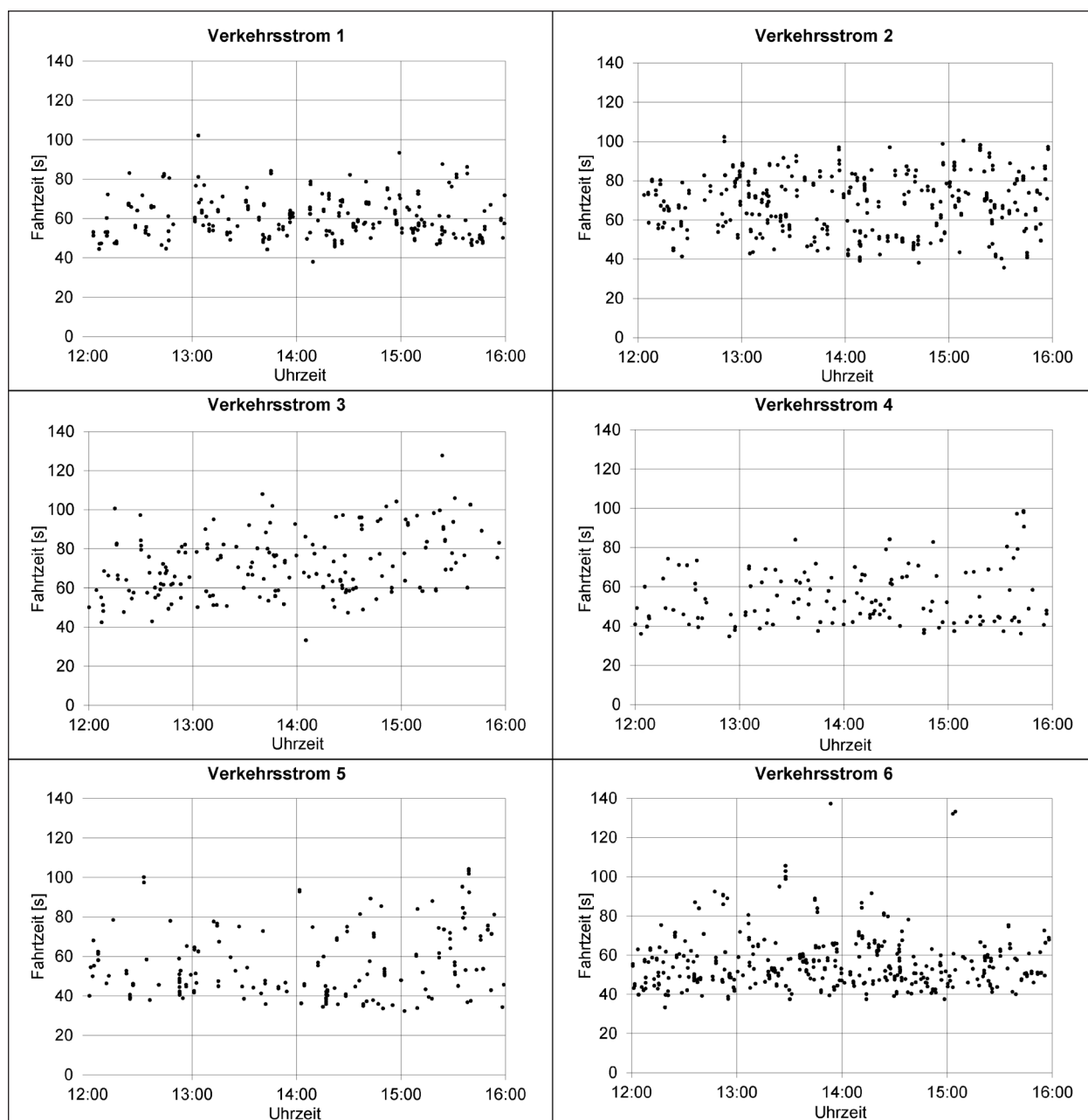


Bild 5-14: Fahrzeiten am Knotenpunkt Bövinghauser Hellweg/Dieselstraße in Bochum

Für den gesamten Zeitraum der Messung wurden die Daten des Steuergeräts der Anlage von der Stadt Bochum über den zentralen Verkehrsrechner aufgezeichnet. Anhand der Daten wurden die mittleren Freigabezeiten und Umlaufzeiten je Signalgruppe bestimmt. Die Daten wurden hierfür zunächst nach Umläufen mit vollständigen Phasenfolgen gefiltert. Für diese LSA entspricht dies dem Ablauf PH1-PH5-PH2-PH4-PH1. Die Ergebnisse sind in Anhang A enthalten.

5.5 Karlsruhe: Haid-und-Neu-Straße/Ostring

5.5.1 Beschreibung des Knotenpunkts

Der Knotenpunkt Haid-und-Neu-Straße/Ostring liegt im Osten des Stadtzentrums von Karlsruhe. Die Haid-und-Neu-Straße verbindet die im Nordosten gelegenen Stadtteile mit dem Stadtzentrum. Über den Ostring besteht Anschluss zur Durlacher Allee und im weiteren zum Fernverkehr über die Autobahn A 5.

Bei dem Knotenpunkt handelt es sich um eine Einmündung. Auf der Haid-und-Neu-Straße stehen dem stadtauswärts in Fahrtrichtung Ost gerichteten Verkehr zwei Fahrstreifen zur Verfügung. Auf dem rechten Fahrstreifen wird der Rechtsabbiegerverkehr in den Ostring mitgeführt. Dieser Verkehrsstrom wird kurz vor der Haltlinie über eine Dreiecksinsel ohne Signalisierung vom restlichen Knotenpunkt getrennt und in den Ostring geleitet.

Die LSA-Steuerung der Einmündung erfolgt in sieben Phasen. Das Signalprogramm wird vollverkehrsbahngängig zusammengesetzt. Eine Koordinierung

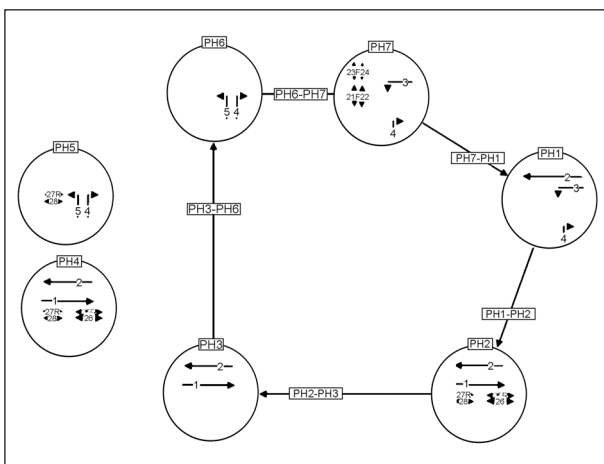


Bild 5-16: Phasenfolgeplan des Knotenpunkts Haid-und-Neu-Straße/Ostring in Karlsruhe

mit anderen LSA ist nicht vorgesehen. Die Grundstellung der Anlage zeigt in Phase 1 Dauerfreigabe für die stadteinwärts gerichteten Verkehrsströme auf der Haid-und-Neu-Straße sowie den vertraglichen Rechtsabbiegestrom aus dem Ostring auf die Haid-und-Neu-Straße. Die restlichen Phasen werden nur auf Anforderung freigegeben. Alle Abbiegeströme werden gesichert geführt. Die Mindestfreigabezeit der Signalgruppen in Phase 1 liegt bei 10 s. Die übrigen Signalgruppen erhalten eine Freigabezeit von mindestens 5 s. Jede Freigabezeit kann nach Ablauf der Mindestfreigabezeit abgebrochen werden. Ebenso ist eine Verlängerung der Freigabezeit durch die Detektion von Zeitlücken möglich. Wird eine Zeitlücke von 3 s überschritten, bricht die Freigabezeit nach Erreichen der Minstdauer ab. Die Phase 1 kann bei vorliegenden Anforderungen anderer Phasen bis zur maximalen Bemessungszeit von 120 s verlängert werden. In Bild 5-16 ist der Phasenfolgeplan mit dem Ablauf bei einer Anforderung aller Signalgruppen dargestellt. Die Planungsunterlagen der LSA des Knotenpunkts wurden von der Fa. Siemens zur Verfügung gestellt.

5.5.2 Messergebnisse

Die Messungen am Knotenpunkt Haid-und-Neu-Straße/Ostring fanden am 17.10.2013 zwischen 08:00 und 12:00 Uhr statt. Die Durchführung erfolgte in Kooperation mit dem Institut für Verkehrswesen des Karlsruher Instituts für Technologie.

Bild 5-17 zeigt die Einmündung mit der Nummerierung der Verkehrsströme. Die Haid-und-Neu-Straße ist in beiden Fahrtrichtungen zweistreifig ausge-

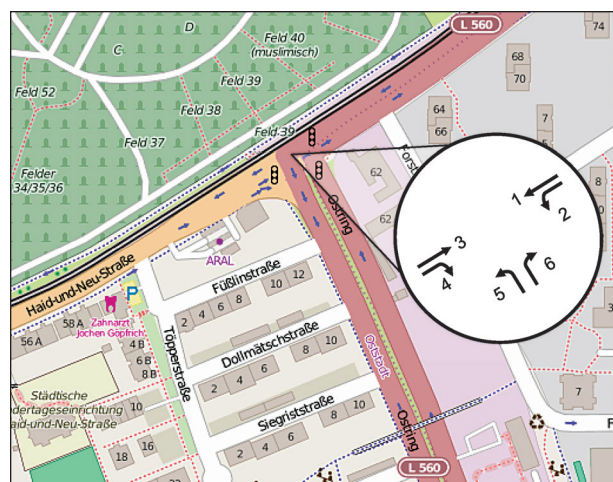


Bild 5-17: Übersichtskarte des Knotenpunkts Haid-und-Neu-Straße/Ostring in Karlsruhe mit Bezeichnung der Verkehrsströme (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

baut. Die Zufahrt im Westen ist bis etwa 100 m vor dem Knotenpunkt nur einstreifig nutzbar, da der rechte Fahrstreifen für den ruhenden Verkehr freigegeben ist. Der Verkehrsstrom 3 wird zweistreifig über den Knotenpunkt geführt. Der Verkehrsstrom 4 wird kurz vor der Haltlinie durch eine Dreiecksinsel ohne vorherigen Ausfädelungsfahrstreifen von der Signalisierung getrennt und vorfahrrechtlich untergeordnet in den Ostring geleitet. Vom Beginn der Dreiecksinsel bis zur Haltlinie verbleiben dem Geradeausfahrverkehr zwei Aufstellplätze auf dem rech-

ten Fahrstreifen. In der Gegenrichtung wird der linke Fahrstreifen als Linksabbiegestreifen genutzt. Dem Geradeausfahrverkehr von Verkehrsstrom 1 steht nur der rechte Fahrstreifen zur Verfügung. Der Ostring ist ebenfalls in beide Fahrrichtungen zweistreifig befahrbar. Die Fahrtrichtungen sind durch einen breiten Grünstreifen baulich voneinander getrennt. Den Verkehrsströmen 5 und 6 steht je ein Fahrstreifen am Knotenpunkt zur Verfügung. Die Ergebnisse der Fahrtzeiterhebungen sind in Bild 5-18 grafisch aufbereitet. Die tabellarischen

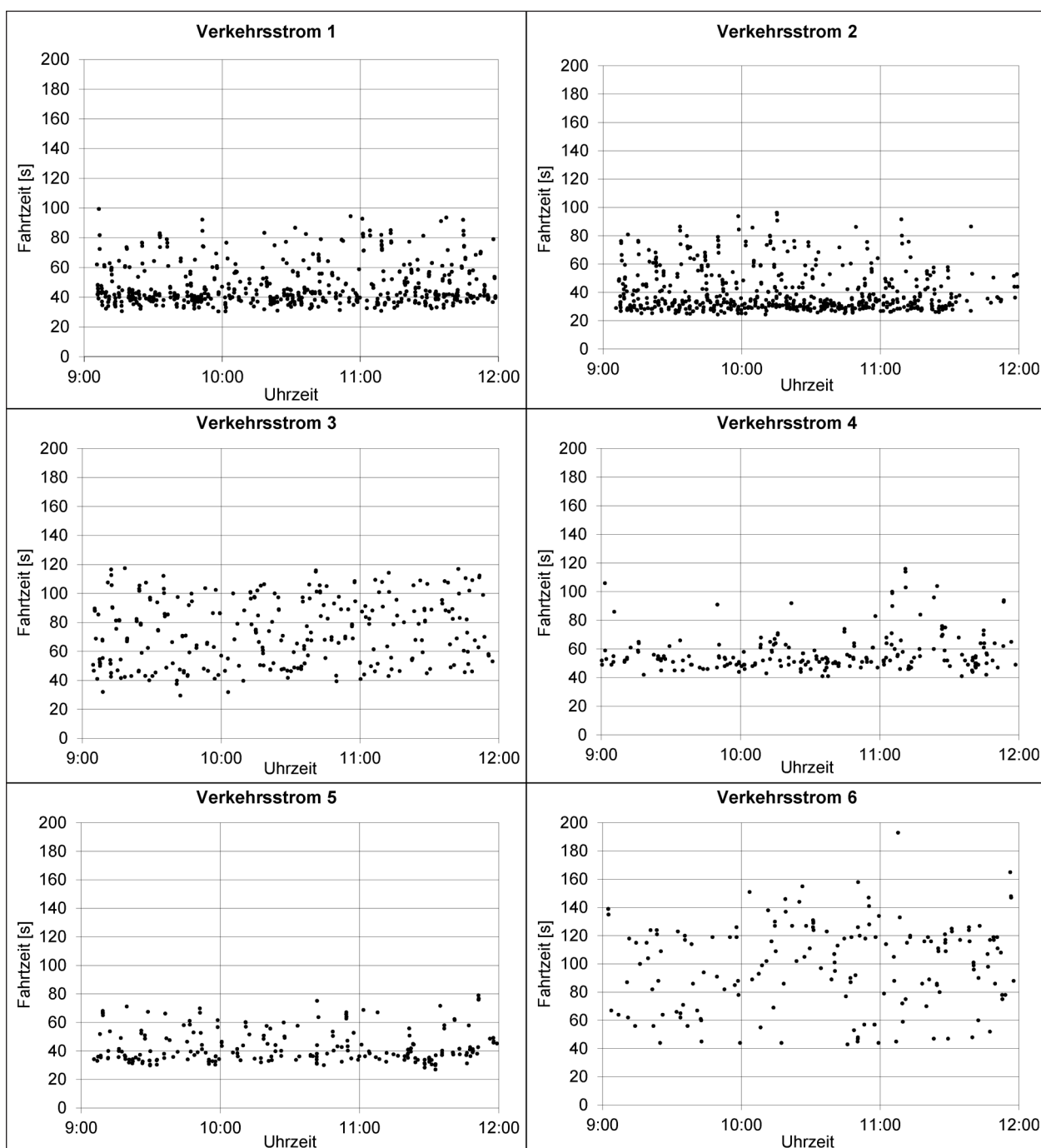


Bild 5-18: Fahrtzeiten am Knotenpunkt Haid-und-Neu-Straße/Ostring in Karlsruhe

Ergebnisse der Fahrtzeiterhebungen sind Anhang A zu entnehmen.

Die Daten des Steuergerätes der LSA wurden von der Stadt Karlsruhe für den Zeitraum der Messungen mitgeschrieben und für die vorliegende Untersuchung zur Verfügung gestellt. Die mittleren Freigabe- und Umlaufzeiten für Umläufe mit Anforderungen aller Signalgruppen sind in Anhang A zu Stunden-Intervallen zusammengefasst. Das Signalprogramm der LSA sieht vor, die Phase 1 (Verkehrsströme 1, 2 und 6 in Bild 5-17) mit Dauergrün freizugeben, falls keine Anforderungen vorliegen. Die Verkehrsströme werden von den Signalgruppen 2, 3 und 4 gesteuert. In den Ergebnissen zeigte sich, dass die Freigabezeit der Signalgruppe 2 von Verkehrsstrom 1 die Dauer der Umlaufzeiten an dieser LSA maßgeblich bestimmt.

5.6 Lünen: Kamener Straße/ Kreuzstraße

5.6.1 Beschreibung des Knotenpunkts

Der Knotenpunkt Kamener Straße/Kreuzstraße liegt östlich des Zentrums der Stadt Lünen. Der Knotenpunkt ist vierarmig ausgebaut. Drei der vier Zufahrten sind Mischfahrstreifen. Nur der Linksabiegestrom in der Zufahrt im Westen aus Richtung Lünen verfügt über einen eigenen Fahrstreifen.

Der Signallageplan des Knotenpunkts ist in Bild 5-19 dargestellt. Die Signalisierung des Knotenpunkts erfolgt über insgesamt 40 Phasen. In Phase

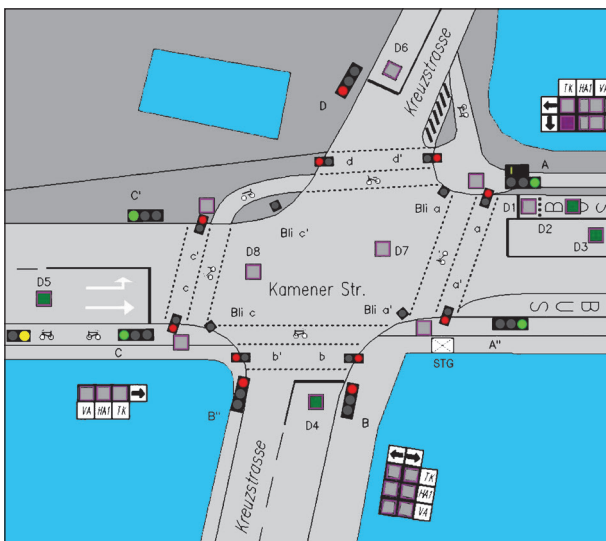


Bild 5-19: Signallageplan des Knotenpunkts Kamener Straße/ Kreuzstraße in Lünen

1 werden die Hauptrichtungen der Zufahrten A und C dauerhaft gemeinsam freigegeben. Diese Phase bildet die Grundstellung der Anlage. Die Nebenrichtungen werden auf Anforderung nacheinander freigegeben. Die Detektion erfolgt über haltliniennahe Detektoren. In den Hauptrichtungen ist zusätzlich je ein weiterer Detektor im Abstand von 30 bis 40 m zur Haltlinie angeordnet. Über die Detektoren werden Zeittücken und Belegungsgrade abgefragt. Die Steuerungslogik ist so ausgelegt, dass nach jeder Phase für den Individualverkehr eine Phase für den öffentlichen Verkehr aus Richtung Osten eingeschoben werden kann. Die Zufahrten A, B und C werden von Buslinien befahren. In den Zufahrten A und B wird nach Fahrtrichtung der ankommenden Busse unterschieden. Die Schleifendetektoren innerhalb des Knotenpunkts dienen zur Entscheidung, ob vor der Freigabe der Nebenrichtung in eine Nachlaufphase von Phase 1 geschaltet wird oder die beiden Hauptrichtungen gemeinsam beendet werden. Die Konfiguration der Anlage ist so eingerichtet, dass der ÖV und der Fußgängerverkehr gegenüber dem Kfz-Verkehr vorrangig behandelt werden.

Das Steuergerät der Anlage ist an den Verkehrsrechner der Stadt Lünen angeschlossen. Die Daten des Gerätes wurden am Messtag durch die Stadt Lünen archiviert und für die Analyse zur Verfügung gestellt.

5.6.2 Messergebnisse

Die Messung fand am 21.11.2013 in der Zeit von 07:00 bis 13:00 Uhr statt. Von diesem Messzeitraum wurden insgesamt vier Stunden ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Stunden-

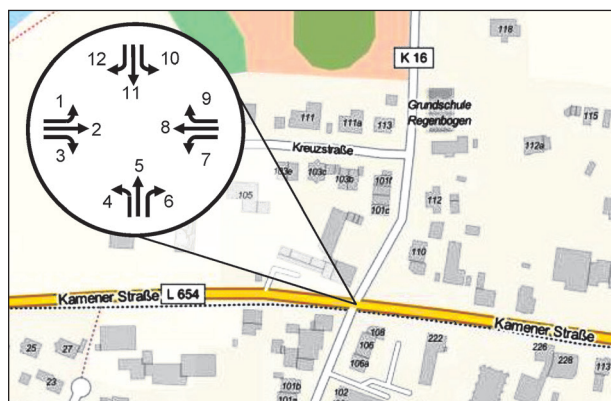


Bild 5-20: Übersichtskarte des Knotenpunkts Kamener Straße/ Kreuzstraße in Lünen mit Bezeichnung der Verkehrsströme (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

Intervallen zusammengefasst in Anhang A enthalten. Die Einzelwerte der Messungen sind in den Diagrammen in Bild 5-21 und Bild 5-22 dargestellt. Die verwendeten Bezeichnungen der Verkehrsströme sind der Übersichtsdarstellung des Knotenpunkts in Bild 5-20 zu entnehmen.

Über den Anschluss des Steuergeräts der LSA an den Verkehrsrechner der Stadt Lünen werden die Signaldaten ständig archiviert und über einen gewissen Zeitraum zur Qualitätssicherung vorge-

halten. Für den Zeitraum der Messung wurden die protokollierten Daten von der Stadt Lünen für die Analyse zur Verfügung gestellt. Die Signaldaten konnten für diesen Knotenpunkt aufgrund der Datenstruktur nicht nach vollständigen Abläufen des Signalprogramms gefiltert werden. Daher ergeben sich unterschiedliche Umlaufzeiten der einzelnen Signalgruppen. Diese wurden für jede Signalgruppe über den Freigabezeitbeginn ermittelt. Die Zusammenstellung der Ergebnisse findet sich in Anhang A.

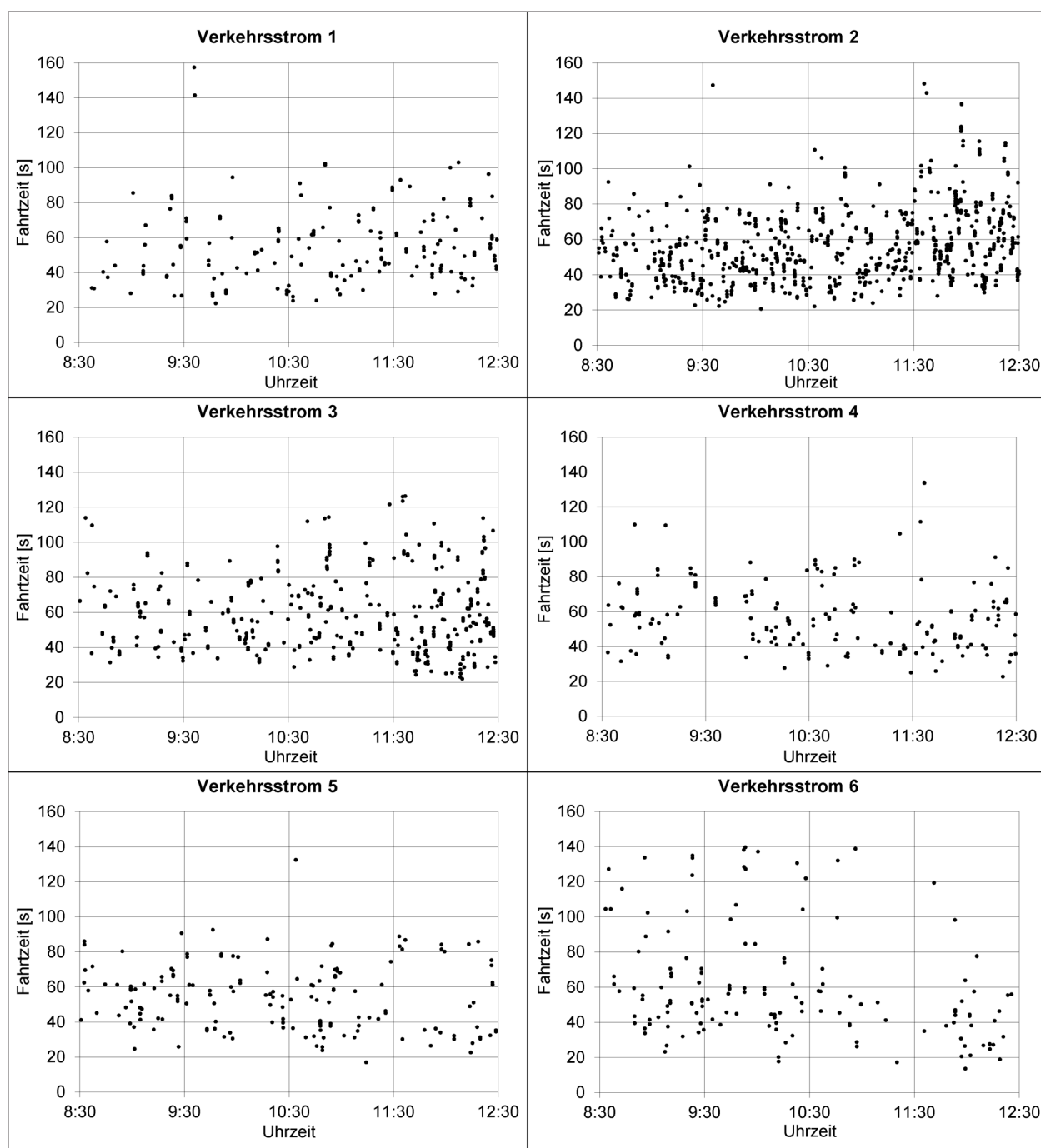


Bild 5-21: Fahrtzeiten der Verkehrsströme 1 bis 6 am Knotenpunkt Kamener Straße/Kreuzstraße in Lünen

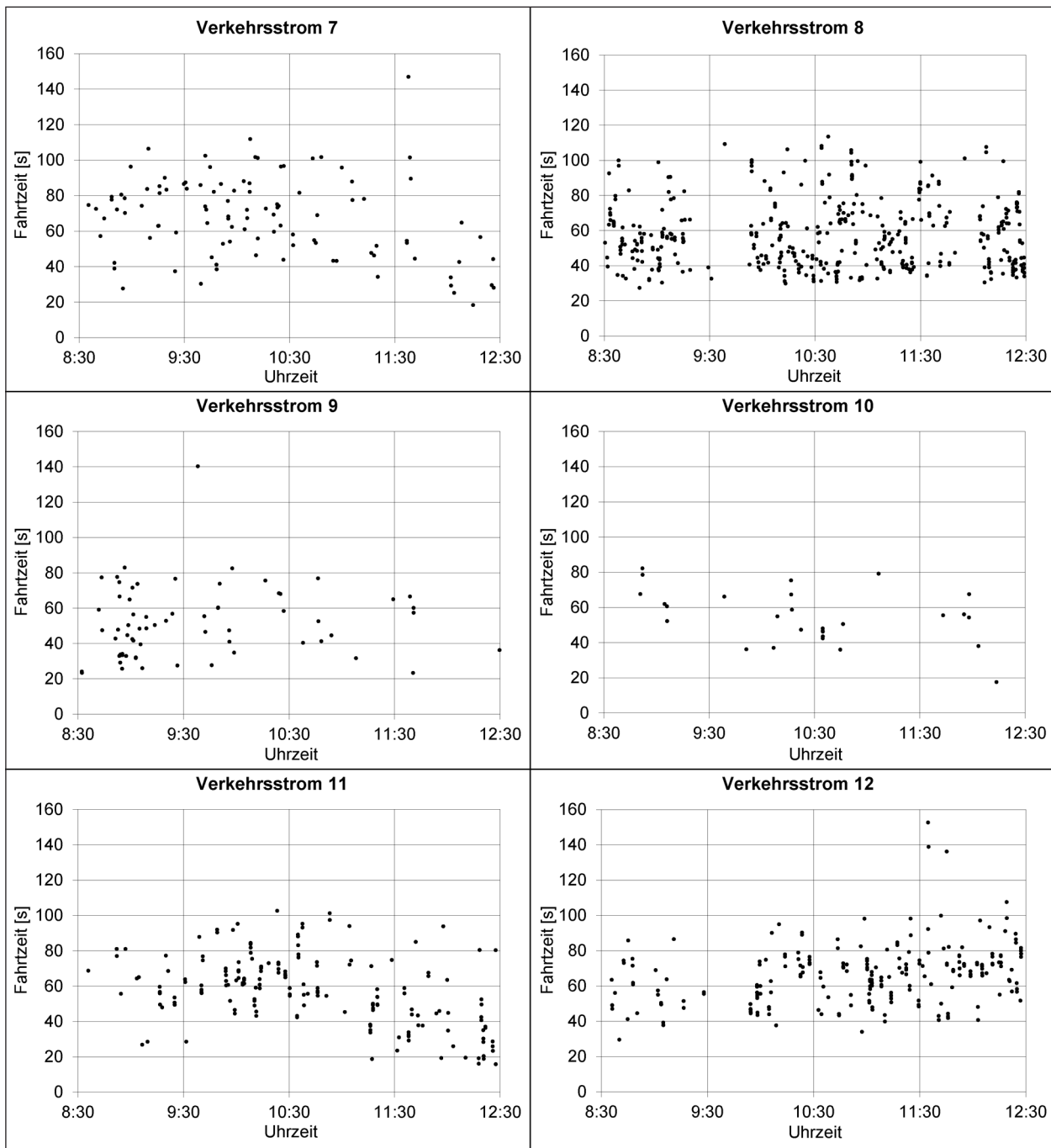


Bild 5-22: Fahrtzeiten der Verkehrsströme 7 bis 12 am Knotenpunkt Kamener Straße/Kreuzstraße in Lünen

5.7 Hennef: A 560/B 8

5.7.1 Beschreibung des Knotenpunkts

Der vierarmige Knotenpunkt liegt am Ende der Autobahn A 560 östlich der Stadt Hennef. Der Knotenpunkt verbindet die Autobahn mit der Bundesstraße B 8 in Richtung Limburg und Gießen. Diese beiden Zufahrten bilden die Hauptrichtungen an dem Knotenpunkt. Die Nebenrichtungen bilden die östliche Ortsausfahrt der Stadt Hennef (Wingenshof) sowie der Anschluss an ein

Gewerbegebiet (Europaallee). Bis auf die Ortsausfahrt werden die Rechtsabbieger in allen Zufahrten über Dreiecksinseln auf einem eigenen Fahrstreifen ohne Signalisierung geführt. Die Rechtsabbieger in der Ortsausfahrt werden gemeinsam mit dem Geradeausverkehr geführt. Dieser Fahrstreifen bildet den einzigen Mischfahrstreifen. In beiden Hauptrichtungen stehen dem Geradeausverkehr jeweils zwei Fahrstreifen zur Verfügung. Der Signallageplan des Knotenpunkts ist in Bild 5-23 dargestellt.

Die Signalisierung des Knotenpunkts erfolgt vollverkehrsabhängig mit Phasensteuerung. Liegen keine Anforderungen aus den Nebenrichtungen vor, verbleibt die Anlage in der Ruhestellung „Haupttrichtung-Grün“. Für den Tagesablauf sind zwei Programme hinterlegt. Das Signalprogramm SP 4 wird in den Morgenspitzenstunden von 06:00 bis 10:00 Uhr geschaltet. Das Signalprogramm SP 3 ist für die rest-

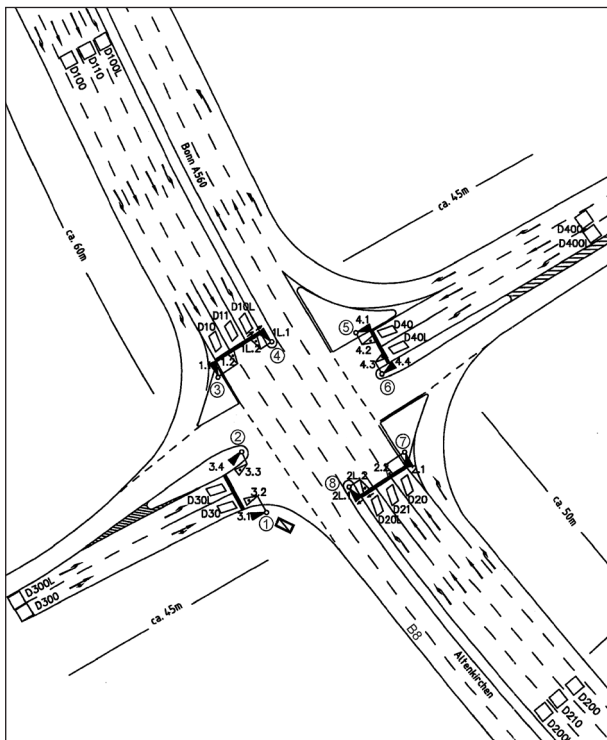


Bild 5-23: Signallageplan des Knotenpunkts A 560/B 8 in Hennef

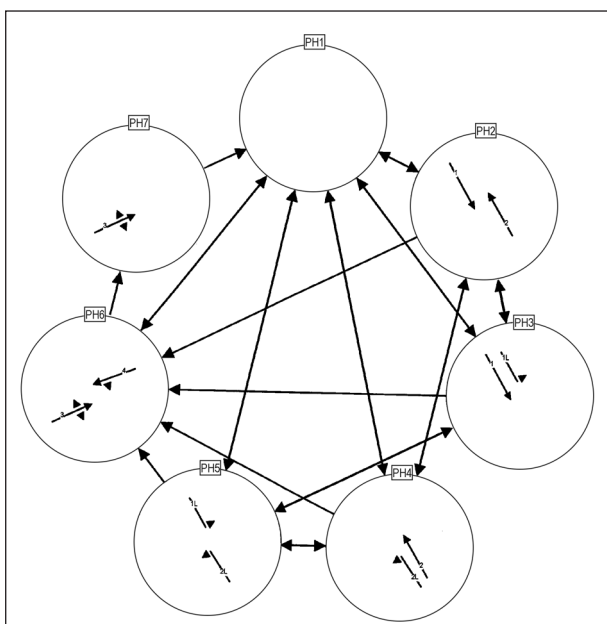


Bild 5-24: Phasenfolgeplan des Knotenpunkts A 560/B 8 in Hennef

lichen Tages- und Nachtstunden hinterlegt. Die Steuerung sieht sechs Signalgruppen vor. In den Haupttrichtungen werden die Linksabbieger mit eigenen Signalgruppen gesichert geführt. In den Nebenrichtungen werden die Verkehrsströme mit je einer Signalgruppe bedient. In jeder Zufahrt wird der Individualverkehr sowohl mit haltliniennahen als auch -fernen Induktionsschleifen detektiert. Die Detektoren liegen in einem Abstand von 1 m (haltliniennah) bis 60 m zur Haltlinie. Zusätzlich zu den Mindestschaltzeiten jeder Phase sind in der Steuerung maximale Bemessungszeiten hinterlegt, bis zu deren Ablauf die Phasen zeitlückengesteuert verlängert werden können.

Die Phasensteuerung baut auf insgesamt sieben Phasen auf (Bild 5-24). In Phase 1 sind alle Signale gesperrt. Die Phase 2 sieht die Freigabe für die Geradeausströme der Haupttrichtungen vor. In den Phasen 3 und 4 werden in den beiden Zufahrten jeweils die Linksabbieger zusätzlich zu den Geradeausströmen freigegeben. Phase 5 dient der gemeinsamen Freigabe der Linksabbiegeströme der beiden Haupttrichtungen. In Phase 6 wird der gesamte Verkehr aus den Nebenrichtungen freigegeben. Die östliche Zufahrt aus der Ortsausfahrt kann in Phase 7 unbehindert abfließen. Der Ablauf setzt sich aus insgesamt 24 Phasenfolgen zusammen. Die Planungsunterlagen der LSA des Knotenpunkts wurden von der Fa. Siemens zur Verfügung gestellt.

5.7.2 Messergebnisse

Die Messungen fanden am 03.06.2014 statt. Dabei wurden die Fahrtzeiten über einen Zeitraum von 12 Stunden aufgezeichnet. Davon wurde der Zeitraum von 07:00 bis 17:00 Uhr ausgewertet. Bild 5-25 zeigt

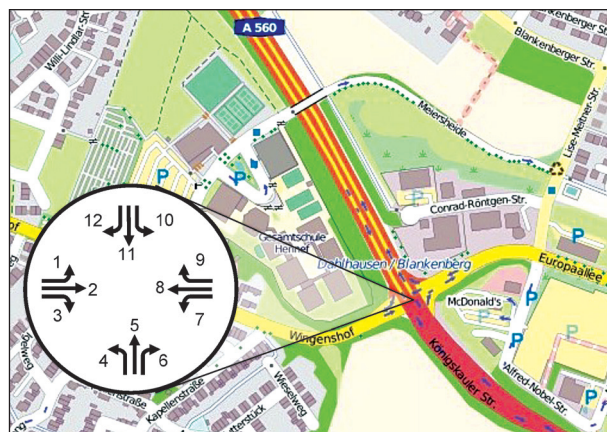


Bild 5-25: Übersichtskarte des Knotenpunkts A 560/B 8 in Hennef mit Bezeichnung der Verkehrsströme (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

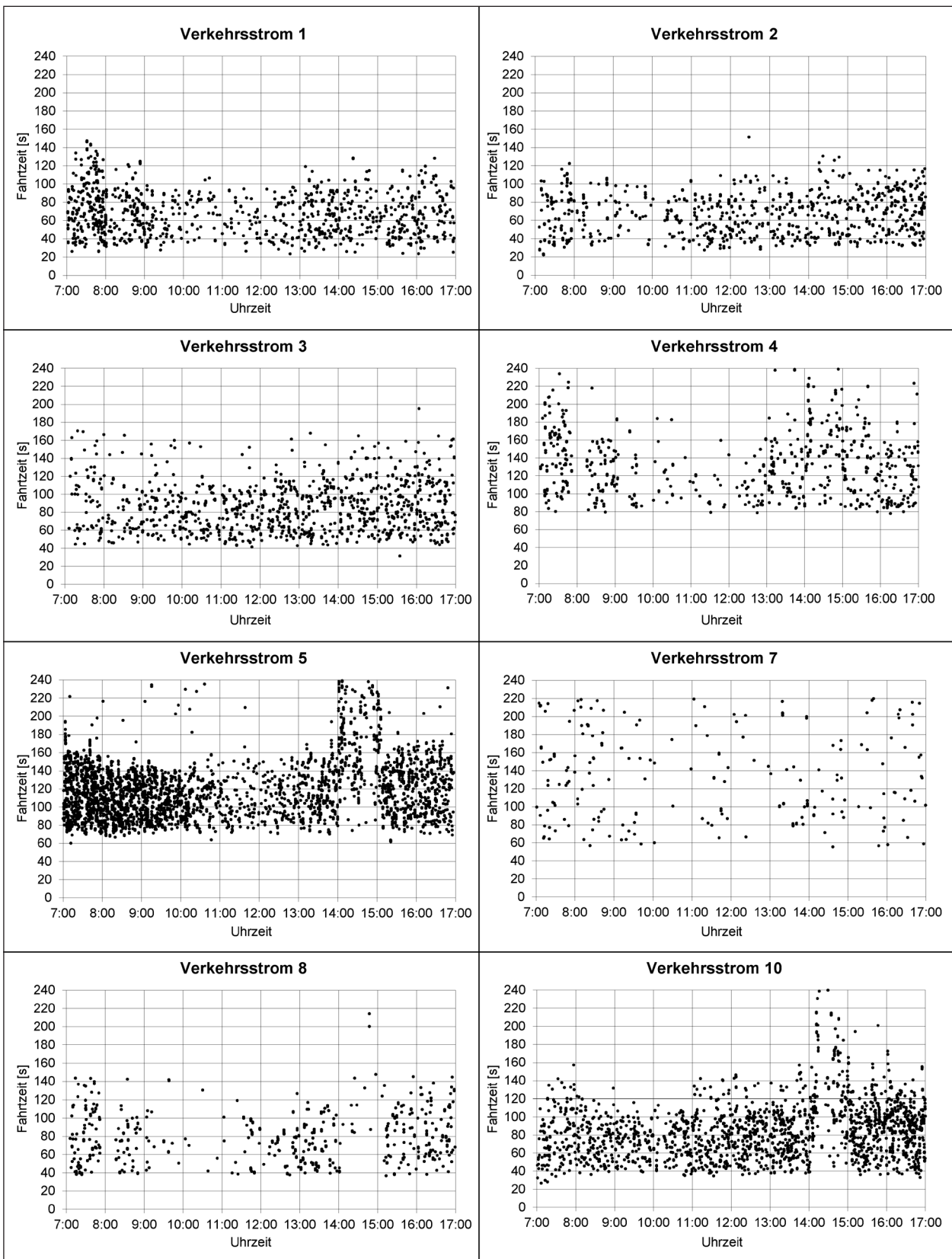


Bild 5-26: Fahrtzeiten der signalisierten Verkehrsströme (1 bis 5, 7,8 und 10) am Knotenpunkt A 560/B 8 in Hennef

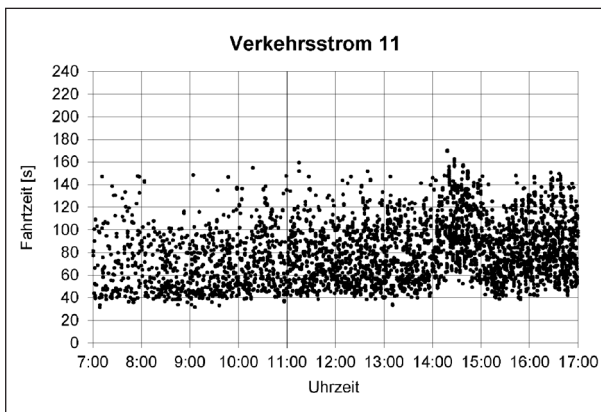


Bild 27: Fahrtzeiten des signalisierten Verkehrsstroms 11 am Knotenpunkt A 560/B 8 in Hennef

die Übersichtsdarstellung des Knotenpunkts mit der Bezeichnung der einzelnen Verkehrsströme. In den Fahrtzeitdiagrammen in Bild 5-26 und Bild 5-27 sind die Verkehrsströme 6, 9 und 12 nicht dargestellt, weil sie durch Dreiecksinseln ohne Signalisierung vom Knotenpunkt abgetrennt und daher nicht relevant für die Analyse der Wartezeitmodelle sind. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse zu Stunden-Intervallen ist in Anhang A enthalten.

Die Aufzeichnung der Daten des Steuergeräts war für diesen Knotenpunkt nicht möglich. Daher wurden die Signalzeiten für die Analyse der Wartezeitmodelle aus Simulationen mit VISSIM ermittelt.

5.8 Hamm: Wittekindstraße/Janssenstraße/Am Lausbach

5.8.1 Beschreibung des Knotenpunkts

Die Kreuzung Wittekindstraße/Janssenstraße/Am Lausbach liegt im Westen der Stadt Hamm im Stadtteil Bockum-Hövel. Der Signallageplan der Kreuzung ist in Bild 5-29 dargestellt.

In den Hauptrichtungen sind separate Linksabbiegefahrstreifen angelegt. Die Nebenrichtungen verfügen über je einen Mischfahrstreifen für alle Verkehrsströme. Die Linksabbieger der Hauptrichtungen werden nur gemeinsam mit dem Geradeausverkehr der jeweiligen Zufahrt freigegeben. Die Linksabbiegeströme der Hauptrichtungen werden gesichert freigegeben. Für die Nebenrich-

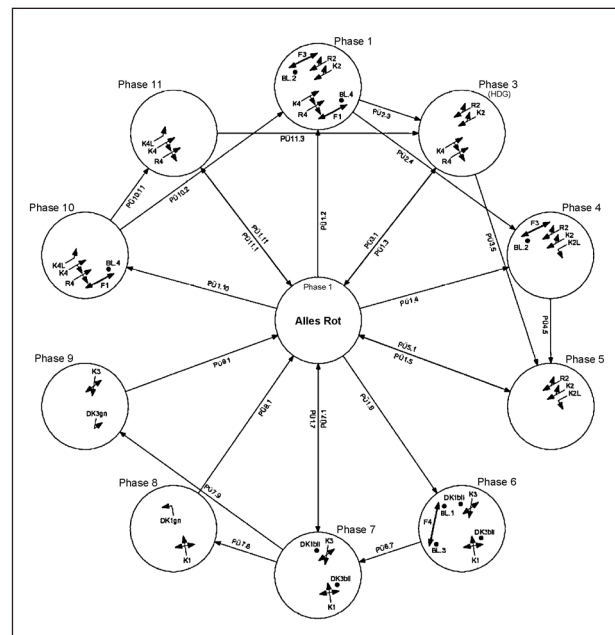


Bild 5-28: Phasenfolgeplan des Knotenpunkts Wittekindstraße/Janssenstraße/Am Lausbach in Hamm

tungen sind sowohl eine Phase mit gesicherter Freigabe als auch eine Phase mit gemeinsamer Freigabe beider Zufahrten in der Steuerung vorgesehen. Der Phasenfolgeplan ist in Bild 5-28 dargestellt.

Die Steuerung der LSA des Knotenpunkts erfolgt über ein Wartezeitmodell. Damit sollen möglichst kurze Wartezeiten in den Zufahrten gewährleistet werden. Für alle Signalgruppen sind Maximal- und Mindestfreigabezeiten vorgesehen.

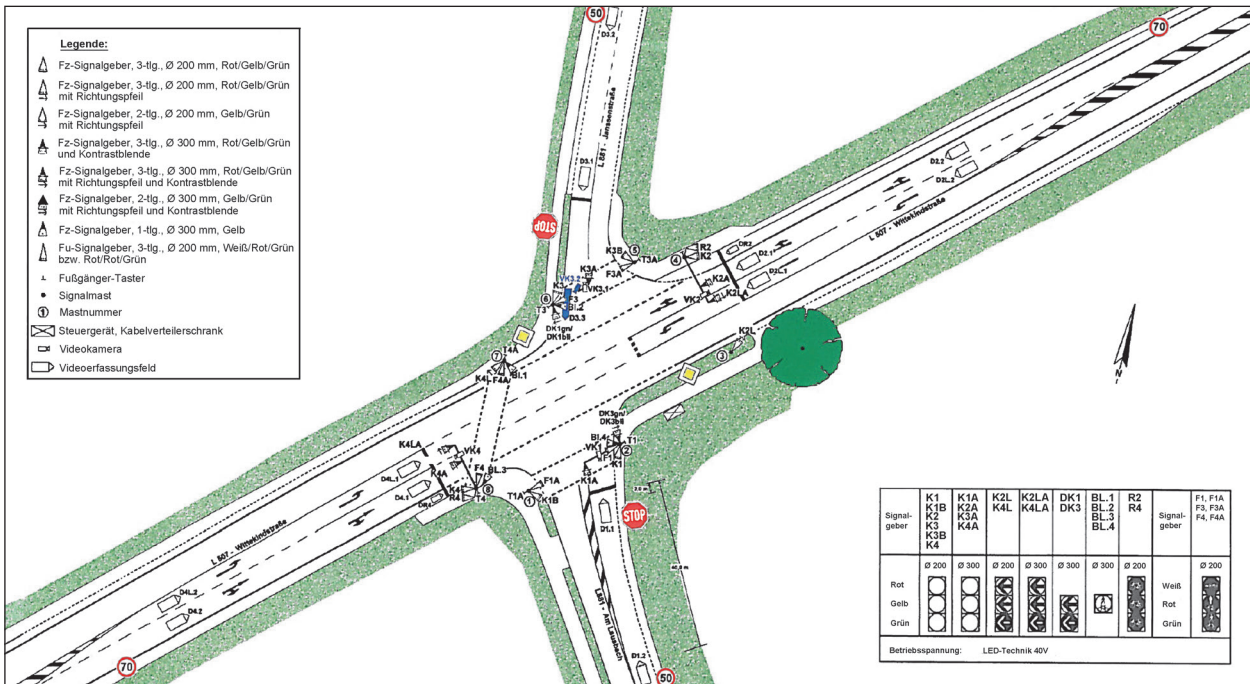


Bild 5-29: Signallageplan des Knotenpunkts Wittekindstraße/Janssenstraße/Am Lausbach in Hamm

5.8.2 Messergebnisse

Die Messungen vom 24.07.2014 an der Kreuzung Wittekindstraße/Janssenstraße/Am Lausbach in Hamm wurden für einen Zeitraum von insgesamt vier Stunden zwischen 14:30 und 18:30 Uhr ausgewertet. Die Bezeichnungen der Verkehrsströme sind in Bild 5-30 angegeben. Die für diesen Zeitraum ermittelten Einzelfahrtzeiten am Knotenpunkt sind für die Verkehrsströme 1 bis 6 in Bild 5-31 dargestellt. Bild 5-32 zeigt die Einzelfahrtzeiten für die Verkehrsströme 7 bis 12.

Die zu Stunden-Intervallen zusammengefassten Ergebnisse sind in Anhang A angegeben. Jede Tabelle enthält die Ergebnisse für die Verkehrsströme einer Zufahrt. Für die Verkehrsströme, die in die Zufahrt „Am Lausbach“ führen, konnten für die letzte Stunde des Auswertungszeitraums von 17:30 bis 18:30 Uhr keine Ergebnisse ermittelt werden.

Aufgrund von technischen Problemen bei der Aufzeichnung der Daten des Steuergeräts der LSA durch die Signalbaufirma lagen keine auswertbaren Signalzeiten für den Messzeitraum vor. Die Signalzeiten für die Analyse der Wartezeitmodelle wurden mithilfe des Simulationsmodells des Knotenpunkts gewonnen.

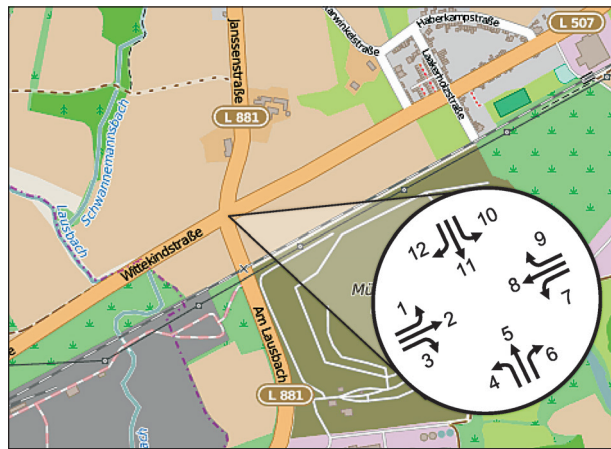


Bild 5-30: Übersichtskarte des Knotenpunkts Wittekindstraße/Janssenstraße/Am Lausbach in Hamm mit Bezeichnung der Verkehrsströme (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

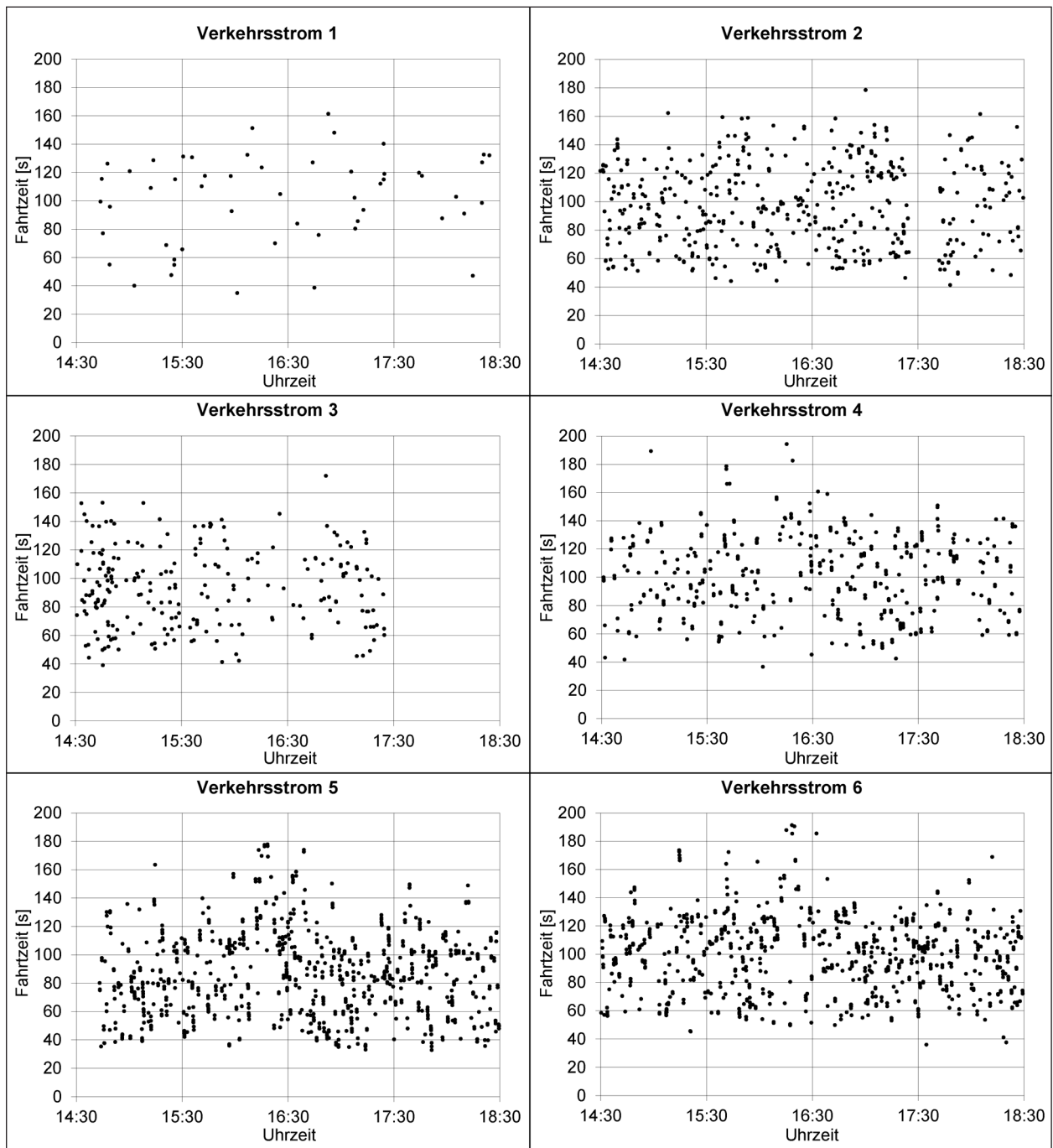


Bild 5-31: Fahrtzeiten der Verkehrsströme 1 bis 6 am Knotenpunkt Wittekindstraße/Janssenstraße/Am Lausbach in Hamm

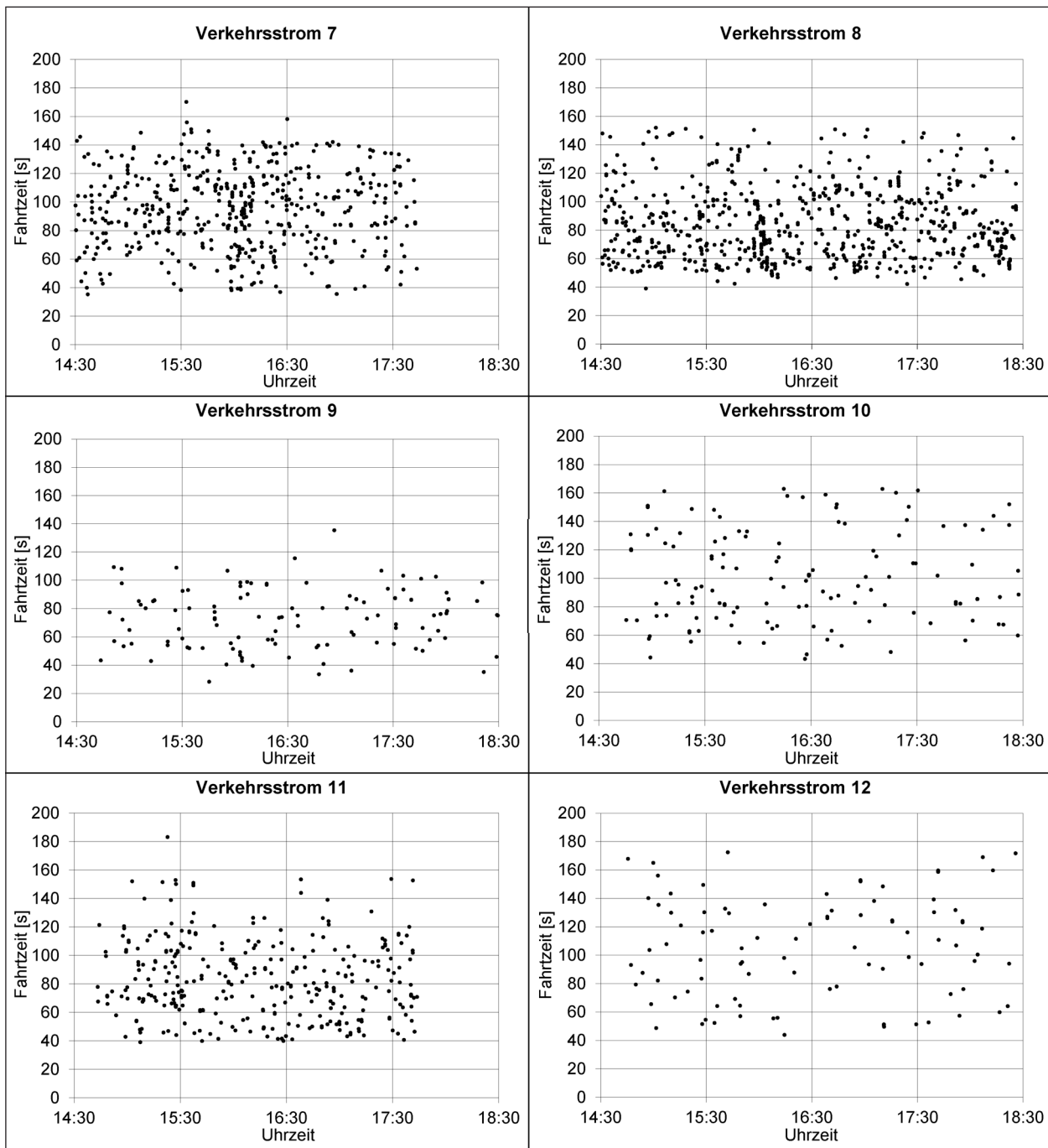


Bild 5-32: Fahrzeiten der Verkehrsströme 7 bis 12 am Knotenpunkt Wittekindstraße/Janssenstraße/Am Lausbach in Hamm

5.9 Hattingen: Wuppertaler Straße/ Denkmalstraße/Rauendahlstraße

5.9.1 Beschreibung des Knotenpunkts

Die Kreuzung Wuppertaler Straße (Bundesstraße B 51)/Denkmalstraße/Rauendahlstraße liegt im Norden der Stadt Hattingen. Die B 51 dient als Verbindungsstraße zwischen den Städten Bochum und

Hattingen. Der Signallageplan in Bild 5-33 zeigt die Fahrstreifenaufteilung an der Kreuzung. Die Detektion des Kfz-Verkehrs ist über Videodetektoren realisiert. Die Planungsunterlagen wurden von der Fa. Geiger zur Verfügung gestellt.

Die Dauer der Freigabezeiten der einzelnen Signalgruppen wird über Zeitlücken bemessen. Die Anforderungen für die Linksabbieger der Hauptrichtung

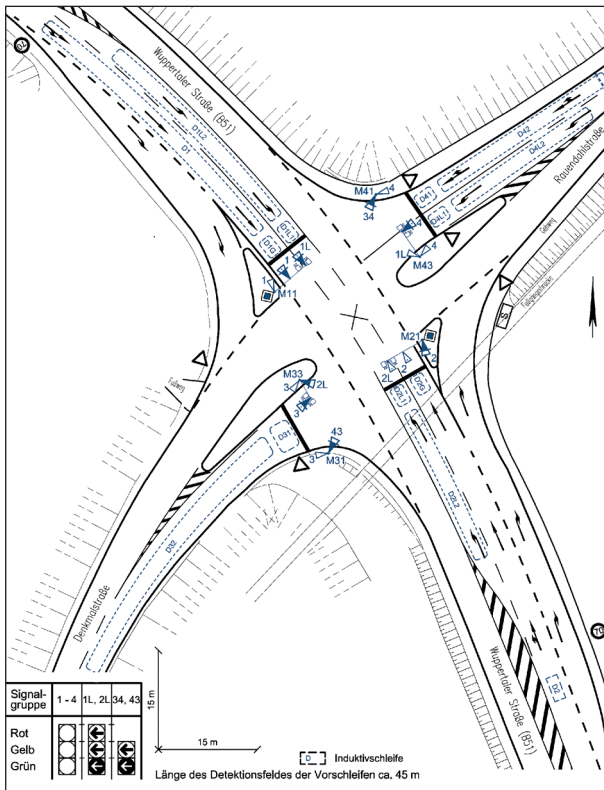


Bild 5-33: Signallageplan des Knotenpunkts Wuppertaler Straße/Denkmalstraße/Rauendahlstraße in Hattingen

sowie die Nebenrichtungen werden über Belegzeiten der haltliniennahen Detektoren realisiert. Neben den Mindestfreigabezeiten der einzelnen Signalgruppen sind in den Signalprogrammen sog. feste Freigabezeiten für die einzelnen Signalgruppen versorgt. Bis zu deren Ablauf kann die Freigabe einer Signalgruppe auch ohne Bedarf verlängert werden. In Bild 5-34 ist der Phasenfolgeplan des Steuerungsprogramms der Signalanlage dargestellt. Die Zufahrten werden getrennt voneinander freigegeben, sodass alle Verkehrsströme gesicherte Freigaben erhalten.

5.9.2 Messergebnisse

Die Messung der Verlustzeiten fand am 05.05.2014 statt. Aus den Erhebungen wurde ein Zeitraum von drei Stunden von 14:30 bis 17:30 Uhr ausgewertet. In den Diagrammen in Bild 5-36 und Bild 5-37 sind die gemessenen Einzelfahrtzeiten der signalisierten Verkehrsströme dargestellt. Eine Übersicht des Knotenpunkts und der signalisierten Verkehrsströme ist in Bild 5-35 dargestellt. Die Rechtsabbiegeströme 3 und 9 der Wuppertaler Straße sind durch Dreiecksinseln abgetrennt.

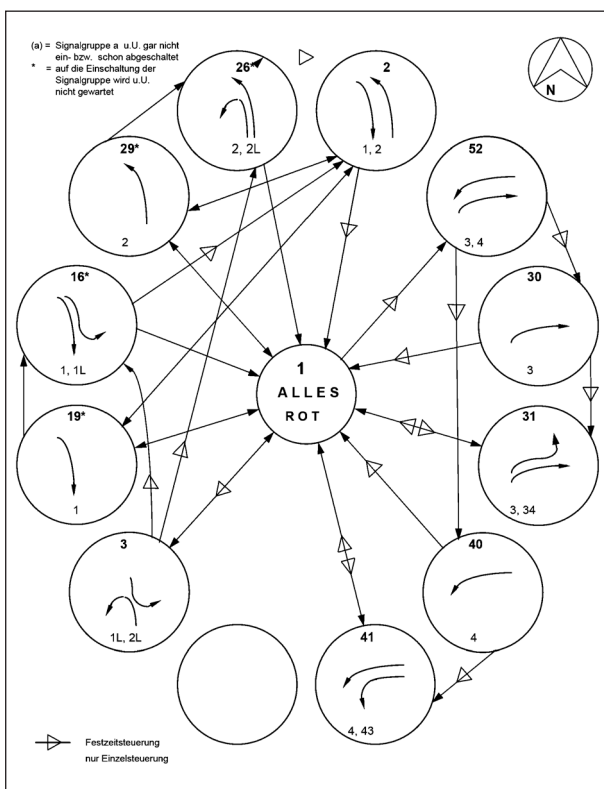


Bild 5-34: Phasenfolgeplan des Knotenpunkts Wuppertaler Straße/Denkmalstraße/Rauendahlstraße in Hattingen

Eine Aufzeichnung der Daten des Steuergeräts während der Messung konnte aus Kostengründen nicht erfolgen. Die Signalbilder der einzelnen Signalgeber wurden mit Videokameras aufgezeichnet und anschließend für eine Stunde ausgewertet. Analog zu den bisher dargestellten Auswertergebnissen finden sich die Ergebnisse zusammengefasst nach Zufahrten in Anhang A.

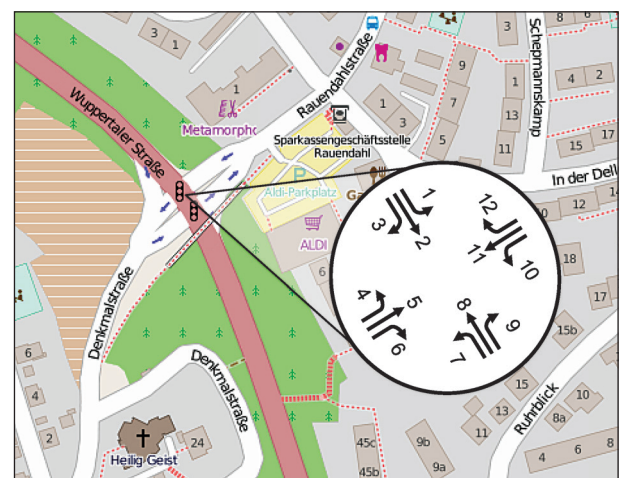


Bild 5-35: Übersichtskarte des Knotenpunkts Wuppertaler Straße/Denkmalstraße/Rauendahlstraße in Hattingen mit Bezeichnung der Verkehrsströme (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendatacommons.org)

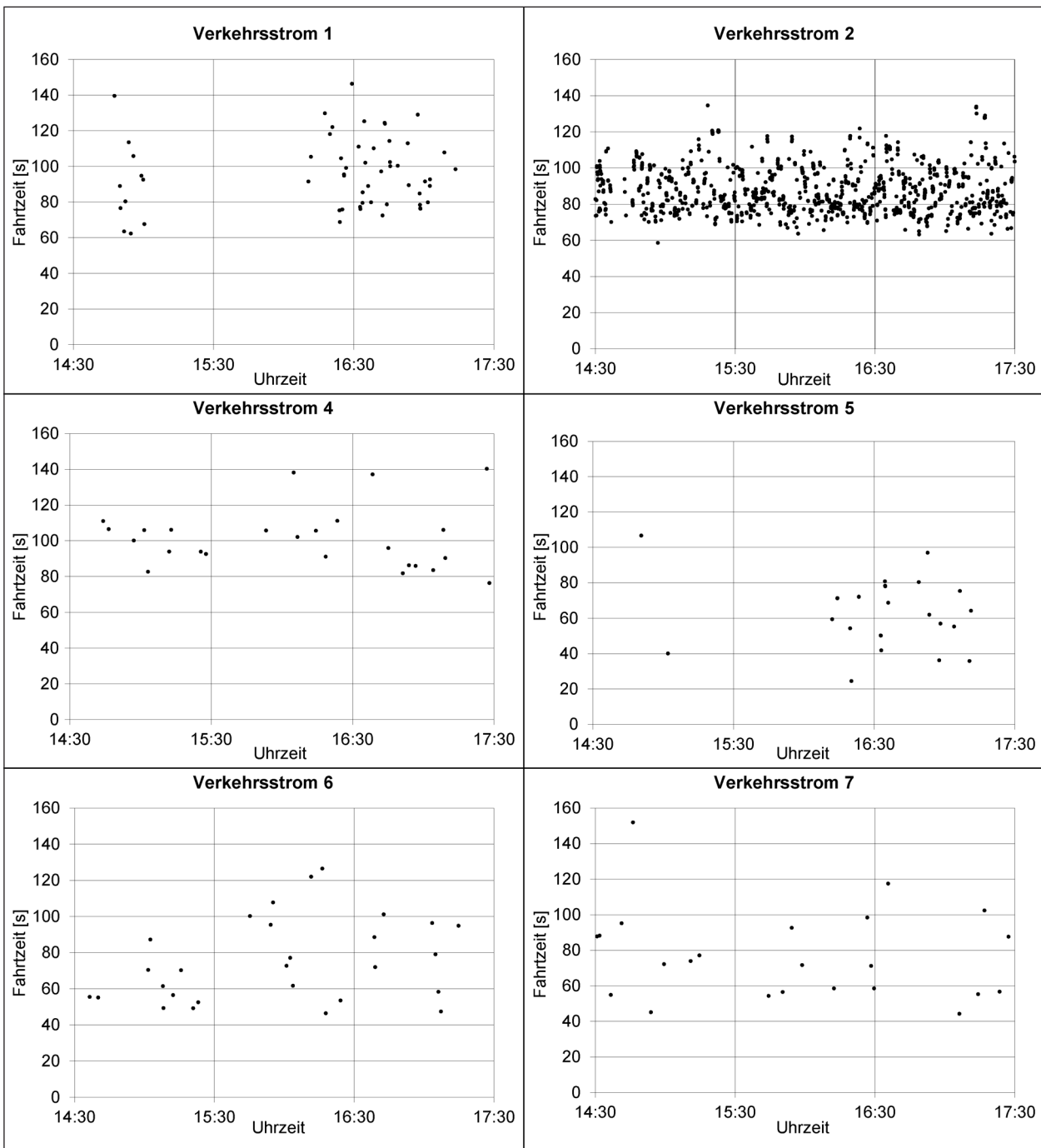


Bild 5-36: Fahrtzeiten der Verkehrsströme 1-2 und 3-7 am Knotenpunkt Wuppertaler Straße/Denkmalstraße/Rauendahlstraße in Hattingen

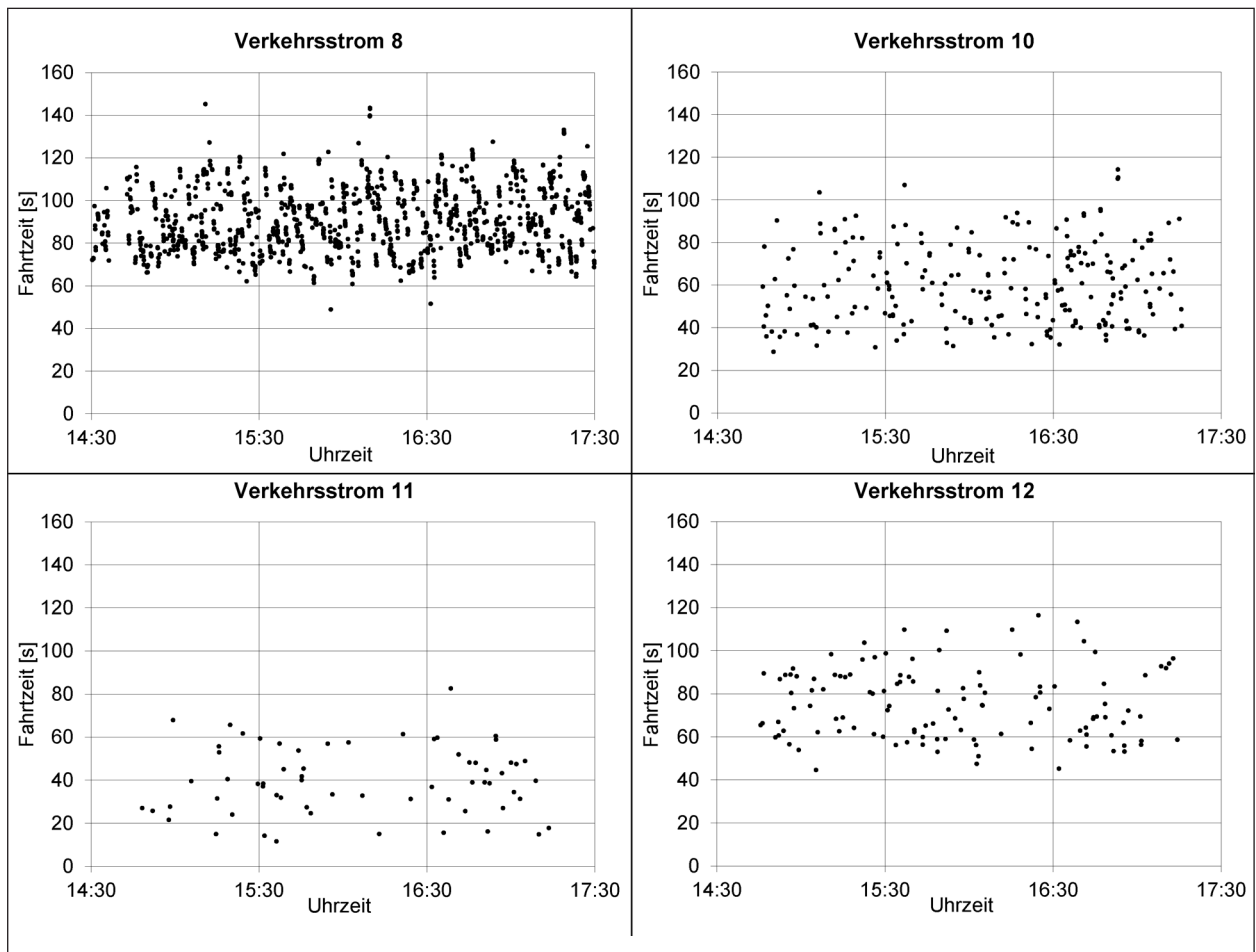


Bild 5-37: Fahrtzeiten der Verkehrsströme 8, 10-12 am Knotenpunkt Wuppertaler Straße/Denkmalstraße/Rauendahlstraße in Hattingen

5.10 Drensteinfurt: B 58/L 585

5.10.1 Beschreibung des Knotenpunkts

Der Knotenpunkt B 58/L 585 liegt im Norden des Zentrums von Drensteinfurt. Die Bundesstraße B 54 verläuft in Ost-West-Richtung und verbindet den Ort mit der Autobahn A 1 bei Ascheberg im Westen und dem weiteren Umland im Osten. Die Landesstraße L 585 ist neben der B 54 eine wichtige Verbindung zur nördlich gelegenen Stadt Münster. Der Knotenpunkt ist vierarmig ausgebaut. Die beiden Zufahrten der B 58 bilden die Hauptrichtungen. Am Knotenpunkt selbst sind die Rechtsabbiegeströme von der B 58 über Dreiecksinseln von der Signalisierung ausgenommen. Den übrigen Verkehrsströmen der Hauptrichtung steht jeweils ein Fahrstreifen zur Verfügung. Die Zufahrten der Nebenrichtungen sind jeweils 5,50 m breit. Rechtsabbiege- und Geradeausverkehr werden auf einem gemeinsamen Fahrstreifen geführt. Der Linksab-

biegeverkehr ordnet sich getrennt davon vor der Haltlinie ein. Die Signalisierung der Nebenrichtungen erfolgt über eine Signalgruppe. Der Signalanlageplan des Knotenpunkts ist in Bild 5-38 dargestellt. Die Signalisierung erfolgt in einer vollverkehrsabhängigen Steuerung mit dem Konzept „Haupttrichtung Dauergrün“ als Grundstellung sowie Freigabezeitanpassung und Phasenanforderung.

In Bild 5-39 ist der Phasenfolgeplan abgebildet. Von den insgesamt sieben Phasen der Steuerung werden die Phasen 2 bis 7 nur bei Anforderung geschaltet. Die Phase 1 bildet die Grundstellung. Aus jeder der Phasen 2 bis 7 kann sofort in die Phase 1 und umgekehrt geschaltet werden. Liegen in allen Zufahrten Anforderungen vor, wird die Phasenfolge 1-2-3-5-1 geschaltet. Die Phasen 6 und 7 dienen zur Verlängerung von Phase 4 bzw. 5. Die Phaseneinteilung sieht eine gesicherte Führung aller ab- bzw. einbiegenden Verkehrsströme vor.

In der Steuerungslogik sind zwei vollverkehrsabhängige Programme und zwei Ersatz-Festzeitprogramme parametrisiert. Die Programmwahl erfolgt mittels eines Wochenplans. An Wochentagen läuft das Spitzenprogramm 1 von 07:30 bis 09:00 Uhr und von 15:30 bis 18:30 Uhr. In der restlichen Tageszeit sowie durchgehend an Samstagen, Sonn- und Feiertagen läuft das Signalprogramm 2.

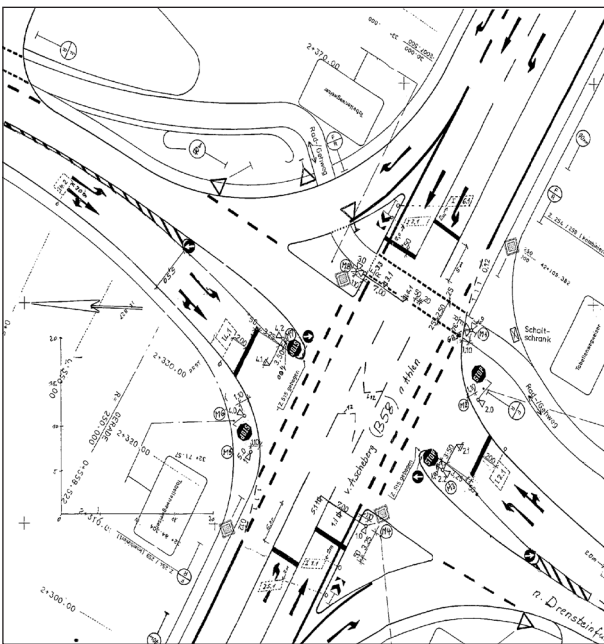


Bild 5-38: Signallageplan des Knotenpunkts B 58/L 585 in Drensteinfurt

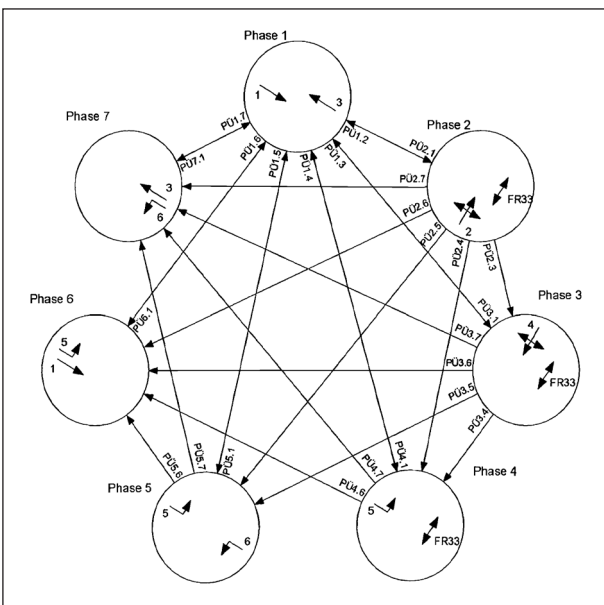


Bild 5-39: Phasenfolgeplan des Knotenpunkts B 58/L 585 in Drensteinfurt

5.10.2 Messergebnisse

Die Fahrtzeitmessungen am Knotenpunkt B 58/L 585 in Drensteinfurt wurden am 18.09.2014 zwischen 12:30 und 19:30 Uhr durchgeführt. Die in den Diagrammen in Bild 5-41 und Bild 5-42 enthaltenen Messergebnisse beziehen sich auf den Zeitraum von 13:00 bis 19:00 Uhr. Aufgrund der Witterungsbedingungen war es jedoch nicht möglich, für alle Verkehrsströme Fahrtzeiten über den gesamten Zeitbereich von 13:00 bis 19:00 Uhr auszuwerten. Für die Zufahrten der Sendenhorster Straße im Südwesten konnten aus technischen Gründen keine Fahrtzeiten ermittelt werden. Aus den während der Messungen durch die Fa. Swarco aufgezeichneten Daten des Steuergerätes wurde jedoch ersichtlich, dass die Zufahrt im Vergleich zu den anderen Zufahrten des Knotenpunkts sehr gering ausgelastet ist. Die Bezeichnungen der Verkehrsströme am Knotenpunkt sind Bild 5-40 zu entnehmen. Die aggregierten Messwerte sind in den Tabellen in Anhang A enthalten.

Während der Messung wurde von der Firma Swarco ein Mitschrieb der Daten des Steuergerätes angefertigt. Die ausgewerteten Signalzeiten jeder Signalgruppe sind in Stunden-Intervallen in Anhang A angegeben.

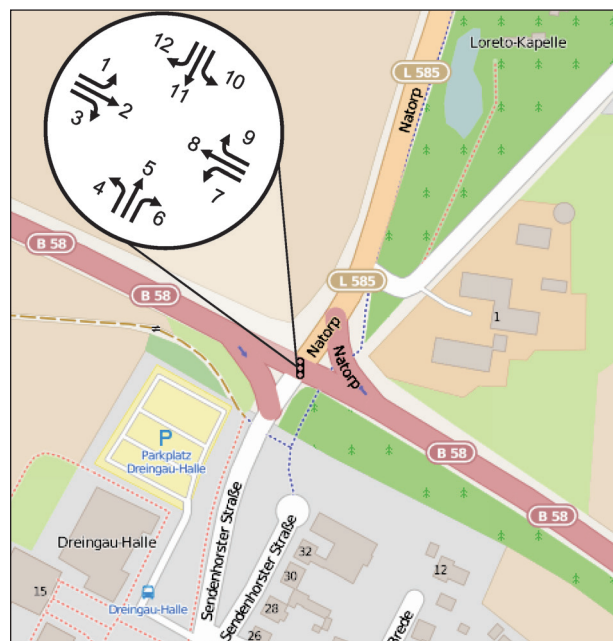


Bild 5-40: Übersichtskarte des Knotenpunkts B 58/L 585 in Drensteinfurt mit Bezeichnung der Verkehrsströme (Karte: © OpenStreetMap – Mitwirkende; opendata-commons.org)

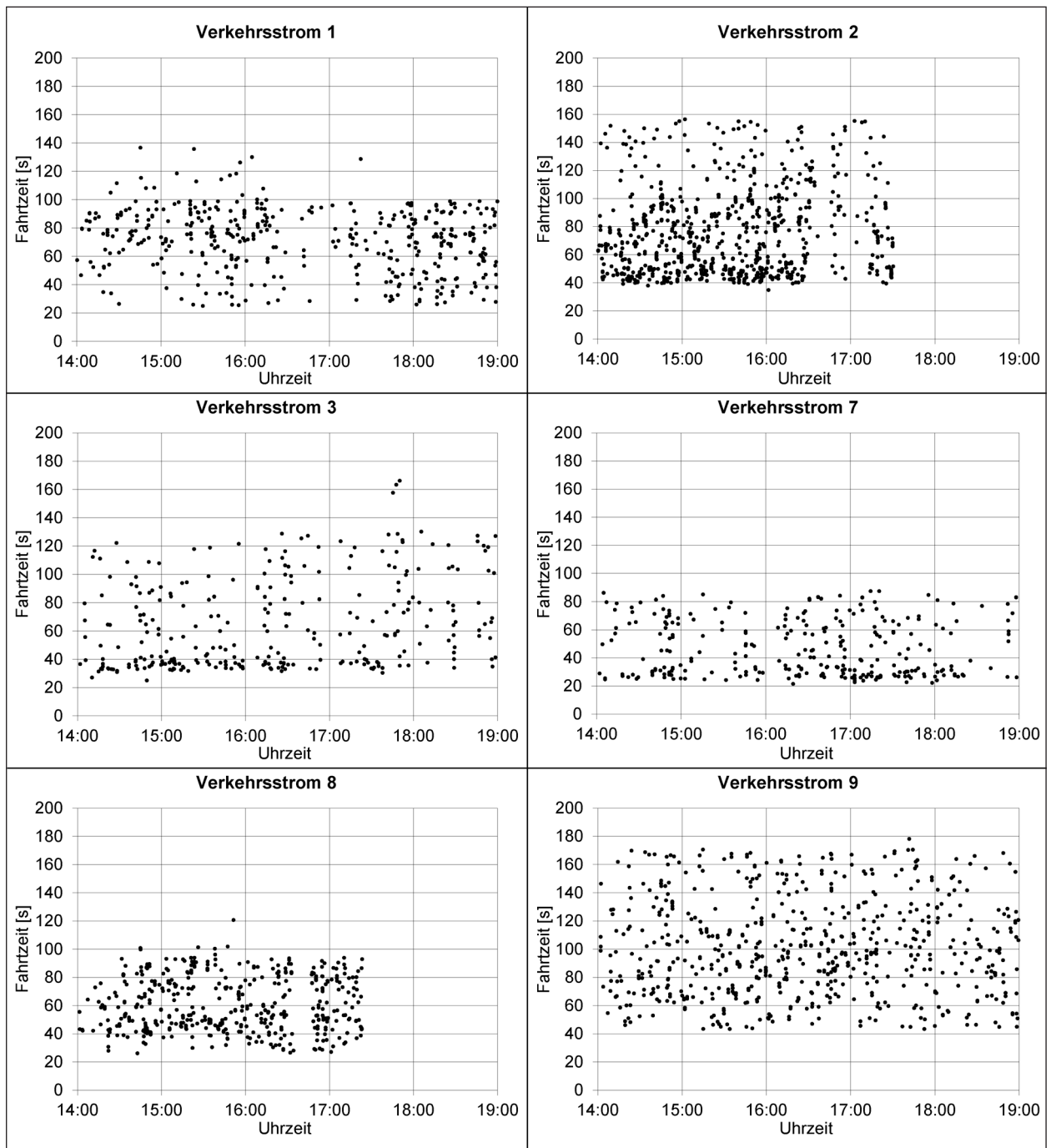


Bild 5-41: Fahrtzeiten der Verkehrsströme 1 bis 3 und 7 bis 9 am Knotenpunkt B 58/L 58 in Drensteinfurt

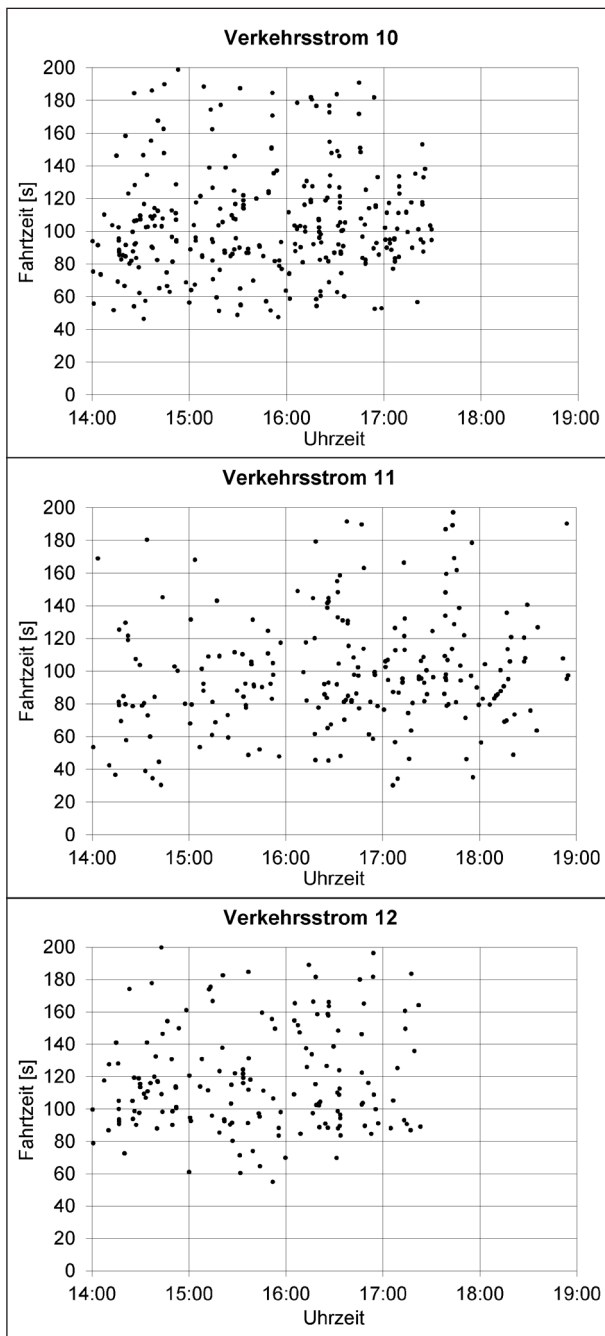


Bild 5-42: Fahrzeiten der Verkehrsströme 10 bis 12 am Knotenpunkt B 58/L 58 in Drensteinfurt

6 Mikroskopische Simulationen

6.1 Simulationsuntersuchungen mit Laborobjekten

6.1.1 Methodik

Die Anwendung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation hat sich insbesondere in der städtischen Verkehrsplanung als nahezu unverzichtbarer Bestandteil im Planungsprozess eta-

liert. In der Regel werden LSA-Steuerungen vor der Anwendung im realen Betrieb umfassend in Simulationen untersucht. Diese Vorgehensweise bietet Planern von LSA-Steuerungen die Möglichkeit, kostenintensive Feldtests vor Inbetriebnahme einer LSA zu vermeiden. Nicht zuletzt diese Möglichkeiten haben auch die Entwicklung modellbasierter LSA-Steuerungsverfahren in Deutschland stark vorangetrieben. Mittlerweile werden Simulationsprogramme auch für den Test von Anwendungen der Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation eingesetzt. Die mikroskopische Simulation erleichtert nicht nur den Planungsprozess von LSA-Steuerungen, sondern bietet auch die Möglichkeit, einzelne Verkehrsanlagen im Netzzusammenhang zu betrachten. Aufgrund der weitverbreiteten Anwendung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation ist deren Verwendung für die Herleitung theoretischer Berechnungsmodelle zur Bestimmung der Verkehrsqualität naheliegend. In Simulationsstudien können, im Gegensatz zu empirischen Erhebungen, Laborbedingungen hergestellt werden und gezielt einzelne Parameter verändert und auf ihren Einfluss auf Berechnungsmodelle getestet werden. Auch die vergleichsweise einfache Generierung einer großen Datenbasis zur Ableitung von Berechnungsmodellen spricht für den Einsatz von Simulationen. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Software VISSIM (Version 7.00-04) der PTV AG für die Durchführung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen eingesetzt.

Die Berechnungsmodelle zur Bestimmung der Wartezeit wurden daher zunächst unter Verwendung von Simulationsergebnissen analysiert. Dazu wurden einfache Simulationsnetze zur Untersuchung der Modelle für festzeitgesteuerte Einzelknotenpunkte, verkehrsabhängig gesteuerte Einzelknotenpunkte und koordinierte Festzeitsteuerungen erstellt.

Die Eignung der in Kapitel 2 beschriebenen Modelle zur Ermittlung der Wartezeit wurde zunächst unter Verwendung von Laborobjekten mit festzeitgesteuerten LSA mit vier verschiedenen Umlaufzeiten $t_U = \{60 \text{ s}, 70 \text{ s}, 80 \text{ s}, 90 \text{ s}\}$ untersucht. Für jede Umlaufzeit wurden drei Freigabezeitanteile (20 %, 40 % und 60 %) und je sieben Auslastungsgrade $x = \{0,3, 0,5, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1\}$ simuliert. Aus dieser Kombination ergeben sich 84 Simulations-szenarien. Die Ergebnisse wurden in 15-Minuten-Intervallen aufgezeichnet. Für den Vergleich mit den berechneten Werten standen insgesamt somit

336 einzelne Simulationsintervalle zur Verfügung. Die fiktive Sättigungsverkehrsstärke von 2.000 Kfz/h zur Ermittlung der Zuflussverkehrsstärken über den Auslastungsgrad, die Verkehrszusammensetzung (nur Pkw) und die Wunschgeschwindigkeit von 50 km/h wurden in allen Simulationen nicht verändert. Die Einflüsse geometrischer Größen, wie Längsneigung, Kurvigkeit usw., wurden durch den Simulationsaufbau ausgeschlossen. Das Simulationsmodell ist in Bild 6-1 dargestellt.

Der Simulationszeitraum betrug zwei Stunden, der Auswertzeitraum eine Stunde. Die Vor- und Nachlaufzeit betrug je 30 Minuten. Die Zuflussverkehrsstärken wurden in Stunden-Intervallen hinterlegt und über den gesamten Simulationszeitraum konstant gehalten. Die Verkehrsstärken wurden als Eingangsgrößen für die rechnerische Wartezeitermittlung in 15-Minuten-Intervallen aufgezeichnet. Analog dazu wurde die Wartezeit in der Simulation protokolliert. Diese diente im Folgenden dem Vergleich mit den berechneten Ergebnissen. Vor dem Vergleich von simulierten und analytisch ermittelten Wartezeiten wurden die Zeitbedarfswerte in den Modellen ermittelt. Neben der Fahrstreifenanzahl sind die Sättigungsverkehrsstärke und die Dauer der Freigabezeit maßgebend für die Ermittlung der Kapazität. Die Sättigungsverkehrsstärke ist wiederum vom Zeitbedarfswert abhängig. In Bild 6-2 sind die Zeitbedarfswerte für die Simulationen mit einer Umlaufzeit von $t_U = 60$ s und sieben verschiedenen

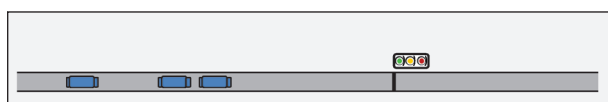


Bild 6-1: Simulationsmodell (Laborobjekt) zur Prüfung der Eignung verschiedener Wartezeitmodelle für festzeitgesteuerte LSA

Freigabezeitanteilen dargestellt. Die Simulationen wurden mit Verkehrsstärken von 2.200 Pkw/h durchgeführt. Der Simulationsaufbau ist so gewählt, dass sämtliche Einflussfaktoren außer dem Zeitbedarfswert in den Simulationsläufen konstant gehalten werden. Die verwendeten Fahrverhaltensparameter bleiben unverändert gegenüber den voreingestellten Werten in VISSIM 7.0. In Bild 6-2 sind im linken Diagramm die Zeitbedarfswerte der Simulationen in Abhängigkeit vom Freigabezeitanteil dargestellt, rechts in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition. Aus dem rechten Diagramm geht hervor, bis zu welcher Fahrzeugposition die Einzelwerte in die Mittelwertbildung im linken Diagramm eingeflossen sind. Die Linie für die Zeitbedarfswerte mit einem Freigabezeitanteil von $f_a = 0,1$ endet im rechten Diagramm bei Position 5, dementsprechend sind alle Werte ab der zweiten bis zur fünften Position in die Mittelwertbildung im Bild links eingeflossen. Die Werte der ersten Position werden nicht betrachtet.

Bei kurzen Freigabezeiten liegt der Zeitbedarfswert mit Werten zwischen 1,64 und 1,59 s deutlich unter dem Wert von 1,8 s aus dem HBS (FGSV, 2001, 2015b). Ab einem Freigabezeitanteil von 0,4 ($t_F = 24$ s) steigen die Zeitbedarfswerte an und nähern sich dem Wert von 1,8 s. Die Zeitbedarfswerte aus Bild 6-2 wurden für die weitere Anpassung der Parameter der Berechnungsmodelle an die Simulationsergebnisse verwendet.

Im nächsten Schritt wurden die Modelle um verkehrabhängige Elemente (Freigabezeitanforderung, Freigabezeitverlängerung) erweitert. Anhand dieser Modelle wurden die Effekte der verkehrabhängigen Steuerungselemente im Vergleich zu Festzeitsteuerungen analysiert.

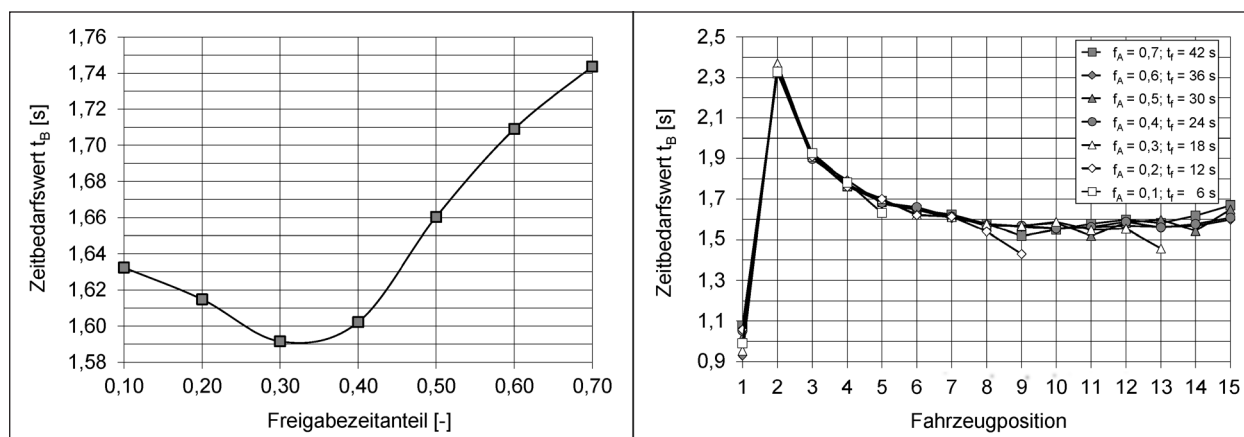


Bild 6-2: Zeitbedarfswerte aus VISSIM in Abhängigkeit vom Freigabezeitanteil bei einer Umlaufzeit von $t_U = 60$ s

Die Darstellung in Bild 6-3 zeigt das Modell zur Simulation von verkehrabhängigen LSA-Steuerungen. Die Simulationen wurden hierfür mit einer klassischen „Alles-Rot“-Steuerung sowie einer Steuerung mit Rahmenplan und Freigabezeitverlängerung durchgeführt. Die Simulationsszenarien ergeben sich aus der Variation der Verkehrsstärken in einem der beiden Zuflüsse. Im ersten Szenario bleibt die Verkehrsstärke q_1 in allen Simulationen konstant bei 300 Pkw/h. Die Verkehrsstärke von q_2 wurde von Lauf zu Lauf von anfangs 500 Pkw/h um 100 Pkw/h bis zu einer Gesamtbelastung des Knotenpunkts von 1.800 Pkw/h gesteigert. Damit ergeben sich neun Kombinationen aus den Verkehrs-

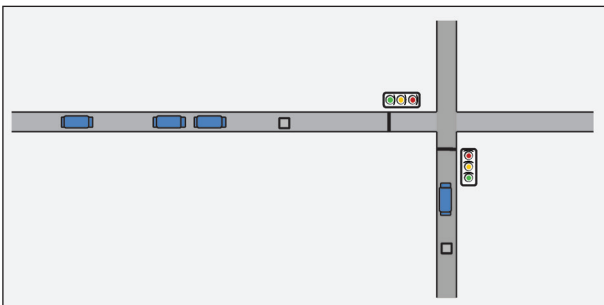


Bild 6-3: Simulationsmodell (Laborobjekt) zur Prüfung der Eignung verschiedener Wartezeitmodelle für LSA mit verkehrabhängiger Steuerung

stärken q_1 und q_2 . Die weiteren Szenarien ergeben sich durch die Erhöhung der Verkehrsstärke q_1 auf 500 Pkw/h bzw. auf 800 Pkw/h.

Die Logiken der beiden Steuerungsverfahren für die Simulationen wurden mit dem Programm VISVAP 2.16-14 der PTV AG erstellt. Die Logik für die Simulationen mit dem Steuerungsverfahren „Freigabezeitverlängerung“ (Bild 6-4) ist so aufgebaut, dass zunächst die Mindestfreigabezeit der laufenden Phase geprüft wird. Sobald diese erreicht ist, wird das Abbruchkriterium im zugehörigen Verkehrsstrom geprüft. Das Kriterium ist erfüllt, falls eine Zeitlecke von mindestens 3 s detektiert wird. In diesem Fall wird der Phasenwechsel eingeleitet, wenn eine Anforderung für die andere Phase vorliegt oder der späteste Abbruchzeitpunkt der Phase erreicht ist. Für den Fall, dass im zugehörigen Verkehrsstrom keine Zeitlecken von 3 s oder mehr auftreten, wird die Phase ebenfalls nach Erreichen des spätesten Endes abgebrochen. Für die Signalgruppe 1 des Verkehrsstroms 1 in Phase 1 liegt das späteste Ende bei $t_U = 43$ s und für die Phase 2 bei $t_U = 60$ s. Die Mindestfreigabezeiten betragen ebenso wie die Zwischenzeiten jeweils 5 s. Die Umlaufzeit des Rahmensignalplans wurde mit $t_U = 60$ s gewählt.

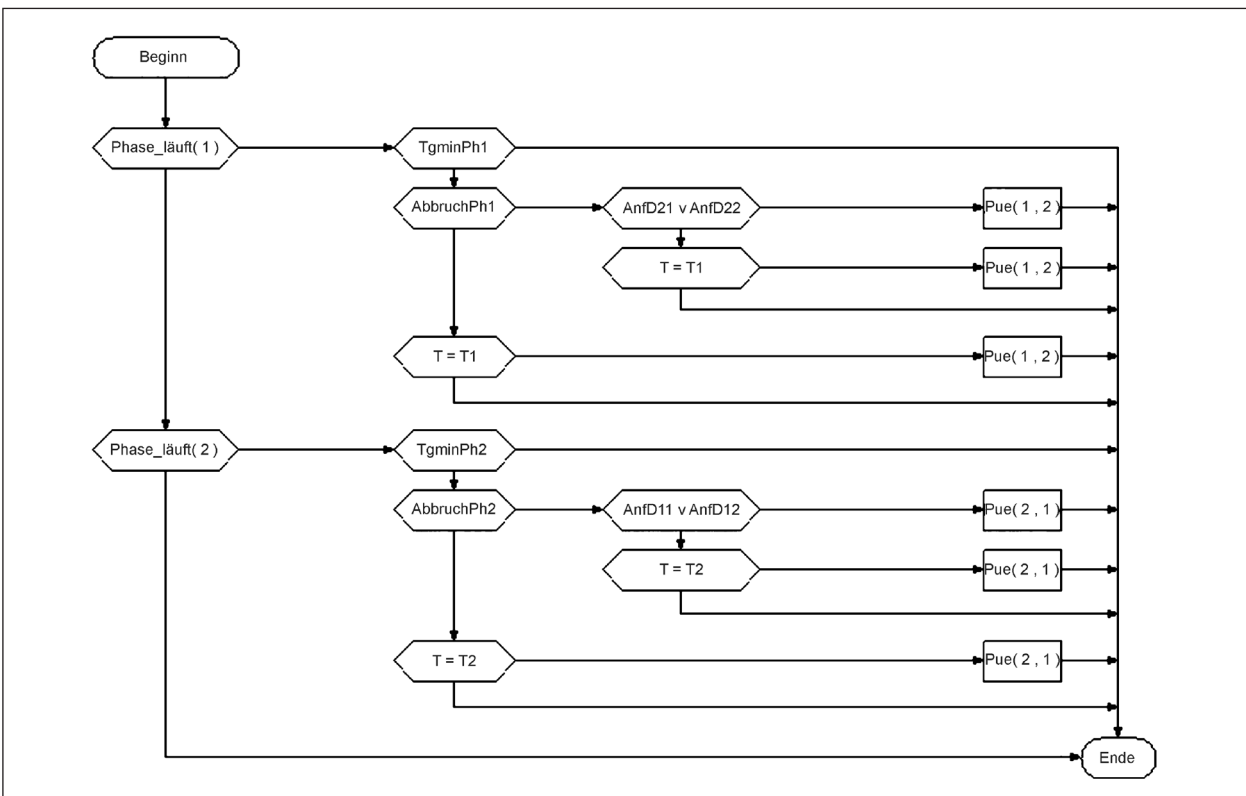


Bild 6-4: Ablaufdiagramm der Logik der Steuerung mit Freigabezeitverlängerung und Rahmenplan

Für die Analyse der Wartezeitmodelle für koordinierte Steuerungen wurden die Knotenpunkte aus Bild 6-3 zu vierarmigen Knotenpunkten erweitert und zwei Knotenpunkte in einem Abstand von 500 m miteinander verbunden. Bei konstanten Verkehrsstärken aus den Nebenrichtungen von $q = \{100, 300, 500\}$ Kfz/h wurden die Verkehrsstärken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in den Nebenrichtungen bis zu einer Gesamtknotenbelastung von 1.800 Pkw/h schrittweise verändert. Die Freigabezeit der Hauptrichtung am zweiten Knotenpunkt wurde so festgelegt, dass die Kolonne zu Beginn der Freigabezeit (gute Koordinierung) oder zu Beginn der Sperrzeit (schlechte Koordinierung) am zweiten Knotenpunkt eintrifft. Die Modelle wurden für jedes Belastungs- und Koordinierungsszenario mit Umlaufzeiten von 60 und 90 s simuliert.

Die Erkenntnisse, die sich im Zuge der Anpassung der Berechnungsmodelle an die Simulationsergebnisse ergeben haben, werden im weiteren Verlauf zur Kalibrierung der Berechnungsmodelle an den empirischen Datensätzen genutzt. Damit ergibt sich ein iterativer Prozess zur Herleitung der Wartezeitmodelle unter Verwendung von Simulationsdaten und empirischen Messergebnissen. Durch diese Vorgehensweise lassen sich die Vorteile der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation ohne die Vernachlässigung der Besonderheiten deutscher Verkehrsverhältnisse im Hinblick auf die Anwendung der Berechnungsmodelle in den einschlägigen Richtlinien nutzen. Abschließend erfolgt eine Validierung der Berechnungsmodelle unter Verwendung weiterer Simulationsmodelle aus realen Praxisbeispielen, die unabhängig von den Untersuchungen zur Ableitung von Wartezeitmodellen erstellt wurden.

6.1.2 Einzelknotenpunkte mit Festzeitsteuerung

In Bild 6-7 und Bild 6-8 sind die Ergebnisse der Simulationen für Einzelknotenpunkte mit Festzeitsteuerung den analytisch ermittelten Werten gegenübergestellt. Den analytisch ermittelten Ergebnissen liegen Standardwerte nach HBS 2015 zugrunde. Für alle untersuchten Freigabezeitanteile liegen die analytisch ermittelten Werte deutlich über den Simulationsergebnissen, insbesondere für mittlere Freigabezeitanteile von 40 %.

Die Ergebnisse der Schätzung der Wartezeiten stimmen nach Optimierung der Zeitbedarfswerte deutlich besser mit den Simulationsergebnissen überein. Jedoch ist zu erkennen, dass die Streuung der berechneten Wartezeiten mit zunehmender Freigabezeit größer wird. Zurückzuführen ist dies zum einen auf die Überschätzung der mittleren Wartezeiten von 20 bis 40 s und zum anderen auf die Unterschätzung hoher Wartezeiten größer als 40 s. Die optimierten Zeitbedarfswerte in den Ergebnissen in Bild 6-8 sind in Bild 6-6 dargestellt.

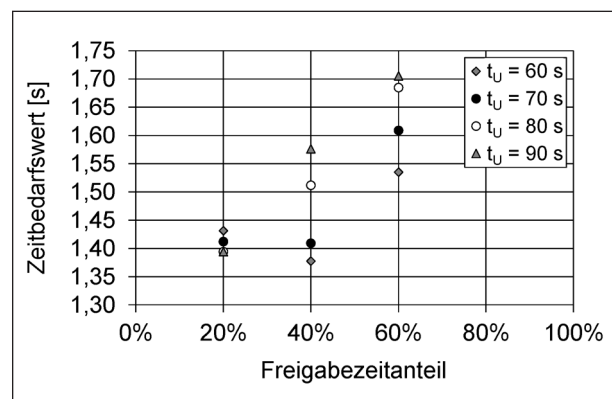


Bild 6-6: Gegenüberstellung der optimierten Zeitbedarfswerte für die Freigabezeitanteile $f_A = \{20\%, 40\%, 60\%$ und Umlaufzeiten von $t_U = \{60\text{ s}, 70\text{ s}, 80\text{ s}, 90\text{ s}\}$

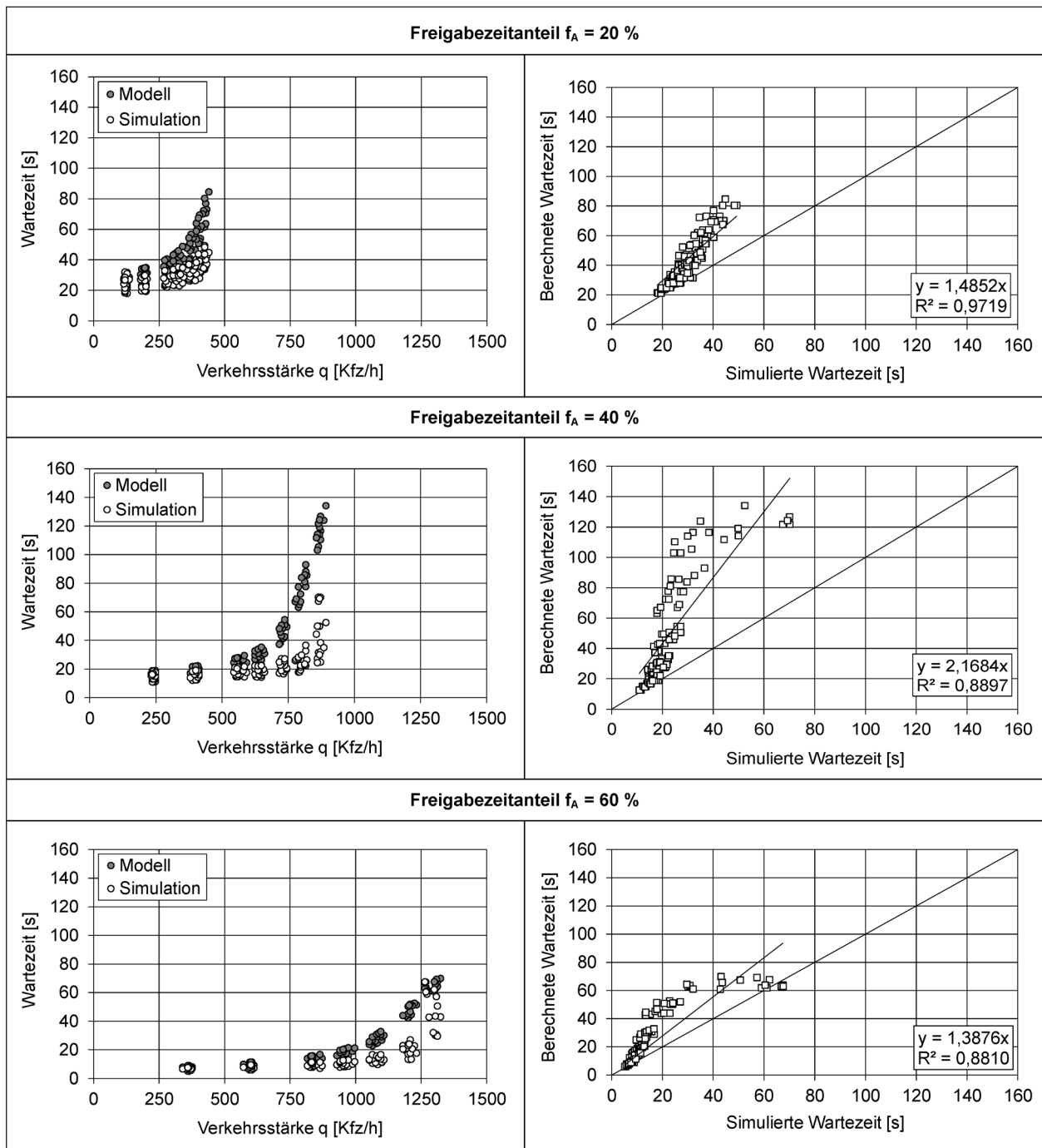


Bild 6-7: Gegenüberstellung der Wartezeiten aus Simulation und dem Modell mit optimierten Zeitbedarfswerten nach HBS (FGSV, 2015b) für die Freigabezeitanteile $f_A = \{20\%, 40\%, 60\%\}$ und Umlaufzeiten von $t_U = \{60\text{ s}, 70\text{ s}, 80\text{ s}, 90\text{ s}\}$

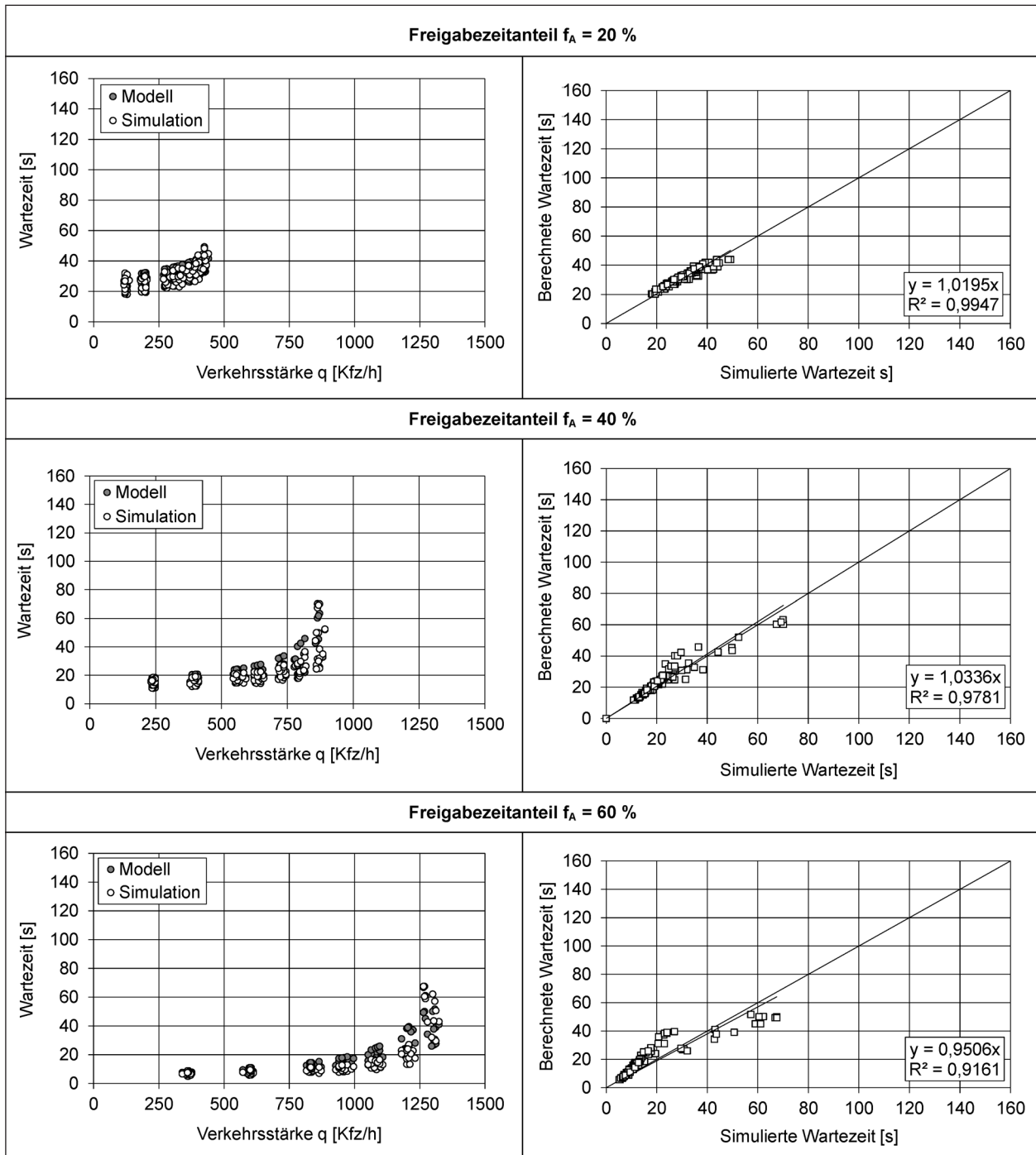


Bild 6-8: Gegenüberstellung der Wartezeiten aus Simulation und dem Modell mit optimierten Zeitbedarfswerten nach HBS (FGSV, 2015b) für die Freigabezeitanteile $f_A = \{20\%, 40\%, 60\%\}$ und Umlaufzeiten von $t_U = \{60\text{ s}, 70\text{ s}, 80\text{ s}, 90\text{ s}\}$

6.1.3 Verkehrsabhängige Steuerungen

In den Diagrammen in Bild 6-9 sind die simulierten Werte den berechneten Werten nach HCM 2000 (TRB, 2000) gegenübergestellt. Die Zeitbedarfs- werte sowie die Konstante zur Bestimmung von K mit Gleichung (2-33) und die Werte für k in Gleichung (2-35) wurden über die Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den Berechnungsergebnissen und den Simulationsergebnissen angepasst. Die optimierten Variablen sind in Tabelle 6-1 enthalten. Für die Steuerung „Alles-Rot“ zeigen die Optimierungsergebnisse, dass die Variablen durch die Anpassung der analytischen Werte an die Simulationsergebnisse sinnvolle Werte annehmen. Anders verhält sich die Optimierung für die Steue-

rung mit Freigabezeitverlängerung. Die beiden Variablen nähern sich null bzw. erreichen diesen Wert und der Zeitbedarfswert wird gegenüber dem Ausgangswert von $t_B = 1,8$ s nach HBS 2015 deutlich verringert. Aus den Ergebnissen der verkehrsabhängigen Steuerung mit Freigabezeitverlängerung lässt sich schließen, dass die Wartezeitformel nach Gleichung 2-2 und Gleichung 2-3 ohne die Berücksichtigung der Steuerungsart mit optimierten Zeitbedarfswerten bessere Schätzergebnisse liefert.

Die grafischen Aufbereitungen der Werte nach der Anpassung der Variablen sind in Bild 6-9 enthalten. Die Simulationsmodelle wurden mit den gleichen Eingangsverkehrsstärken versorgt. Aus den Dia-

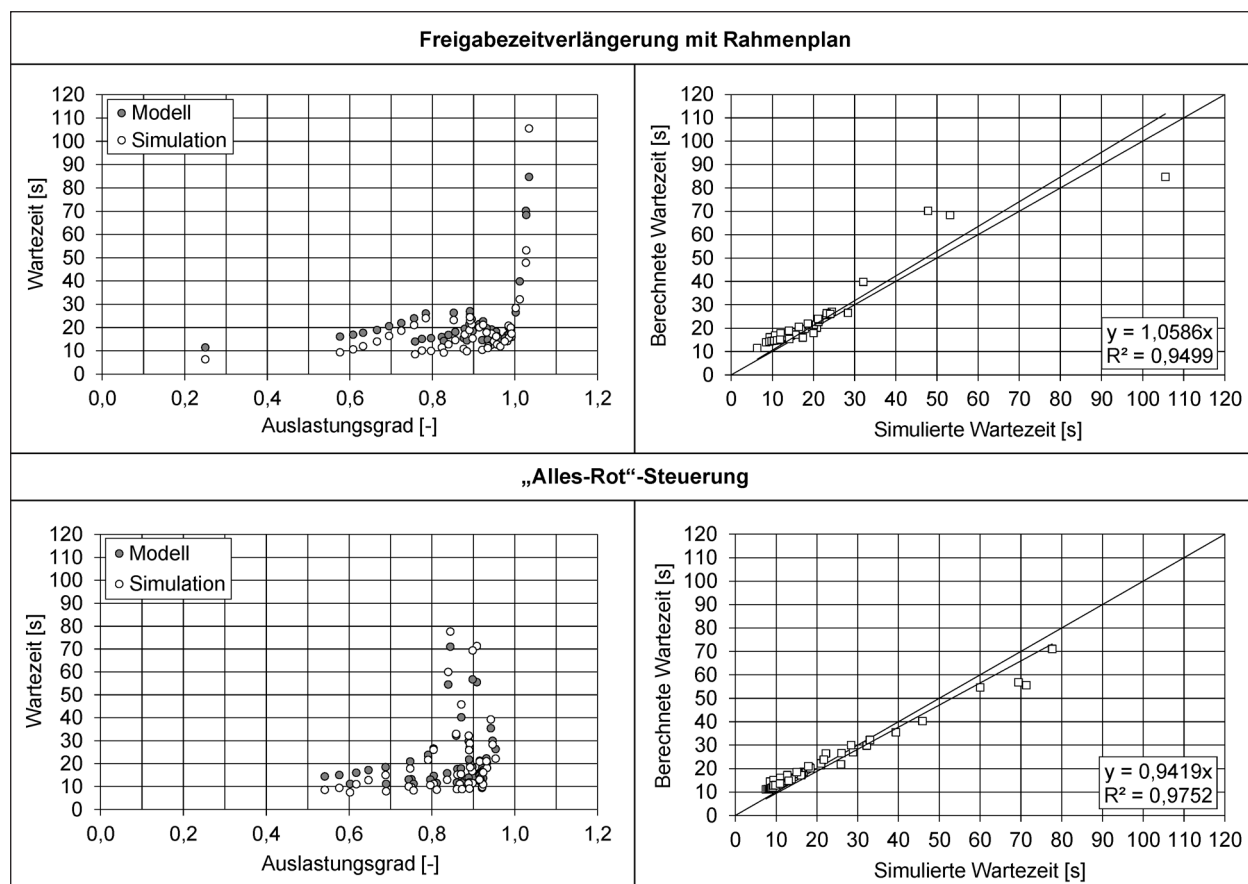


Bild 6-9: Wartezeiten in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad und Gegenüberstellung der berechneten und simulierten Wartezeiten für die untersuchten verkehrsabhängigen Steuerungsarten mit optimierten Modellvariablen

| Optimierungsvariable | „Alles-Rot“-Steuerung | Freigabezeitverlängerung mit Rahmenplan |
|-------------------------------|-----------------------|---|
| Konstante in Gleichung (2-33) | 0,211 | 0 |
| Faktor k in Gleichung (2-36) | 0,09 | 0,0023 |
| Zeitbedarfswert t_B [s] | 1,620 | 1,411 |

Tab. 6-1: Werte der Variablen nach der Optimierung für die untersuchten verkehrsabhängigen Steuerungsarten

grammen wird zunächst deutlich, dass die vollverkehrsabhängige Steuerung „Alles-Rot“ die Wartezeiten gegenüber der Steuerung mit Freigabezeitverlängerung erwartungsgemäß geringer hält. Die Optimierung mit den Werten beider Steuerungen und k als einziger Variable lieferte einen Wert von $k = 0,035$ bei einer Geradengleichung von $y = 1,0 \cdot x$. Die anderen Werte aus Tabelle 6-1 wurden hierfür nicht verändert.

6.1.4 Koordinierte Festzeitsteuerungen

Die Simulationsergebnisse wurden den analytischen Ergebnissen unter Verwendung des Verfahrens nach HBS 2015 sowie des Verfahrens nach WU (2014) grafisch in Bild 6-10 gegenübergestellt. Die Parameter der linearen Regressionsrechnung zeigen für beide Verfahren eine gute Übereinstimmung mit den simulierten Werten.

In Bild 6-10 sind die Ergebnisse der Modelle mit einer Umlaufzeit von 60 s gemeinsam mit den Werten der Modelle mit einer Umlaufzeit von 90 s dargestellt. Für die Optimierung der Zeitbedarfswerte wurden die beiden Datensätze getrennt betrachtet. Die Minimierung der Fehlerquadrate wurde zwar

über alle Werte gemeinsam gerechnet, im Ergebnis wurden jedoch zwei getrennte Zeitbedarfswerte ermittelt. Die ermittelten Werte sind Tabelle 6-2 zu entnehmen. In den Diagrammen in Bild 6-10 wurden keine weiteren Parameter angepasst.

Im Verfahren nach WU (2014) werden die Progressionsfaktoren f_{k1} und f_{k2} ohne konstante Parameter ermittelt. Eine weitere Parameteroptimierung durch die Minimierung der Fehlerquadrate erfolgt für dieses Verfahren folglich nicht. Im Verfahren nach HBS 2015 werden hingegen bei Ermittlung von f_{k2} in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad zwei konstante Parameter eingesetzt, die durch Minimierung der Fehlerquadrate optimiert werden können (vgl. Gleichung (2-9)). Die Optimierung ergab einen Wert von null für den Multiplikator in Gleichung (2-9). Dadurch ergibt sich ein Faktor von $f_{k2} = 1$. Eine Veränderung

| Umlaufzeit | HBS 2015 | WU (2014) |
|------------|----------|-----------|
| 60 s | 1,633 | 1,800 |
| 90 s | 1,770 | 1,770 |

Tab. 6-2: Zeitbedarfswert t_B [s] nach der Optimierung für die untersuchten Verfahren in Abhängigkeit von der Umlaufzeit

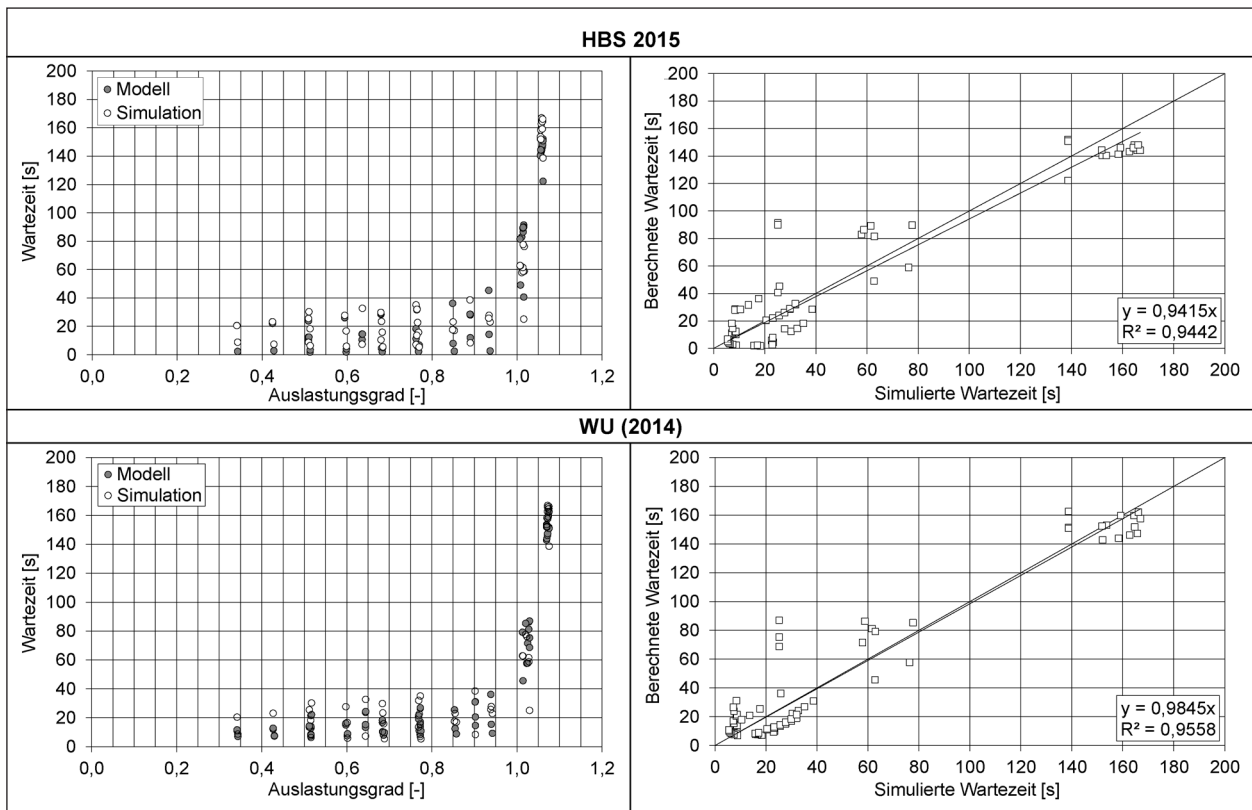


Bild 6-10: Wartezeiten in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad und Gegenüberstellung der berechneten und simulierten Wartezeiten für die untersuchten koordinierten Festzeitsteuerungen

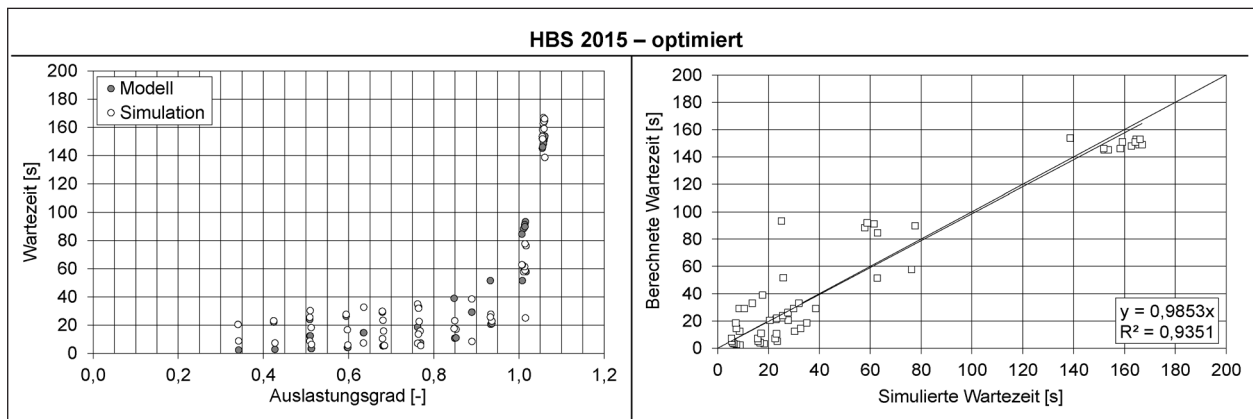


Bild 6-11: Wartezeiten in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad und Gegenüberstellung der berechneten und simulierten Wartezeiten für die untersuchten koordinierten Festzeitsteuerungen mit den optimierten Parametern nach HBS 2015

der Reststauwartezeit zur Berücksichtigung der Koordinierung ist demnach zur Schätzung der Wartezeit aus den Simulationen nicht notwendig. Im Vergleich zu den Ergebnissen nach HBS 2015 in Bild 6-10 ergibt sich mit optimierten Parametern in Bild 6-11 eine nochmals verbesserte Schätzung der Wartezeiten.

6.2 Modelle realer Knotenpunkte

Zusätzlich zu den Auswertungen der empirischen Erhebungen wurden Simulationsuntersuchungen durchgeführt. Dazu wurden die Knotenpunkte und Straßenzüge, an denen Erhebungen für die vorliegende Untersuchung stattfanden, mit dem mikroskopischen Simulationsprogramm VISSIM (Version 7.00-04) nachgebildet. Größtenteils war es möglich, die realen Steuerungslogiken von den Betreibern oder den Signalbaufirmen in den Simulationen zu verwenden. Dadurch ließen sich Abweichungen bei der Nachprogrammierung der teilweise sehr komplexen oder geschützten Steuerungsmethoden umgehen. Für einige Knotenpunkte lagen bereits vollständige Simulationsmodelle vor, die im Rahmen der Untersuchung verwendet werden konnten. Die Modelle wurden für die Simulationsuntersuchungen, sofern möglich, mit den gemessenen Verkehrsstärken aus den Kapitel 4 und 5 versorgt. Lagen keine gemessenen Verkehrsstärken vor, wurden die Zuflüsse aus Verkehrszählungen, die von den zuständigen Behörden bereitgestellt wurden, ermittelt.

Die Kalibrierung der Simulationsmodelle erfolgte auf der Grundlage der empirisch erhobenen Datensätze in den Kapiteln 4 und 5. Als Kenngröße wurde die mittlere Fahrtzeit verwendet. Die simulierten

Fahrtzeiten wurden mit dem t-Test auf signifikante Unterschiede zu den empirischen ermittelten Fahrtzeiten geprüft. Die Fahrverhaltensparameter, Wunschgeschwindigkeiten sowie Routenentscheidungen der Modelle wurden als geeignet angesehen, wenn die Fahrtzeiten der untersuchten Routen keine signifikanten Unterschiede zu den empirischen Ergebnissen aufwiesen.

Die untersuchten Straßenzüge und Abschnitte zwischen benachbarten koordiniert gesteuerten Knotenpunkten wurden mit den realen Verkehrsstärken bzw. den Verkehrsstärken, die für die Kalibrierungsfälle aufbereitet wurden, simuliert. Zudem wurden diejenigen Streckenabschnitte aus Kapitel 4 nachgebildet, für die keine empirischen Ergebnisse vorlagen oder diese nicht vollständig für die untersuchten Zeiträume ausgewertet werden konnten. Dafür wurden die Signalzeitenpläne der Steuerungen in den Simulationsmodellen nachgebildet. Die Verkehrsstärken der Simulationsmodelle wurden, sofern eine Auswertung dieser aus den Messungen möglich war, mit gemessenen Verkehrsstärken versorgt. Für den Fall, dass keine Verkehrsstärken aus den Erhebungen ermittelt werden konnten, wurden diese aus Zählungen der Anlagenbetreiber entnommen.

Die Einzelknotenpunkte mit verkehrabhängiger Steuerung wurden mit fiktiven Verkehrsstärken belastet. In den empirischen Erhebungen konnten an manchen Untersuchungsobjekten nur geringe Verkehrsstärken beobachtet werden. Die für die Simulationen festgelegten Verkehrsstärken orientieren sich daher an den Kapazitäten der Knotenpunkte. Daraus ergibt sich aus den Simulationsergebnissen in Verbindung mit den empirischen

Erhebungen ein umfassendes Bild unterschiedlicher Verkehrssituationen.

Für jedes Modell wurden fünf Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen, die sich von denen der Kalibrierungsläufe unterscheiden, durchgeführt. Der Auswertungszeitraum betrug jeweils eine Stunde.

Die Simulationsergebnisse der realen Untersuchungsobjekte bilden in Verbindung mit den empirischen Ergebnissen die Grundlage für die Analyse der Wartezeitmodelle in den Kapiteln 7 und 8.

7 Wartezeitmodelle für koordiniert festzeitgesteuerte Knotenpunkte

7.1 Methodik

Die Analyse der Verfahren zur Ermittlung der Wartezeit an koordiniert festzeitgesteuerten Knotenpunkten umfasst die Berechnungsverfahren nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) und nach WU (2014). Beide Verfahren sind in Kapitel 2.4 ausführlich beschrieben. Ziel der Analyse der Wartezeitmodelle ist die Überprüfung der Eignung der Berechnungsverfahren für deutsche Verkehrsverhältnisse. Dazu wurden die Wartezeiten für jeden Streckenabschnitt der Untersuchungsobjekte aus Kapitel 4 nach den beiden Verfahren HBS 2015 und WU (2014) berechnet. Als Bezugsintervall wurde ein Zeitraum von einer Stunde zugrunde gelegt. Aus den Untersuchungsobjekten ergeben sich somit insgesamt 190 ausgewertete Stunden-Intervalle, die als Grundlage für die Modellanalyse herangezogen wurden.

Die Eignung der Verfahren zur Schätzung der Wartezeiten wurde durch Regressionsanalysen zwischen berechneten und gemessenen bzw. simulierten Werten bestimmt. Die Güte der Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit den gemessenen bzw. simulierten Werten bildet die Grundlage für die Wahl eines geeigneten Wartezeitmodells. Die in Kapitel 4 ausgewerteten Verlustzeiten enthalten im Vergleich zu den Wartezeiten im Sinne des HBS (FGSV, 2015b) aufgrund der verwendeten Auswertemethodik Verlustzeitanteile, die durch die Beschleunigung der Fahrzeuge hinter den Haltlinien anfallen. Diese zusätzlichen Anteile betragen bei einer zulässigen

Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h und einer Beschleunigung von 3,5 m/s² etwa 2 s. Daher wurden für die Regressionsanalysen von den gemessenen Werten aus Kapitel 4 pauschal jeweils 2 s abgezogen.

Die analytischen Ergebnisse der einzelnen Streckenabschnitte jedes Straßenzugs wurden durch Regressionsanalysen mit den empirischen Ergebnissen aus den GPS-Befahrungen verglichen. Anhand des Bestimmtheitsmaßes und der Steigung der Geradengleichung ist eine Aussage über den Zusammenhang zwischen den berechneten Wartezeiten und den empirisch ermittelten Datensätzen möglich. Eine Geradengleichung mit einem Steigungswert von 1,0 und ein Bestimmtheitsmaß von 1,0 stehen für eine exakte Übereinstimmung der analytischen und gemessenen bzw. simulierten Werte. Aufgrund der Stochastizität der untersuchten Datensätze sind diese Werte jedoch nicht erreichbar. Für die Untersuchung sind jedoch die absoluten Werte der Regressionsparameter von untergeordneter Bedeutung, da die relative Veränderung der Ergebnisse der analysierten Verfahren im Vordergrund steht.

Als zusammenfassendes Fehlermaß wurden der mittlere absolute Fehler („Mean Absolute Error“ – MAE) sowie der mittlere absolute prozentuale Fehler („Mean Absolute Percent Error“ – MAPE) zwischen den empirischen Werten und den analytisch ermittelten Werten aller untersuchten Streckenabschnitte bestimmt. Der MAE berechnet sich nach Gleichung (7-1), der MAPE nach Gleichung (7-2):

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N |t_{W,\text{gem}} - t_{W,\text{ber}}| \quad (7-1)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \left| \left(\frac{t_{W,\text{gem}} - t_{W,\text{ber}}}{t_{W,\text{gem}}} \right) \right| \quad (7-2)$$

jeweils mit

$t_{W,\text{gem}}$ mittlere gemessene bzw. simulierte Wartezeit auf einem Streckenabschnitt im Beobachtungszeitraum von einer Stunde [s/Fz]

$t_{W,\text{ber}}$ berechnete Wartezeit auf einem Streckenabschnitt im Beobachtungszeitraum von einer Stunde [s/Fz]

N Anzahl der Beobachtungsintervalle [-]

Auch hierbei gilt wiederum, dass die Höhe der Abweichungen von untergeordneter Bedeutung sind, da die Ergebnisse etwaige Fehler bei der Ermittlung der Kapazität der Fahrstreifen in den Knotenpunktzufahrten enthalten. Die Fehler entstehen dadurch, dass die Kapazität der Fahrstreifen nicht gemessen, sondern unter Verwendung der Standardparameter nach HBS 2015 ermittelt wurde.

Für alle untersuchten Knotenpunktzufahrten wurden zusätzlich auch die Wartezeiten ohne Berücksichtigung der Koordinierung nach HBS 2015 ermittelt. Der Vergleich dieser Werte mit den Berechnungsergebnissen der Modelle mit Berücksichtigung der Koordinierung zeigt, welchen Einfluss die Koordinierungsfaktoren auf die Wartezeiten in den Verfahren nehmen. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Kapazitäten der betrachteten Fahrstreifen anhand der Standardwerte nach dem Verfahren in Kapitel S4 des HBS 2015 berechnet wurden. Für alle Fahrstreifen wurde unabhängig von den tatsächlichen Gegebenheiten ein ungehinderter Abfluss der Fahrzeuge angenommen. Die Berechnungsergebnisse entsprechen daher nicht für jeden Abschnitt den realistischen Wartezeiten, jedoch werden Fehler bei der Bestimmung der Kapazität der Anlagen ausgeschlossen. Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, die Wirkungsweise der Progressionsfaktoren zur Berücksichtigung der Koordinierung in den analysierten Berechnungsverfahren zu verdeutlichen.

Der Unterschied der Verfahren nach HBS 2015 und nach WU (2014) besteht in der Berechnung der Faktoren zur Berücksichtigung der Einflüsse der Koordinierung. Der Verkehrsablauf im Zuge koordinierter LSA unterscheidet sich von Einzelknotenpunkten durch die Bildung von Kolonnen, die eine Folge koordinierter Zufahrten nach Möglichkeit geschlossen durchfahren können. Um dies zu gewährleisten, werden die Freigabezeiten der Zufahrten durch geeignete Versatzzeiten zeitlich aufeinander abgestimmt. Die Wahl der Versatzzeit ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Nach Möglichkeit wird jedoch immer versucht, die Versatzzeit so zu wählen, dass die Kolonne den Knotenpunkt ohne Zeitverlust passieren kann. Bei einem geringen Anteil an Einbiegern entspricht der anzustrebende Eintreffenszeitpunkt der Kolonne dem Freigabezeitbeginn. Steigt der Anteil des einbiegenden Verkehrs, ist eine Vorlaufzeit vorzusehen, um zu gewährleis-

ten, dass der Verkehr aus den Nebenrichtungen vor dem Eintreffen der Kolonne abfließen kann. Der Eintreffenszeitpunkt der Kolonne an den LSA wird daher als eine von zwei maßgebenden Größen bei der Bestimmung des Faktors f_{k1} herangezogen. Beide untersuchten Verfahren sehen vor, den Freigabezeitbeginn an der vorgelagerten LSA als Referenz für die Ermittlung des Eintreffenszeitpunkts der Kolonne an einer LSA zu verwenden. Dadurch werden auch die Wartezeiten des einbiegenden Verkehrs in der Schätzung berücksichtigt. Im Verfahren nach HBS 2015 wird die Ermittlung des Eintreffenszeitpunkts durch Ablesen aus dem Zeit-Weg-Diagramm der Koordinierung vorgeschlagen. Als zweite Größe fließt der Anteil der Fahrzeuge in Kolonne gegenüber dem einbiegenden Verkehr aus den Nebenrichtungen in die Berechnung ein. Auch in der Ermittlung dieser Größe unterscheiden sich die Verfahren nach HBS 2015 und WU (2014) voneinander. Die Berücksichtigung des Kolonnenanteils P_{pl} am gesamten ankommenden Verkehr erfolgt nach HBS 2015 über das Verhältnis der Verkehrsstärke des Geradeausfahrverkehrs zur Verkehrsstärke des einbiegenden Verkehrs am stromabwärts gelegenen Knotenpunkt. Anhand des Verhältnisses und des Eintreffenszeitpunkts wird der Einflussfaktor R_p durch Ablesen aus einem Diagramm (Bild 2-4) grafisch ermittelt. WU (2014) hat hingegen ein Verfahren zur rechnerischen Ermittlung des Einflusses der Kolonnenanteils entworfen. Das Verfahren beruht auf einem anderen Warteschlangensystem als das Verfahren im HBS 2015. Der Einfluss der Pulkbildung kann demnach genauer bestimmt werden (vgl. Kapitel 2.4).

Nachfolgend werden somit der Verfahrensansatz nach

- HBS 2015 (FGSV, 2015b)

mit Berücksichtigung des Freigabezeitbeginns am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt zur Ermittlung des Einflusses der Kolonnenbildung aus Bild 2-4 sowie der Ansatz nach

- WU (2014)

mit rechnerischer Ermittlung des Einflusses der Kolonnenbildung analysiert.

7.2 Vergleich der analytisch ermittelten Wartezeiten mit den Messwerten

7.2.1 Straßenzüge

Wuppertal: Straßenzug Carnaper Straße/Steinweg

In Bild 7-1 sind die Ergebnisse für den Straßenzug Carnaper Straße/Steinweg dargestellt. Das linke Diagramm zeigt den Vergleich zwischen den berechneten Werten und den mittleren Wartezeiten der GPS-Messungen je Abschnitt des Straßenzugs. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die berechneten Werte über den Werten der GPS-Messungen liegen. Im rechten Diagramm sind die empirischen Wartezeiten sowie die drei zugehörigen analytisch ermittelten Werte in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad dargestellt. Die hohen Abweichungen der analytisch ermittelten Werte stammen hauptsächlich von Streckenabschnitten mit einem Auslastungsgrad über 65 %. Für höhere Auslastungsgrade ist zu erkennen, dass die analytisch ermittelten Werte stark ansteigen. Die Werte der GPS-Messungen steigen im Gegensatz dazu jedoch nicht an, sondern bleiben unverändert auf dem gleichen Niveau wie bei niedrigeren Auslastungsgraden.

Die Darstellungen zeigen, dass durch die Berücksichtigung der Koordinierung eine Verringerung der Wartezeiten im Vergleich zur Wartezeit ohne

Berücksichtigung der Koordinierung erreicht wird. Das Verfahren nach WU (2014) ergibt insgesamt etwas bessere Ergebnisse als das Verfahren nach HBS 2015. Die verbleibenden Abweichungen der Berechnungsergebnisse sind darauf zurückzuführen, dass die reale Kapazität der Abschnitte nicht der zugrunde gelegten rechnerischen Kapazität nach HBS 2015 entspricht.

Bochum: Berliner Straße/Zepplindamm

An dem Straßenzug Berliner Straße/Zepplindamm beruht der Vergleich der empirischen Ergebnisse mit den analytisch ermittelten Wartezeiten auf dem Datensatz des Zeitraums von 16:00 bis 17:00 Uhr. In diesem Zeitraum war – im Gegensatz zur darauffolgenden Stunde der Messung im Abendspitzenzeitraum – kein Abschnitt des Straßenzugs überlastet. In den Diagrammen in Bild 7-2 sind die Wartezeiten auf den einzelnen Abschnitten in beiden Fahrrichtungen dargestellt. Die Punkte im linken Diagramm liegen größtenteils in der Nähe der Diagonalen, die die Lage der Punkte bei exakter Übereinstimmung der berechneten Werte mit den Messwerten kennzeichnet. Die Punktetripel von drei Abschnitten liegen jedoch in zwei Fällen deutlich über und in einem Fall deutlich unter der Diagonalen. Aus dem rechten Diagramm wird ersichtlich, welchen Auslastungsgraden die Abweichungen zuzuordnen sind. Im Überlastungsbereich in Verbindung mit Auslastungsgraden von $x > 1,0$ werden

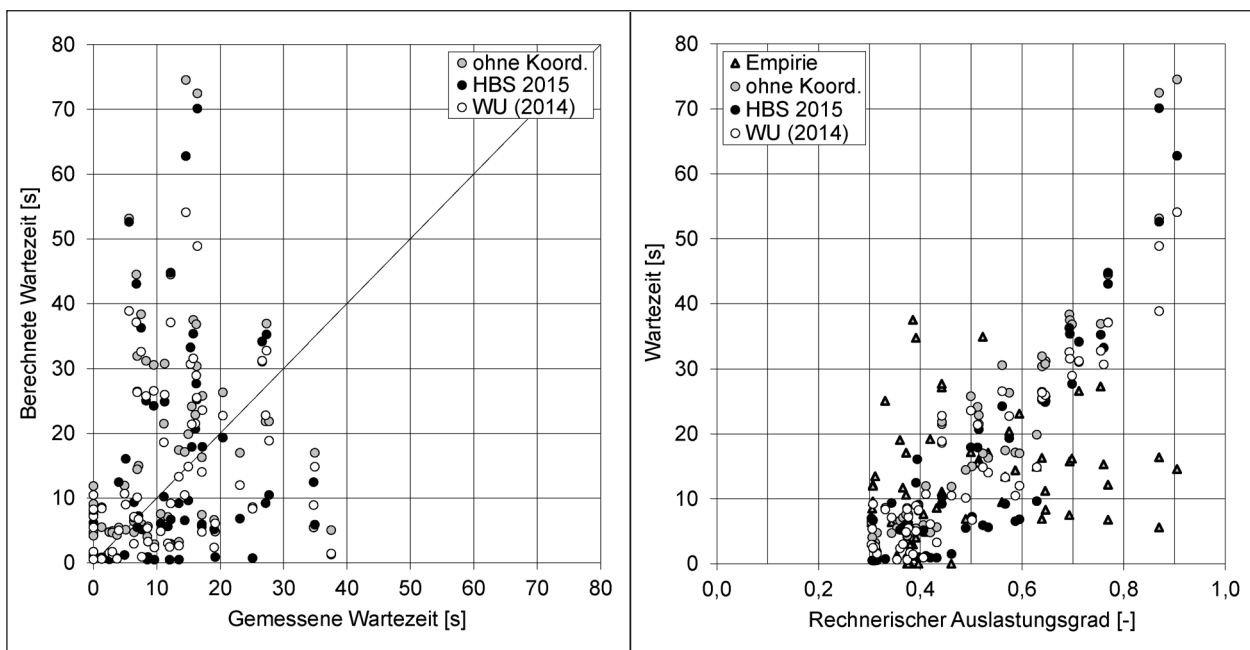


Bild 7-1: Vergleich der mittleren Wartezeiten aus den GPS-Messungen mit den berechneten Wartezeiten nach HBS 2015 (FGSV, 2015b), WU (2014) und ohne Berücksichtigung der Koordinierung (links) sowie Zusammenhang zwischen dem rechnerischen Auslastungsgrad und der mittleren Wartezeit (rechts) für den Straßenzug Carnaper Straße/Steinweg

die Wartezeiten überschätzt. Die zu niedrigen Wartezeiten treten bei niedrigeren Auslastungsgraden auf. Die den Berechnungen zugrunde gelegte rechnerische Kapazität dieser Abschnitte entspricht nicht der tatsächlich während der Messungen vorhandenen Kapazität.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Progressionsfaktoren nach WU (2014) wiederum größeren Einfluss auf die Schätzung der Wartezeiten nehmen als die Faktoren nach HBS 2015. Dies führt, ähnlich wie für den Straßenzug Carnaper

Straße/Steinweg in Wuppertal, dazu, dass die Ergebnisse nach WU (2014) die GPS-Wartezeiten besser repräsentieren als die Ergebnisse nach HBS 2015. Die analytisch ermittelten Wartezeiten von über 100 s ergeben sich an rechnerisch überlasteten Knotenpunkten. Die Überlastungen ergeben sich infolge der für die Kapazitätsermittlung verwendeten Standardparameter nach HBS 2015. Die Berücksichtigung der Koordinierung verändert die Berechnungsergebnisse in die richtige Richtung, jedoch nicht in ausreichendem Maße, um die Abweichungen zu den empirischen Werten auszu-

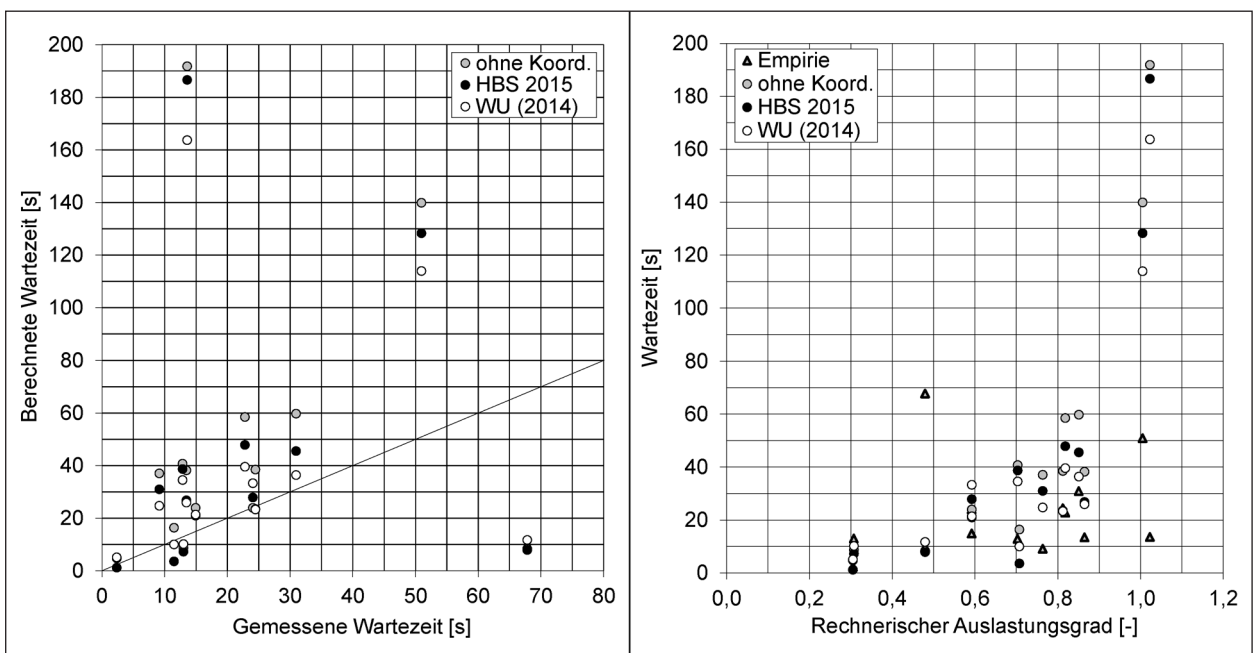


Bild 7-2: Vergleich der mittleren Wartezeiten aus den GPS-Messungen mit den berechneten Wartezeiten nach HBS 2015 (FGSV, 2015b), WU (2014) und ohne Berücksichtigung der Koordinierung (links) sowie Zusammenhang zwischen dem rechnerischen Auslastungsgrad und der mittleren Wartezeit (rechts) für den Straßenzug Berliner Straße/Zepplindamm

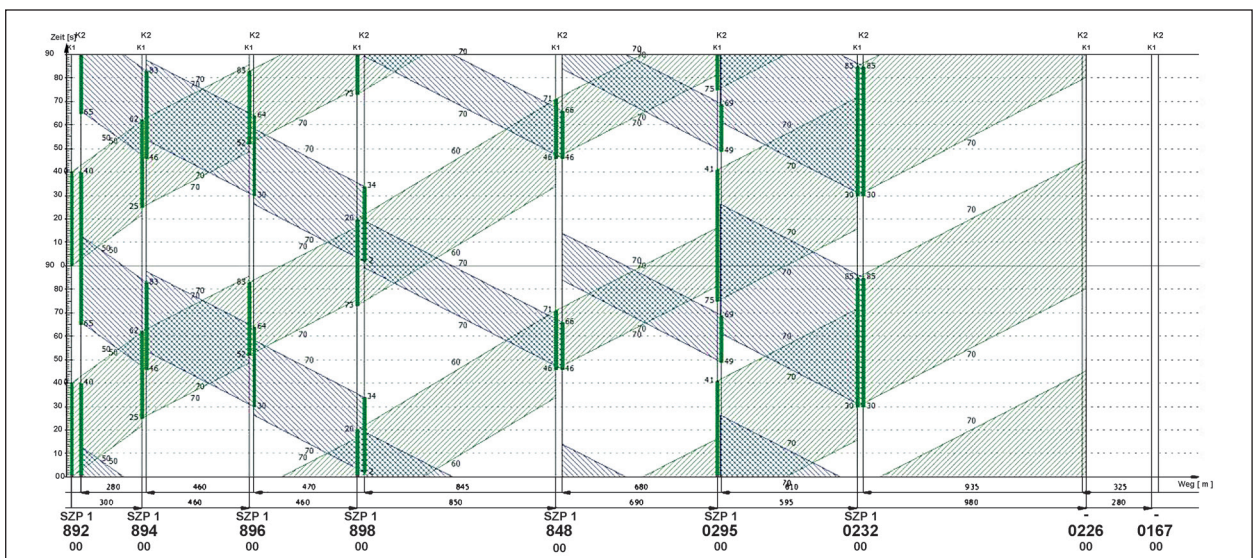


Bild 7-3: Zeit-Weg-Diagramm des Straßenzugs Berliner Straße/Zepplindamm in Bochum

gleichen. Im Zeit-Weg-Diagramm in Bild 7-3 ist zu erkennen, dass die Koordinierung der Signale auf die Fahrtrichtung Süd von der LSA 892 zur LSA 0167 ausgelegt ist. In Fahrtrichtung Nord ist für die Zufahrten an den Knotenpunkten mit den LSA 0232 bis 848 praktisch keine Koordinierung vorhanden. Für den vorliegenden Anwendungsfall kann folglich festgehalten werden, dass die Wartezeiten mit Berücksichtigung der Koordinierung mit beiden Verfahren sowohl die (positiven) Effekte gut koordinierter Zufahrten als auch die (negativen) Effekte infolge nicht koordinierter Zufahrten qualitativ abbilden.

Hamburg: Eiffestraße

In Bild 7-4 sind die Ergebnisse für den Straßenzug Eiffestraße dargestellt. Anhand des linken Diagramms ist zu erkennen, dass die analytisch ermit-

telten Wartezeiten die empirischen Werte nicht zutreffend abbilden. Mit dem Verfahren nach HBS 2015 werden die empirischen Werte nahezu durchgehend unterschätzt. Das Verfahren nach WU (2014) ergibt in den meisten Fällen höhere Werte. Im Bereich niedriger Wartezeiten unter 10 s führt dies jedoch zu einer Überschätzung der Messwerte. Höhere Wartezeiten werden mit beiden Verfahren – abgesehen von einem Ausreißer nach oben – unterschätzt.

Beide Verfahren zur Berücksichtigung der Koordinierung passen jedoch sowohl die niedrigen als auch die höheren Wartezeiten im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Koordinierung besser an die empirischen Werte an. Tendenziell ist zu erkennen, dass dies mit dem Verfahren nach WU (2014) für höhere Wartezeiten besser gelingt als für niedrige. Im Vergleich dazu ergibt die Schätzung nach HBS

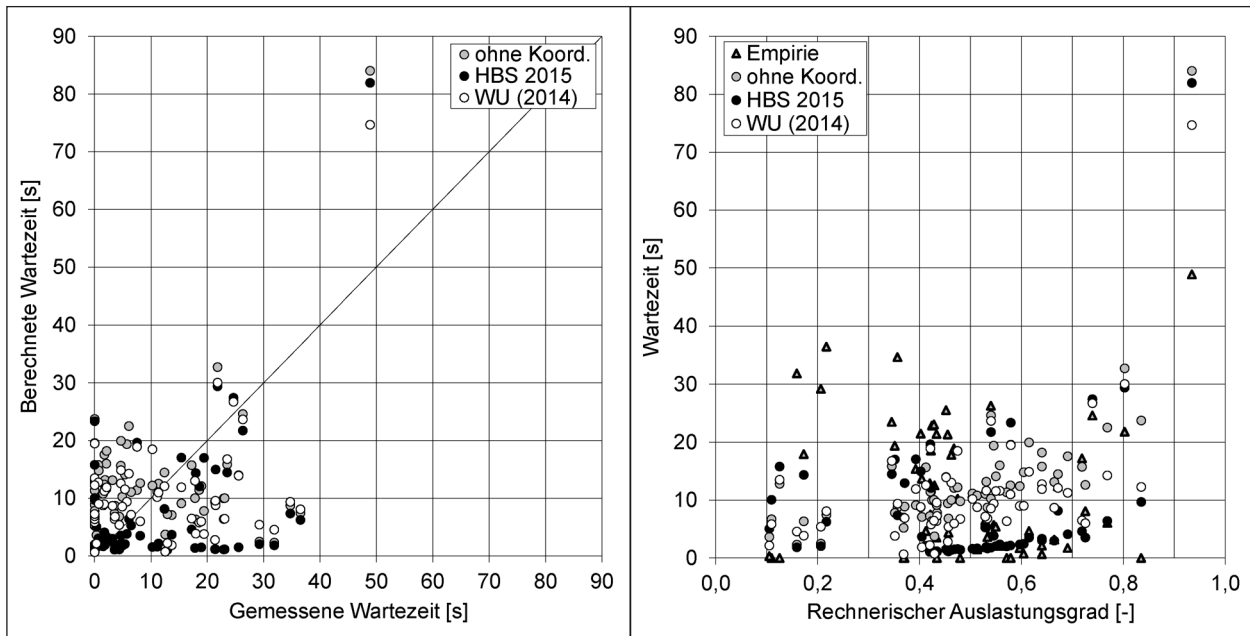


Bild 7-4: Vergleich der mittleren Wartezeiten aus den GPS-Messungen mit den berechneten Wartezeiten nach HBS 2015 (FGSV, 2015b), WU (2014) und ohne Berücksichtigung der Koordinierung (links) sowie Zusammenhang zwischen dem rechnerischen Auslastungsgrad und der mittleren Wartezeit (rechts) für den Straßenzug Eiffestraße

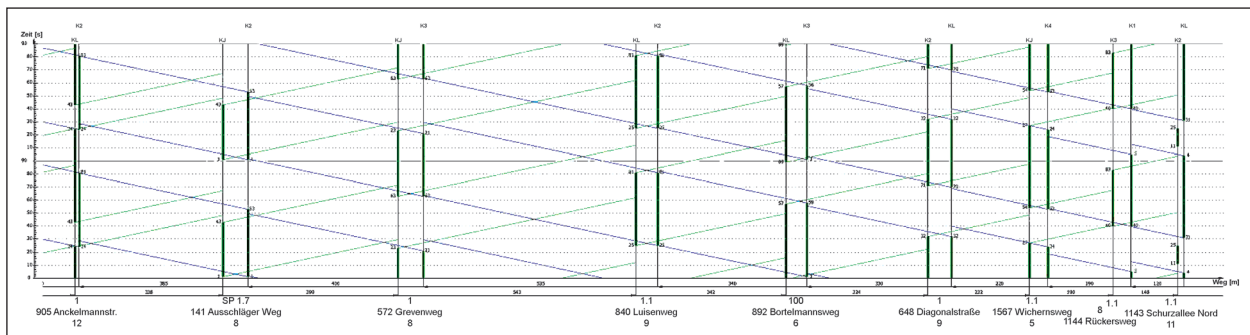


Bild 7-5: Zeit-Weg-Diagramm des Straßenzugs Eiffestraße in Hamburg für die Morgenspitze

2015 bessere Anpassungen für niedrige als für hohe Werte.

Der Grund für die Unterschätzung der Wartezeiten mit dem Verfahren nach HBS 2015 erschließt sich bei Betrachtung der Zeit-Weg-Diagramme. In Bild 7-5 ist exemplarisch das Diagramm der Koordinierung während des Morgenspitzenzeitraums dargestellt. Die Koordinierung der Signale ist sehr gut auf die Fahrtrichtung West (von rechts nach links) ausgerichtet. Jede Zufahrt wird gemäß dem Zeit-Weg-Diagramm bei Freigabezeitbeginn erreicht. In Verbindung mit dem hohen Anteil an Fahrzeugen auf der Eiffestraße im Vergleich zum Anteil der Einbieger aus den Nebenstraßen ergibt sich für diesen Fall mit dem Verfahren nach HBS 2015 ein Progressionsfaktor von $f_{k1} = 0$. Demnach wird auch die Grundwartezeit $t_{W,G}$ nach Gleichung (2-24) gleich null. Die in Bild 7-4 dargestellten Wartezeiten nach HBS 2015 entsprechen für diese Fahrtrichtung folglich nur der Reststauwartezeit $t_{W,R}$ nach Gleichung (2-3). Im Verfahren nach WU (2014) wird der Kolonnenanteil im Gegensatz zum Verfahren nach HBS 2015 nicht über das Verhältnis der Stärke des Geradeausverkehrs zu der des einbiegenden Verkehrs ermittelt, sondern nach Gleichung (2-27). Das Verfahren nach HBS 2015 unterstellt eine gleichmäßige Verteilung der Ankünfte der Kolonne über die Freigabezeit in der betrachteten Zufahrt. Das Verfahren nach WU hingegen berücksichtigt mit Gleichung (2-27), dass nicht der gesamte koordinierte Verkehrsstrom der Zufahrt stromaufwärts mit Sättigungsverkehrsstärke abfließt und demnach auch nicht geschlossen an der betrachteten Zufahrt eintrifft (vgl. Bild 2-2).

In Fahrtrichtung Osten zeigen die Ergebnisse mit Berücksichtigung der Koordinierung, dass die Koordinierungsfaktoren die Wartezeiten ohne Koordinierung qualitativ nicht gleichwertig verändern. Die Wartezeiten von über 70 s sind auf die hohe rechnerische Auslastung des betreffenden Abschnitts zurückzuführen. Die Auslastung konnte in den Messergebnissen nicht festgestellt werden. Die hohe Auslastung des Abschnitts ist wiederum auf die verwendeten Standardparameter nach HBS 2015 zurückzuführen.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse dieses Straßenzugs ist zu beachten, dass die Verkehrsstärken an den einzelnen Knotenpunkten nicht direkt während der Messung erhoben werden konnten. Die verwendeten Werte stammen aus Zählungen des BWVI Hamburg. Die Abweichungen sind somit

möglicherweise zusätzlich zu den Standardparametern zur Kapazitätsermittlung auf die verwendeten Verkehrsstärken in den Berechnungsmodellen zurückzuführen.

Lünen: Straßenzug Dortmunder Straße/ Konrad-Adenauer-Straße

Die analytisch ermittelten Ergebnisse für den Straßenzug Dortmunder Straße/Konrad-Adenauer-Straße sind in Bild 7-6 dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf die beiden Stunden-Intervalle der Abendspitzenmessung von 16:00 bis 17:00 Uhr und von 17:00 bis 18:00 Uhr. Für diesen Zeitraum wurden die stündlichen Verkehrsstärken aus Detektorwerten als Eingangswerte für die Berechnungen aufbereitet. Für den Morgenspitzenzeitraum von 08:00 bis 10:00 Uhr liegen keine Verkehrsstärkewerte vor, da die Verbindung der Steuergeräte zum Verkehrsrechner unterbrochen war. Eine Berechnung der Wartezeiten ist daher nicht möglich.

In den Ergebnissen in Bild 7-6 zeigen die Werte nach WU (2014) eine größere Übereinstimmung mit den empirisch erhobenen Wartezeiten als die Werte nach den anderen beiden Verfahren. Im linken Diagramm liegen mehr Punktetripel über der Diagonalen, die Wartezeiten werden unabhängig vom Berechnungsverfahren somit häufiger überschätzt. Die hohen Abweichungen der berechneten Werte im Vergleich mit den Messwerten beruhen auf den beiden Knotenpunkten K41 und K39 des Straßenzugs in Fahrtrichtung Ost. Im linken Diagramm liegen die berechneten Wartezeiten des Knotenpunkts K41 unter 15 s, die zugehörigen GPS-Messwerte jedoch bei 70 bzw. 90 s. Die Werte des Knotenpunkts K39 liegen hingegen bei gemessenen Wartezeiten von ca. 75 s und berechneten Zeiten von 70 s nach WU (2014) bzw. über 100 s nach HBS 2015 und ohne Berücksichtigung der Koordinierung. Aus dem rechten Diagramm geht hervor, dass den Wartezeiten am Knotenpunkt K41 ein rechnerischer Auslastungsgrad von ungefähr 40 % zugrunde liegt. Der Knotenpunkt befindet sich im Zentrum von Lünen in einem Abstand von nur 110 m zum Knotenpunkt K39. Am Knotenpunkt K39 liegt ein Auslastungsgrad von mehr als 90 % vor. In Verbindung mit den hohen Verkehrsstärken im Bereich der beiden Knotenpunkte reicht der Stauraum zwischen den Knotenpunkten nicht aus, um den Rückstau von Knotenpunkt K39 aufzunehmen. Der Rückstau breitet sich über den Knotenpunkt K41

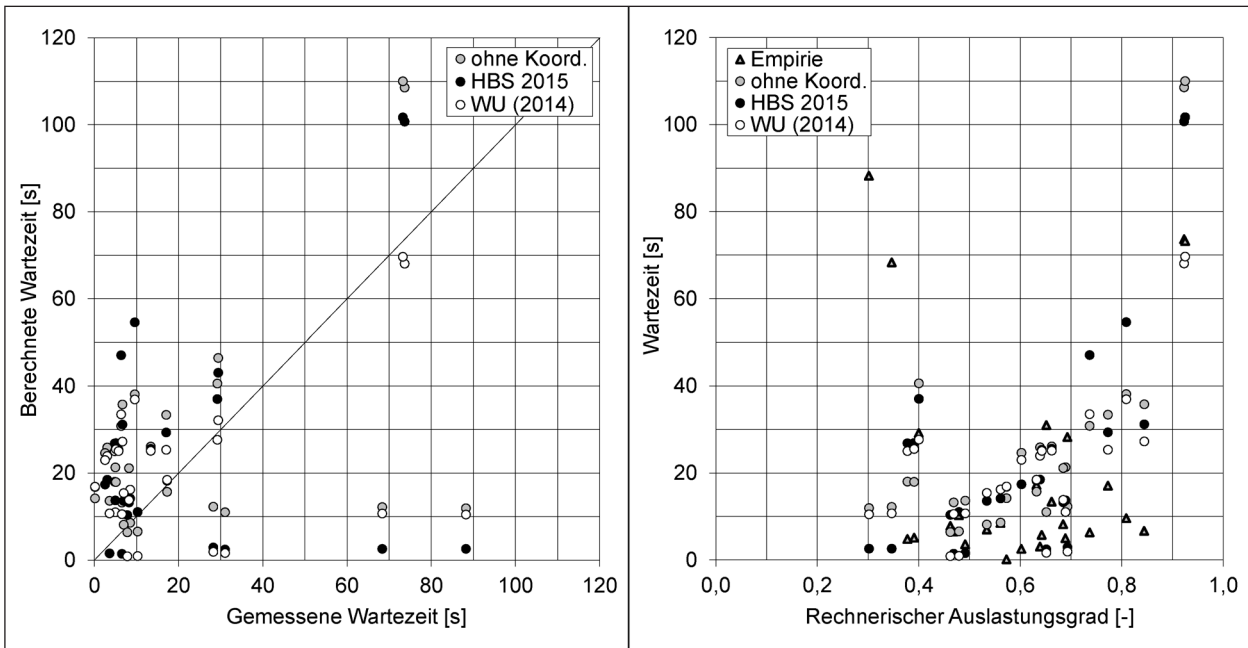


Bild 7-6: Vergleich der mittleren Wartezeiten aus den GPS-Messungen mit den berechneten Wartezeiten nach HBS 2015 (FGSV, 2015b), WU (2014) und ohne Berücksichtigung der Koordinierung (links) sowie Zusammenhang zwischen dem rechnerischen Auslastungsgrad und der mittleren Wartezeit (rechts) für den Straßenzug Dortmunder Straße/Konrad-Adenauer-Straße

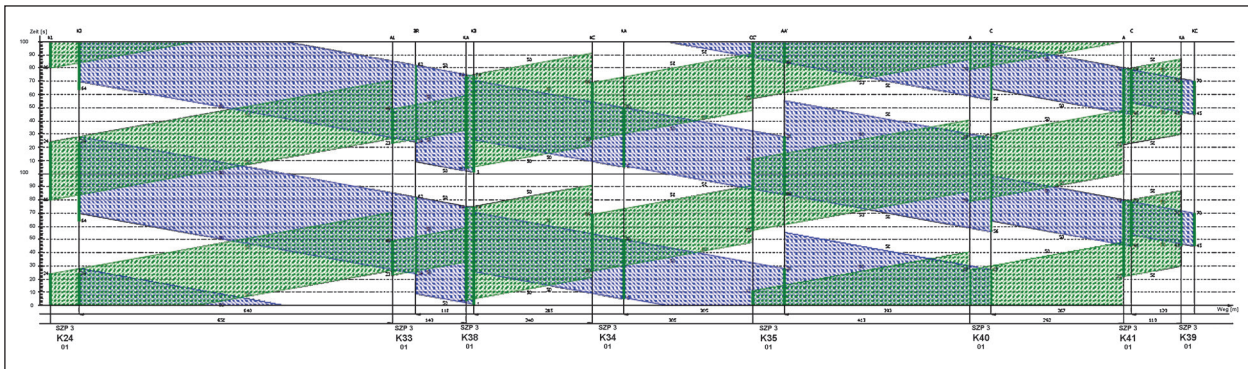


Bild 7-7: Zeit-Weg-Diagramm des Straßenzugs Dortmunder Straße/Konrad-Adenauer-Straße in Lünen für die Abendspitze

hinweg aus. Die gemessenen Verkehrsstärken am Knotenpunkt K41 entsprechen demnach eher der Kapazität des Knotenpunkts K39 als der tatsächlichen Verkehrsnachfrage am Knotenpunkt K41. In den Ergebnissen der GPS-Messungen zeigt sich der zu kurze Stauraum zwischen den beiden Knotenpunkten an den hohen mittleren Wartezeiten am Knotenpunkt K41 von 70 bzw. 90 s. Die Wartezeiten des Knotenpunkts werden in den analytischen Verfahren mit Werten unter 15 s nicht zutreffend abgebildet. Der Grund für die Überstauung des Knotenpunkts wird nach Betrachtung des Zeit-Weg-Diagramms in Bild 7-7 deutlich. Daraus geht hervor, dass die Fahrzeuge am Knotenpunkt K39 ca. 20 s vor Beginn der Freigabezeit eintreffen, bei einer gleichzeitig kurzen Freigabezeit der Zufahrt von ebenfalls 20 s. Die Ergebnisse der restlichen

Abschnitte des Straßenzugs bewegen sich für beide Verfahren im Rahmen der bisher betrachteten Straßenzüge.

Bochum: Königsallee

Die Darstellungen in Bild 7-8 enthalten die Ergebnisse für die Königsallee in Bochum für die Morgen- und die Nachmittagsspitze in Stunden-Intervallen. Anhand des rechten Diagramms wird deutlich, dass die gemessenen Wartezeiten ab einem rechnerischen Auslastungsgrad von 0,6 analytisch überschätzt werden.

Die Verkehrsstärken für die Berechnungen der Wartezeiten wurden durch Zählungen, Videoerhebungen sowie Floating-Car-Schätzungen mit

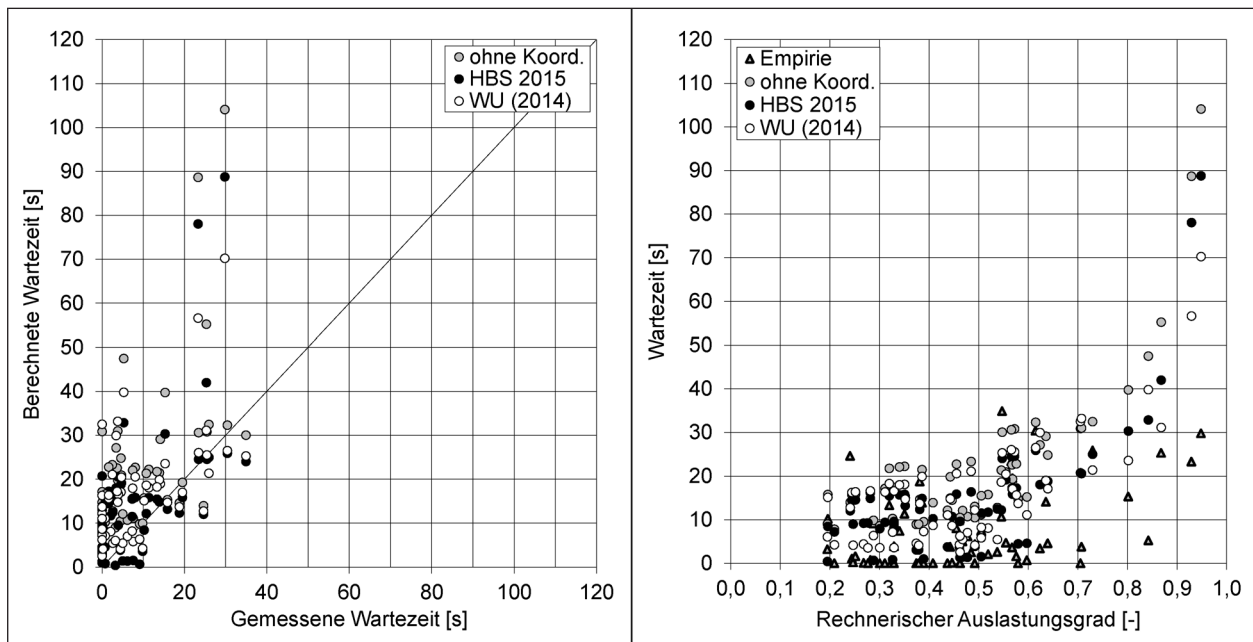


Bild 7-8: Vergleich der mittleren Wartezeiten aus den GPS-Messungen mit den berechneten Wartezeiten nach HBS 2015 (FGSV, 2015b), WU (2014) und ohne Berücksichtigung der Koordinierung (links) sowie Zusammenhang zwischen dem rechnerischen Auslastungsgrad und der mittleren Wartezeit (rechts) für den Straßenzug Königsallee

Videoaufzeichnungen aus den Messfahrzeugen während der GPS-Befahrungen (BRILON et al., 2007) ermittelt.

Zusammenfassende Beurteilung der Ergebnisse

Die Beurteilung der Güte der Schätzergebnisse der analysierten Wartezeitmodelle wurde aufgrund der Stochastizität der GPS-Messungen für alle Beobachtungen gemeinsam durchgeführt.

Bild 7-9 zeigt zunächst alle bisher in Kapitel 7.2.1 betrachteten Werte. Im linken Diagramm ist zu erkennen, dass lediglich für zwei rechnerisch überlastete Abschnitte die berechneten Wartezeiten deutlich über den Messwerten liegen. An drei weiteren Abschnitten liegen die analytisch ermittelten Wartezeiten deutlich unter den gemessenen Werten.

Für die zusammenfassende Beurteilung der Qualität der Berechnungsergebnisse wurden die Abschnitte, die aufgrund der Vereinfachungen bei der Berechnung der Kapazität nicht zutreffend nachgebildet werden können, nicht berücksichtigt. In Bild 7-10 sind die verbleibenden Werte enthalten.

Die ermittelten Fehlermaße in Tabelle 7-1 lassen keine eindeutige Aussage zu, welches der untersuchten Verfahren am geeignetsten für die Berücksichtigung

der Koordinierungseffekte ist. Der Steigungsparameter der Regressionsgeraden liegt für das Verfahren nach HBS 2015 mit 1,017 am dichtesten am Idealwert von 1,0. Gleichzeitig ergibt sich für die Berechnungswerte nach diesem Verfahren das niedrigste Bestimmtheitsmaß. Mit diesem Wert wird die Güte angegeben, mit der die Punktwolke durch die Regressionsgerade repräsentiert wird. Die Werte nach HBS 2015 streuen somit am meisten um die ermittelte Regressionsgerade. Für das Verfahren nach WU (2014) ergibt sich ein höheres Bestimmtheitsmaß bei einem höheren Steigungsparameter der Regressionsgeraden im Vergleich zum Verfahren nach HBS 2015. Ein Bestimmtheitsmaß in ähnlicher Größenordnung ergibt sich für das Verfahren nach HBS 2015 ohne die Berücksichtigung der Koordinierungseffekte. Der Steigungsparameter von 1,247 zeigt, dass die Messwerte mit dem Verfahren nach WU (2014) überschätzt werden. Im Vergleich mit den anderen Verfahren liegt der Steigungsparameter der Regressionsgeraden der Berechnungen mit diesem Verfahren am weitesten vom Idealwert von 1,0 entfernt.

Die geringste absolute Abweichung (MAE) zwischen den gemessenen und den berechneten Werten ergibt sich mit 10,1 s für das Verfahren nach WU (2014). Die niedrigste relative Abweichung (MAPE) ergibt sich ebenfalls für dieses Verfahren.

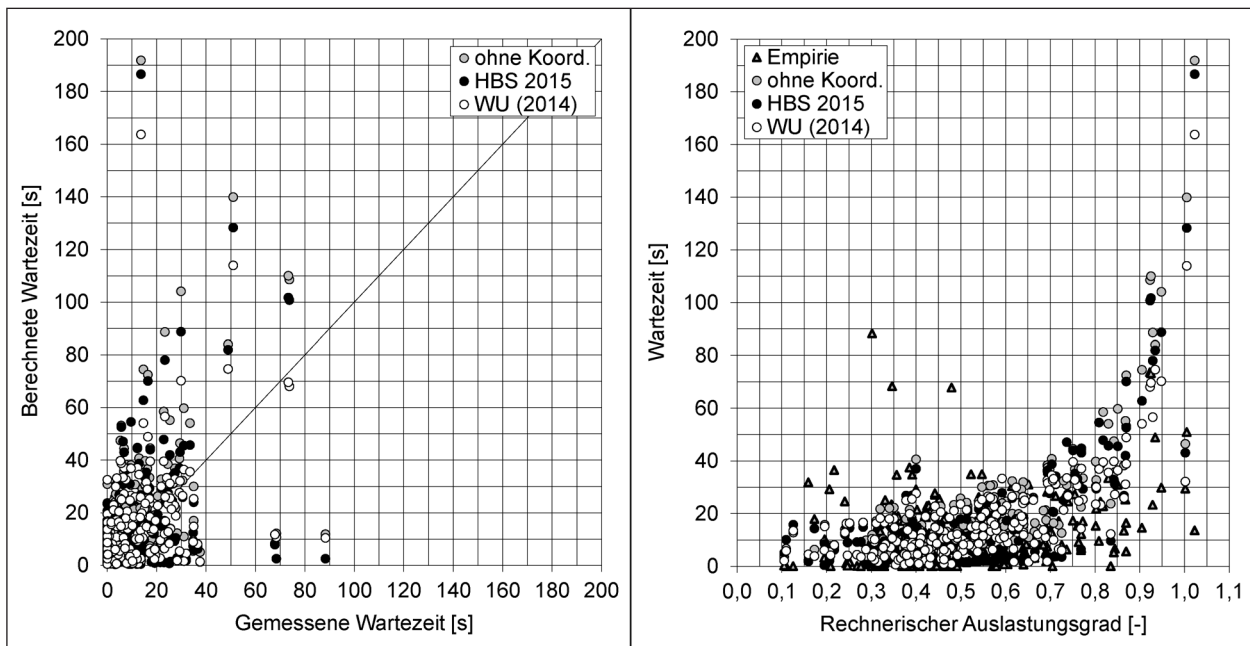


Bild 7-9: Vergleich der mittleren Wartezeiten aus den GPS-Messungen mit den berechneten Wartezeiten nach HBS 2015 (FGSV, 2015b), WU (2014) und ohne Berücksichtigung der Koordinierung (links) sowie Zusammenhang zwischen dem rechnerischen Auslastungsgrad und der mittleren Wartezeit (rechts) für alle untersuchten Abschnitte

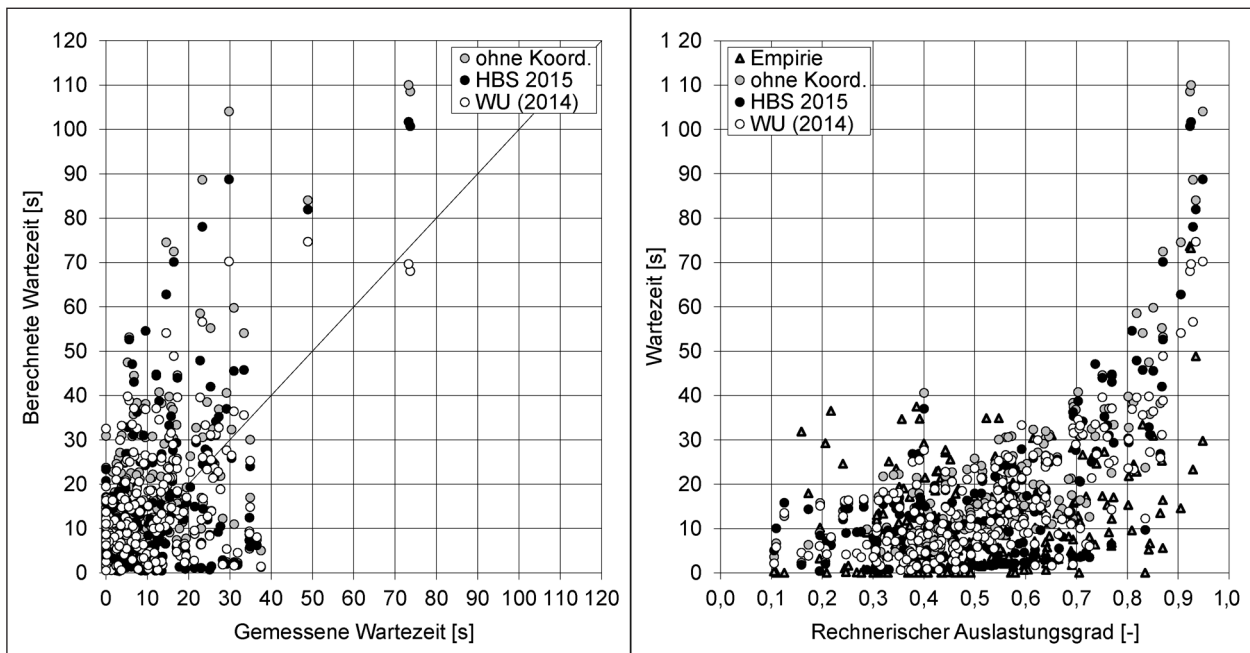


Bild 7-10: Vergleich der mittleren Wartezeiten aus den GPS-Messungen mit den berechneten Wartezeiten nach HBS 2015 (FGSV, 2015b), WU (2014) und ohne Berücksichtigung der Koordinierung (links) sowie Zusammenhang zwischen dem rechnerischen Auslastungsgrad und der mittleren Wartezeit (rechts) für alle Abschnitte nach Ausschluss unplausibler Werte

| Fehlermaß | ohne Koordinierung | HBS 2015 | WU (2014) |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Regressionsgerade | $y = 0,944 \cdot x$ | $y = 1,017 \cdot x$ | $y = 1,247 \cdot x$ |
| Bestimmtheitsmaß | 0,571 | 0,538 | 0,594 |
| MAE [s] | 12,8 | 10,8 | 10,1 |
| MAPE [%] | 365 | 291 | 277 |

Tab. 7-1: Fehlermaße zwischen den berechneten und den gemessenen Wartezeiten zur Ermittlung der Schätzgüte der analysierten Berechnungsverfahren

Die relative Abweichung fällt mit 277 % um etwa 90%-Punkte geringer aus als für die Ergebnisse ohne Koordinierung und um 14%-Punkte geringer als für die Ergebnisse nach HBS 2015. Zu beachten ist für diese Fehlermaße, dass die Absolutwerte durch Abweichungen zwischen der tatsächlichen Kapazität und der den Berechnungen zugrunde gelegten Standardkapazität fehlerbehaftet sind. Die Werte haben für sich gestellt keine Aussagekraft. Erst im Vergleich mit den Fehlermaßen der anderen Verfahren ist eine Aussage über die Schätzgüte der Verfahren möglich.

7.2.2 Abschnitte zwischen koordinierten LSA

Neben den Untersuchungen von gesamten Straßenzügen erfolgte auch eine Betrachtung einzelner Abschnitte zwischen zwei Knotenpunkten. Im Gegensatz zu den Straßenzügen wurden die Wartezeiten an den Untersuchungsobjekten nicht mittels GPS-Befahrungen ermittelt, sondern durch die Erhebung der Fahrzeiten aller Fahrzeuge, die den Abschnitt passiert haben.

Wuppertal: Carnaper Straße/Steinweg, Abschnitt zwischen LSA 353 und 354 in Fahrtrichtung Nord

Die Fahrzeiterhebungen zwischen den beiden Knotenpunkten mit den LSA 353 und 354 des Straßenzugs Carnaper Straße/Steinweg in Wuppertal im Zeitraum von 09:00 bis 10:00 Uhr haben eine mittlere Wartezeit von 21,3 s ergeben. Für diesen Zeitraum wurden die Wartezeiten auf der Grundlage der gemessenen Verkehrsstärken zwischen den koordinierten LSA sowie der Signalzeitpläne der Knotenpunkte berechnet. Analog zu den bisher gezeigten Auswertungen erfolgte keine Verwendung ortsspezifischer Anpassungsfaktoren bei der Berechnung der Sättigungsverkehrsstärke. Die Ergebnisse beziehen sich demnach auf Standardwerte nach HBS 2015.

In Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3 sind die Ausgangswerte für die Ermittlung der Wartezeiten an beiden Knotenpunkten sowie die berechneten Kapazitäten und Auslastungsgrade der in die Koordinierung einfließenden Verkehrsströme enthalten. Die Auslastungsgrade an der LSA 353 liegen zwischen 48 und

| LSA 353, Umlaufzeit $t_U = 90$ s (stromaufwärts) | | | | | | | | | | | | |
|--|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | Ermittlung der Kapazität | | | | | | |
| | | | | | | t_B [s] | Anrechnungsfaktoren | | | q_S [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | x [-] |
| | | | | | | | f_{SV} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Höhne | K3 | 357 | 22 | 23 | 0,27 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 489 | 0,73 |
| Friedrich-Engels-Allee | K8 | 156 | 10 | 11 | 0,12 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 222 | 0,74 |
| | | 173 | | | | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 222 | |
| Fischertal | K4 | 273 | 23 | 24 | 0,27 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 511 | 0,48 |
| | | 214 | | | | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 511 | |

Tab. 7-2: Kapazitäten und Auslastungsgrade der Verkehrsströme in Fahrtrichtung Nord an der LSA 353 nach HBS (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 09:00 bis 10:00 Uhr

| LSA 354, Umlaufzeit $t_U = 90$ s (stromabwärts) | | | | | | | | | | | | |
|---|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | Ermittlung der Kapazität | | | | | | |
| | | | | | | t_B [s] | Anrechnungsfaktoren | | | q_S [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | x [-] |
| | | | | | | | f_{SV} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Steinweg | K2 | 367 | 21 | 22 | 0,24 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 489 | 0,72 |
| | | 336 | | | | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 489 | |

Tab. 7-3: Kapazität und Auslastungsgrad des koordinierten Verkehrsstroms in Fahrtrichtung Nord an der LSA 354 nach HBS (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 09:00 bis 10:00 Uhr

| Fahrtrichtung Nord von LSA 353 nach LSA 354 | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|
| Rechenverfahren | P_{pl} [-] | t_a [s] | R_p [-] | P [-] | f_{k1} [-] | $t_{w,G}$ [s] | N_{frei} [-] | f_{k2} [-] | N_{GE} [Fz] | $t_{w,R}$ [s] | t_w [s] | $t_{w,emp}$ [s] |
| ohne Koord. | - | - | - | - | - | 31,5 (2-2) | - | - | 1,784 (2-6) | 13,1 (2-3) | 44,6 (2-1) | 19,3 |
| HBS 2015 | 0,4152 | - | 0,95 | 0,2322 (2-26) | 1,0162 (2-25) | 32,0 (2-24) | - | 0,9125 (2-9) | 1,635 (2-8) | 12,0 (2-3) | 44,0 (2-1) | |
| WU (2014) | 0,3519 (2-27) | 51 | 1,0845 (2-28) | 0,2651 (2-26) | 0,9727 (2-25) | 30,6 (2-24) | 0,9197 (2-23) | 0,6745 (2-22) | 1,225 (2-8) | 9,0 (2-3) | 39,6 (2-1) | |

Tab. 7-4: Parameter der Wartezeitermittlung mit den zugehörigen Gleichungen (in Klammern) für den koordinierten Verkehrsstrom in Fahrtrichtung Nord an der LSA 354 ohne Berücksichtigung der Koordinierung sowie mit Berücksichtigung der Koordinierung nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) und WU (2014)

74 %. Die Koordinierung ist auf die Signalgruppe K 4 in der Zufahrt Fischertal ausgelegt. Für die koordinierte Zufahrt an der LSA 354 ergibt sich ein Auslastungsgrad von 72 % unter Standardbedingungen nach HBS 2015.

Tabelle 7-4 zeigt die Zwischenergebnisse zur Ermittlung der Wartezeit des koordinierten Verkehrsstroms an der LSA 354. Die Verweise beziehen sich auf die verwendeten Gleichungen aus Kapitel 2.4. Gegenübergestellt sind die Ergebnisse der Berechnung nach HBS 2015 ohne Berücksichtigung der Koordinierung sowie mit den Koordinierungsfaktoren nach HBS 2015 und nach WU (2014).

Zur Bestimmung der Faktoren f_{k1} und f_{k2} werden zunächst die Faktoren R_p und P_{pl} zur Berücksichtigung der Pulkbildung benötigt. Der Faktor P_{pl} ergibt sich nach HBS 2015 aus dem Verhältnis der Verkehrsstärke des koordinierten Verkehrsstroms zur Summe der Verkehrsstärken aller in die Koordinierung einfahrenden Verkehrsströme. Nach WU (2014) ist der Faktor abhängig vom gewichteten Auslastungsgrad aller Verkehrsströme x_u an der

stromabwärts liegenden LSA 353, dem Abflusszeitanteil f_u des koordinierten Verkehrsstroms an der LSA 353 sowie vom Verhältnis der Verkehrsstärke der aus den Nebenrichtungen einfahrenden Verkehrsströme (Zufahrten Höhne und Friedrich-Engels-Allee in Tabelle 7-2) zur Verkehrsstärke des koordinierten Verkehrsstroms. Der Faktor R_p wird rechnerisch nach Gleichung (2-28) in Abhängigkeit vom Faktor P_{pl} , dem Freigabezeitanteil f_A des koordinierten Verkehrsstroms an der LSA 354 sowie dem Eintreffenszeitpunkt t_a des koordinierten Verkehrsstroms an der LSA 354 ermittelt.

Aus den Ergebnissen in Tabelle 7-4 wird ersichtlich, dass die Wartezeit ohne Berücksichtigung der Wirkung der Koordinierung bei 44,6 s liegt. Durch die Faktoren f_{k1} und f_{k2} wird die Wartezeit zwar durch beide Verfahren verringert, mit 39,6 s (WU) und 44,0 s (HBS) liegen die Werte jedoch immer noch deutlich über dem gemessenen Wert von 19,3 s (vgl. Kapitel 4.3.3).

Analog zur Auswertung des Abschnitts zwischen den benachbarten Knotenpunkten in Wuppertal wurden auch die folgenden Abschnitte analysiert.

Bochum: Königsallee, Abschnitt zwischen LSA 127 und 130 in Fahrtrichtung Süd

In Tabelle 7-5 sind die verkehrstechnischen Daten der Verkehrsströme in Fahrtrichtung Süd an der LSA 127 sowie deren Kapazitäten und Auslastungsgrade enthalten. Der Rechtsabbiegestrom der Zufahrt Arnikastraße ist in dieser Richtung gering ausgelastet. Die Auslastung des koordinierten Verkehrsstroms der Zufahrt Königsallee liegt zwischen 55 und 65 %. Der koordinierte Verkehrsstrom an der stromabwärts folgenden LSA 130 ist zu 60 % ausgelastet. Die zugehörigen Werte sind Tabelle 7-6 zu entnehmen.

Auf den Werten in den Tabelle 7-5 und Tabelle 7-6 basieren die Wartezeiten in Tabelle 7-7. Die analytisch ermittelten Werte liegen im Bereich der empirisch erhobenen Wartezeiten. Die Fahrtzeitmessungen ergaben eine Wartezeit von 9,1 s (vgl. Kapitel 4.5.3). Mit dem Verfahren nach WU (2014) wird die Wartezeit von $t_W = 15,2$ s für die Festzeitsteuerung ohne Koordinierung jedoch auf 6,5 s verringert. Mit dem Verfahren nach HBS 2015 hingegen wird die Wartezeit zu 13,8 s geschätzt. Die Schätzung nach WU (2014) stimmt somit besser mit der empirisch ermittelten Wartezeit überein.

| LSA 127, Umlaufzeit $t_U = 90$ s (stromaufwärts) | | | | | | | | | | | | |
|--|----|--------------|--------------|--------------|-----------|--------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|-------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | Ermittlung der Kapazität | | | | | | x [-] |
| | | | | | | t_B [s] | Anrechnungsfaktoren | | | q_S [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | |
| | | | | | | | f_{SV} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Arnikastraße | K3 | 34 | 20 | 21 | 0,27 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 467 | 0,07 |
| Königsallee | K1 | 657 | 52 | 53 | 0,59 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 1.178 | 0,56 |
| | | 764 | 52 | 53 | 0,59 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 1.178 | 0,65 |

Tab. 7-5: Kapazitäten und Auslastungsgrade der Verkehrsströme in Fahrtrichtung Süd an der LSA 127 nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 15:00 bis 16:00 Uhr

| LSA 130, Umlaufzeit $t_U = 90$ s (stromabwärts) | | | | | | | | | | | | |
|---|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|-------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | Ermittlung der Kapazität | | | | | | x [-] |
| | | | | | | t_B [s] | Anrechnungsfaktoren | | | q_S [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | |
| | | | | | | | f_{SV} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Königsallee | K1 | 711 | 52 | 53 | 0,59 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 1.178 | 0,60 |
| | | 711 | 52 | 53 | 0,59 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 1.178 | |

Tab. 7-6: Kapazitäten und Auslastungsgrade der Verkehrsströme in Fahrtrichtung Süd an der LSA 130 nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 15:00 bis 16:00 Uhr

| Fahrtrichtung Süd von LSA 127 nach LSA 130 | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|
| Rechenverfahren | P_{pl} [-] | t_a [s] | R_p [-] | P [-] | f_{k1} [-] | $t_{W,G}$ [s] | N_{frei} [-] | f_{k2} [-] | N_{GE} [Fz] | $t_{W,R}$ [s] | t_W [s] | $t_{W,emp}$ [s] |
| ohne Koord. | - | - | - | - | - | 12,0 (2-2) | - | - | 0,980 (2-6) | 3,2 (2-3) | 15,2 (2-1) | 9,1 |
| HBS 2015 | 0,9766 | - | 1,05 | 0,6183 (2-26) | 0,9284 (2-25) | 11,1 (2-24) | - | 0,8459 (2-9) | 0,832 (2-8) | 2,7 (2-3) | 13,8 (2-1) | |
| WU (2014) | 0,6227 (2-27) | 62 | 1,4339 (2-28) | 0,8444 (2-26) | 0,3785 (2-25) | 4,5 (2-24) | 0,4990 (2-23) | 0,6167 (2-22) | 0,619 (2-8) | 2,0 (2-3) | 6,5 (2-1) | |

Tab. 7-7: Parameter der Wartezeitermittlung mit den zugehörigen Gleichungen (in Klammern) für den koordinierten Verkehrsstrom in Fahrtrichtung Süd an der LSA 130 ohne Berücksichtigung der Koordinierung sowie mit Berücksichtigung der Koordinierung nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) und WU (2014)

Bochum: Königsallee, Abschnitt zwischen LSA 127 und 130 in Fahrtrichtung Nord

Die analytisch ermittelten Wartezeiten in der Gegenrichtung des Abschnitts der Königsallee zeigen eine ähnlich gute Übereinstimmung mit den empirischen Werten. Die Auslastungsgrade der Verkehrsströme der Zufahrten liegen in ähnlicher Größenordnung wie in Fahrtrichtung Süd (Tabelle 7-8 und Tabelle 7-9).

Für die Fahrtrichtung Nord ergibt sich nach dem Verfahren des HBS 2015 eine Wartezeit von $t_w = 4,3$ s (Tabelle 7-10). Das Ergebnis liegt um etwa 10 s unter der gemessenen Wartezeit von 13,7 s (vgl. Kapitel 4.3). Mit dem Verfahren nach WU (2014) ergibt sich eine geringfügig höhere Wartezeit von etwa 4,6 s. Die Wartezeit ohne Berücksichtigung der Koordinierung beträgt 10,2 s. Mit beiden Verfahren zur Berücksichtigung der Koordinierung wird die Wartezeit demnach zusätzlich verringert anstatt in Richtung der gemessenen Wartezeit erhöht.

| LSA 130, Umlaufzeit $t_U = 90$ s (stromaufwärts) | | | | | | | | | | | | |
|--|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | t_B [s] | Ermittlung der Kapazität | | | | | |
| | | | | | | | Anrechnungsfaktoren | | | q_s [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | x [-] |
| | | | | | | | f_{sv} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Waldring | K3 | 37 | 17 | 18 | 0,20 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 400 | 0,09 |
| Waldring | K4 | 17 | 14 | 15 | 0,17 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 333 | 0,05 |
| Königsallee | K2 | 354 | 52 | 53 | 0,58 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 1.156 | 0,43 |
| | | 544 | 52 | 53 | 0,58 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 1.156 | 0,51 |

Tab. 7-8: Kapazitäten und Auslastungsgrade der Verkehrsströme in Fahrtrichtung Nord an der LSA 130 nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 15:00 bis 16:00 Uhr

| LSA 127, Umlaufzeit $t_U = 90$ s (stromabwärts) | | | | | | | | | | | | |
|---|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | t_B [s] | Ermittlung der Kapazität | | | | | |
| | | | | | | | Anrechnungsfaktoren | | | q_s [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | x [-] |
| | | | | | | | f_{sv} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Königsallee | K2 | 569 | 54 | 55 | 0,61 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 1.222 | 0,47 |
| | | 569 | 54 | 55 | 0,61 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 1.222 | 0,47 |

Tab. 7-9: Kapazität und Auslastungsgrad des koordinierten Verkehrsstroms in Fahrtrichtung Nord an der LSA 127 nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 15:00 bis 16:00 Uhr

| Fahrtrichtung Nord von LSA 130 nach LSA 127 | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|
| Rechenverfahren | P_{pl} [-] | t_a [s] | R_p [-] | P [-] | f_{k1} [-] | $t_{w,G}$ [s] | N_{frei} [-] | f_{k2} [-] | N_{GE} [Fz] | $t_{w,R}$ [s] | t_w [s] | $t_{w,emp}$ [s] |
| ohne Koord. | - | - | - | - | - | 9,0 (2-2) | - | - | 0,397 (2-6) | 1,2 (2-3) | 10,2 (2-1) | 13,7 |
| HBS 2015 | 0,9452 | - | 1,40 | 0,8556 (2-26) | 0,3714 (2-25) | 3,4 (2-24) | - | 0,9647 (2-9) | 0,313 (2-8) | 0,9 (2-3) | 4,3 (2-1) | |
| WU (2014) | 0,5201 (2-27) | 53 | 1,3779 (2-28) | 0,8421 (2-26) | 0,4061 (2-25) | 3,7 (2-24) | 0,1360 (2-23) | 0,8058 (2-22) | 0,320 (2-8) | 0,9 (2-3) | 4,6 (2-1) | |

Tab. 7-10: Parameter der Wartezeitermittlung mit den zugehörigen Gleichungen (in Klammern) für den koordinierten Verkehrsstrom in Fahrtrichtung Nord an der LSA 127 ohne Berücksichtigung der Koordinierung sowie mit Berücksichtigung der Koordinierung nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) und WU (2014)

Bochum: Herner Straße, Abschnitt zwischen LSA 614 und 616 in Fahrtrichtung Nord

Die Fahrtzeiten auf dem Abschnitt zwischen den Knotenpunkten mit den LSA 614 und 616 der Herner Straße in Bochum wurden unabhängig von anderen Erhebungen gemessen. Im Gegensatz zu den bisher analysierten Abschnitten sind die Umlaufzeiten an den beiden Knotenpunkten der Herner Straße nicht einheitlich. Die LSA 614 wird mit einem Signalprogramm mit einer Umlaufzeit von 110 s betrieben. Die Umlaufzeit des Signalprogramms der LSA 614 beträgt 90 s. Die Auslastung des koordinierten Verkehrsstroms an der LSA

614 liegt bei 76 %. Die Verkehrsströme der Nebenrichtungen sind zu jeweils 4 % bzw. 19 % ausgelastet (vgl. Tabelle 7-11). Die Auslastung des koordinierten Verkehrsstroms an der LSA 616 beträgt 62 % (vgl. Tabelle 7-12).

Die empirisch ermittelte Wartezeit aus den Fahrtzeiterhebungen in Kapitel 4.6 liegt bei 6,6 s (Tabelle 7-13). Die Wartezeiten beider analysierter Berechnungsverfahren liegen mit 16,5 s nach WU (2014) bzw. 17,0 s nach HBS 2015 über diesem Wert. Die beste Schätzung wird hierfür mit 9,9 s ohne die Berücksichtigung der Koordinierungseffekte erreicht.

| LSA 614, Umlaufzeit $t_U = 110$ s (stromaufwärts) | | | | | | | | | | | | |
|---|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | t_B [s] | Ermittlung der Kapazität | | | | | x [-] |
| | | | | | | | Anrechnungsfaktoren | | | q_S [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | |
| | | | | | | | f_{SV} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Freiligrathstr. | K5/6 | 52 | 14 | 15 | 0,14 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 272 | 0,19 |
| Emscherstraße | K7/8 | 13 | 16 | 17 | 0,15 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 309 | 0,04 |
| Herner Straße | K1/2 | 803 | 57 | 58 | 0,53 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 1.054 | 0,76 |

Tab. 7-11: Kapazitäten und Auslastungsgrade der Verkehrsströme in Fahrtrichtung Nord an der LSA 614 nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 15:00 bis 16:00 Uhr

| LSA 616, Umlaufzeit $t_U = 90$ s (stromabwärts) | | | | | | | | | | | | |
|---|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | t_B [s] | Ermittlung der Kapazität | | | | | x [-] |
| | | | | | | | Anrechnungsfaktoren | | | q_S [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | |
| | | | | | | | f_{SV} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Herner Straße | K1/2 | 868 | 62 | 63 | 0,70 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 1.400 | 0,62 |

Tab. 7-12: Kapazität und Auslastungsgrad des koordinierten Verkehrsstroms in Fahrtrichtung Nord an der LSA 616 nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 15:00 bis 16:00 Uhr

| Fahrtrichtung Nord von LSA 614 nach LSA 616 | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|
| Rechenverfahren | P_{pl} [-] | t_a [s] | R_p [-] | P [-] | f_{k1} [-] | $t_{W,G}$ [s] | N_{frei} [-] | f_{k2} [-] | N_{GE} [Fz] | $t_{W,R}$ [s] | t_w [s] | $t_{w,emp}$ [s] |
| ohne Koord. | - | - | - | - | - | 7,2 (2-2) | - | - | 1,064 (2-6) | 2,7 (2-3) | 9,9 (2-1) | 6,6 |
| HBS 2015 | 0,9251 | - | 0,55 | 0,3850 (2-26) | 2,0500 (2-25) | 14,7 (2-24) | - | 0,8336 (2-9) | 0,888 (2-8) | 2,3 (2-3) | 17,0 (2-1) | |
| WU (2014) | 0,7307 (2-27) | 8 | 0,5352 (2-28) | 0,3746 (2-26) | 2,0845 (2-25) | 14,9 (2-24) | 0,5058 (2-23) | 0,5833 (2-22) | 0,622 (2-8) | 1,6 (2-3) | 16,5 (2-1) | |

Tab. 7-13: Parameter der Wartezeitermittlung mit den zugehörigen Gleichungen (in Klammern) für den koordinierten Verkehrsstrom in Fahrtrichtung Nord an der LSA 616 ohne Berücksichtigung der Koordinierung sowie mit Berücksichtigung der Koordinierung nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) und WU (2014)

Bochum: Herner Straße, Abschnitt zwischen LSA 616 und 614 in Fahrtrichtung Süd

In Fahrtrichtung Süd ergibt sich für den koordinierten Verkehrsstrom an der LSA 616 nach den Berechnungen ein Auslastungsgrad von 87 %. Aufgrund der geringen Freigabezeit für die Zufahrt Feldsieper Straße liegt der Auslastungsgrad dort im Vergleich zu den Nebenrichtungen in Fahrtrichtung Nord mit 65 % deutlich höher. Die Berechnungsergebnisse sind Tabelle 7-14 zu entnehmen. An der LSA 616 ergab die Berechnung eine Auslastung des koordinierten Verkehrsstroms von 67 % (Tabelle 7-15).

Die Wartezeit des koordinierten Verkehrsstroms an der LSA 614 wurde aus den Fahrtzeiterhebungen (vgl. Kapitel 4.6) zu 12,2 s ermittelt. Die Ergebnisse in Tabelle 7-16 zeigen deutliche Unterschiede in den beiden Verfahren. Die Wartezeit wird mit beiden analysierten Verfahren im Vergleich zur Wartezeit mit Festzeitsteuerung ohne Berücksichtigung der Koordinierung zu stark verringert. Mit dem Verfahren nach WU (2014) ergibt sich eine Wartezeit von 1,7 s und nach HBS 2015 von 5,2 s. In diese Fahrtrichtung zeigt wiederum die Berechnung der Wartezeit ohne die Koordinierungsfaktoren f_{k1} und f_{k2} die beste Näherung.

| LSA 616, Umlaufzeit $t_U = 90$ s (stromaufwärts) | | | | | | | | | | | | |
|--|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | t_B [s] | Ermittlung der Kapazität | | | | | |
| | | | | | | | Anrechnungsfaktoren | | | q_S [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | x [-] |
| | | | | | | | f_{SV} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Feldsieper Str. | K7/8 | 115 | 7 | 8 | 0,09 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 178 | 0,65 |
| Herne Straße | K3/4 | 732 | 37 | 38 | 0,42 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 844 | 0,87 |

Tab. 7-14: Kapazitäten und Auslastungsgrade der Verkehrsströme in Fahrtrichtung Süd an der LSA 616 nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 15:00 bis 16:00 Uhr

| LSA 614, Umlaufzeit $t_U = 110$ s (stromabwärts) | | | | | | | | | | | | |
|--|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | t_B [s] | Ermittlung der Kapazität | | | | | |
| | | | | | | | Anrechnungsfaktoren | | | q_S [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | x [-] |
| | | | | | | | f_{SV} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Herne Straße | K3/4 | 847 | 69 | 70 | 0,64 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 1.273 | 0,67 |

Tab. 7-15: Kapazität und Auslastungsgrad des koordinierten Verkehrsstroms in Fahrtrichtung Süd an der LSA 614 nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 15:00 bis 16:00 Uhr

| Fahrtrichtung Süd von LSA 616 nach LSA 614 | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|
| Rechenverfahren | P_{pl} [-] | t_a [s] | R_p [-] | P [-] | f_{k1} [-] | $t_{W,G}$ [s] | N_{frei} [-] | f_{k2} [-] | N_{GE} [Fz] | $t_{W,R}$ [s] | t_w [s] | $t_{w,emp}$ [s] |
| ohne Koord. | - | - | - | - | - | 12,0 (2-2) | - | - | 1,0540 (2-6) | 3,0 (2-3) | 15,0 (2-1) | 12,2 |
| HBS 2015 | 0,8856 | - | 1,40 | 0,8909 (2-26) | 0,3000 (2-25) | 3,6 (2-24) | - | 0,5485 (2-9) | 0,5804 (2-8) | 1,6 (2-3) | 5,2 (2-1) | |
| WU (2014) | 0,7854 (2-27) | 59 | 1,6717 (2-28) | 1,0 (2-26) | 0 (2-25) | 0 (2-24) | 0,5009 (2-23) | 0,5731 (2-22) | 0,6063 (2-8) | 1,7 (2-3) | 1,7 (2-1) | |

Tab. 7-16: Parameter der Wartezeitermittlung mit den zugehörigen Gleichungen (in Klammern) für den koordinierten Verkehrsstrom in Fahrtrichtung Süd an der LSA 614 ohne Berücksichtigung der Koordinierung sowie mit Berücksichtigung der Koordinierung nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) und WU (2014)

Bochum: Berliner Straße, Abschnitt zwischen LSA 898 und 848 in Fahrtrichtung Süd

Auf dem Straßenzug Berliner Straße wurden zusätzliche detaillierte Fahrzeiterhebungen während der Abendspitze auf dem Abschnitt zwischen den Knotenpunkten mit den LSA 898 und 848 durchgeführt (vgl. Kapitel 4.1). Die Messungen erfolgten gemeinsam mit den GPS-Messungen auf dem Straßenzug. Als Eingangsgrößen für die Berechnungen der Wartezeiten wurden die Signalzeiten der beiden Knotenpunkte sowie die gemessenen Verkehrsstärken zwischen 16:00 und 17:00

Uhr verwendet. Die Messergebnisse im Zeitraum von 17:00 bis 18:00 Uhr konnten aufgrund von Überlastungen auf dem Abschnitt nicht für den Vergleich mit den analytischen Wartezeiten verwendet werden. Für den Zeitraum von 16:00 bis 17:00 Uhr sind die Ausgangsverkehrsstärken sowie die Kapazitäten und Auslastungsgrade der betreffenden Verkehrsströme in Tabelle 7-17 und Tabelle 7-18 enthalten.

Die mittlere Wartezeit mit Berücksichtigung der Progressionsfaktoren nach HBS 2015 liegt bei 45,8 s sowie bei 35,7 s nach WU (2014). Die analytische

| LSA 898, Umlaufzeit $t_U = 90$ s (stromaufwärts) | | | | | | | | | | | | |
|--|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | t_B [s] | Ermittlung der Kapazität | | | | | x [-] |
| | | | | | | | Anrechnungsfaktoren | | | q_S [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | |
| | | | | | | | f_{SV} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Burgstraße | K3 | 180 | 25 | 26 | 0,29 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 578 | 0,31 |
| Schlaraffiastr. | K4 | 15 | 21 | 22 | 0,24 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 489 | 0,03 |
| Berliner Straße | K1 | 760 | 37 | 38 | 0,42 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 844 | 0,81 |
| | | 610 | | | | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 844 | |

Tab. 7-17: Kapazitäten und Auslastungsgrade der Verkehrsströme in Fahrtrichtung Süd an der LSA 898 nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 16:00 bis 17:00 Uhr

| LSA 848, Umlaufzeit $t_U = 90$ s (stromabwärts) | | | | | | | | | | | | |
|---|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------|
| Zufahrt | SG | q [Kfz/h] | t_F [s] | t_A [s] | f_A [-] | t_B [s] | Ermittlung der Kapazität | | | | | x [-] |
| | | | | | | | Anrechnungsfaktoren | | | q_S [Kfz/h] | C_0 [Kfz/h] | |
| | | | | | | | f_{SV} [-] | $f_1 = f_R$ [-] | $f_2 = f_B$ [-] | | | |
| Berliner Straße | K4 | 533 | 26 | 27 | 0,3 | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 600 | 0,83 |
| | | 463 | | | | 1,8 | 1 | 1 | 1 | 2.000 | 600 | |

Tab. 7-18: Kapazität und Auslastungsgrad des koordinierten Verkehrsstroms in Fahrtrichtung Süd an der LSA 848 nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) im Zeitraum von 16:00 bis 17:00 Uhr

| Fahrtrichtung Süd von LSA 898 nach LSA 848 | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|
| Rechenverfahren | P_{pl} [-] | t_a [s] | R_p [-] | P [-] | f_{k1} [-] | $t_{W,G}$ [s] | N_{frei} [-] | f_{k2} [-] | N_{GE} [Fz] | $t_{W,R}$ [s] | t_w [s] | $t_{W,emp}$ [s] |
| ohne Koord. | - | - | - | - | - | 29,4 (2-2) | - | - | 4,124 (2-6) | 24,7 (2-3) | 54,1 (2-1) | 35,4 |
| HBS 2015 | 0,8709 | - | 1,30 | 0,3900 (2-26) | 0,8714 (2-25) | 25,6 (2-24) | - | 0,7837 (2-9) | 3,364 (2-8) | 20,2 (2-3) | 45,8 (2-1) | |
| WU (2014) | 0,7653 (2-27) | 46 | 1,2502 (2-28) | 0,3751 (2-26) | 0,8928 (2-25) | 26,2 (2-24) | 2,0262 (2-23) | 0,3297 (2-22) | 1,567 (2-8) | 9,4 (2-3) | 35,7 (2-1) | |

Tab. 7-19: Parameter der Wartezeitermittlung mit den zugehörigen Gleichungen (in Klammern) für den koordinierten Verkehrsstrom in Fahrtrichtung Süd an der LSA 848 ohne Berücksichtigung der Koordinierung sowie mit Berücksichtigung der Koordinierung nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) und WU (2014)

Wartezeit nach HBS 2015 ergibt eine Überschätzung des Messergebnisses um ca. 10 s. Die empirische Wartezeit des koordinierten Verkehrsstroms von ca. 35 s wird mit dem Verfahren nach WU (2014) am besten erreicht. Die einzelnen Berechnungsschritte sind Tabelle 7-17, Tabelle 7-18 und Tabelle 7-19 zu entnehmen.

Zusammenfassende Beurteilung der Ergebnisse

Die Analyse der Verfahren zur Schätzung der Wartezeiten an Abschnitten zwischen benachbarten LSA lässt ebenfalls keine eindeutige Empfehlung für eines der analysierten Verfahren zu. Für drei der sechs analysierten Abschnitte ergab die Schätzung der Wartezeiten ohne Berücksichtigung der Koordinierung die geringsten Abweichungen. Für zwei Abschnitte liegen hingegen die Schätzungen nach WU (2014) näher an den gemessenen Wartezeiten. Das Verfahren nach HBS 2015 ergibt lediglich für

einen Abschnitt das beste Schätzergebnis. Die Abweichungen der Ergebnisse schwanken zwischen ca. 2 und 20 s.

Für die Regressionsanalyse werden analog zur Betrachtung der gesamten Straßenzüge alle berechneten Werte gemeinsam betrachtet. Die Diagramme sind in Bild 7-11 dargestellt. Für Wartezeiten unter 20 s liegen die Schätzungen ohne Berücksichtigung der Koordinierung am nächsten an den empirischen Werten. Die Wartezeiten nach WU (2014) liegen in diesem Bereich mehrheitlich unter den empirischen Werten. Das Verfahren nach HBS 2015 hingegen ergibt in etwa gleich viele höhere und niedrigere Schätzungen. Wartezeiten über 20 s konnten nur für zwei Abschnitte gemessen werden.

Für höhere Wartezeiten zeigt das Verfahren nach WU (2014) geringere Abweichungen. Die höheren Werte liegen mehrheitlich über den empirischen

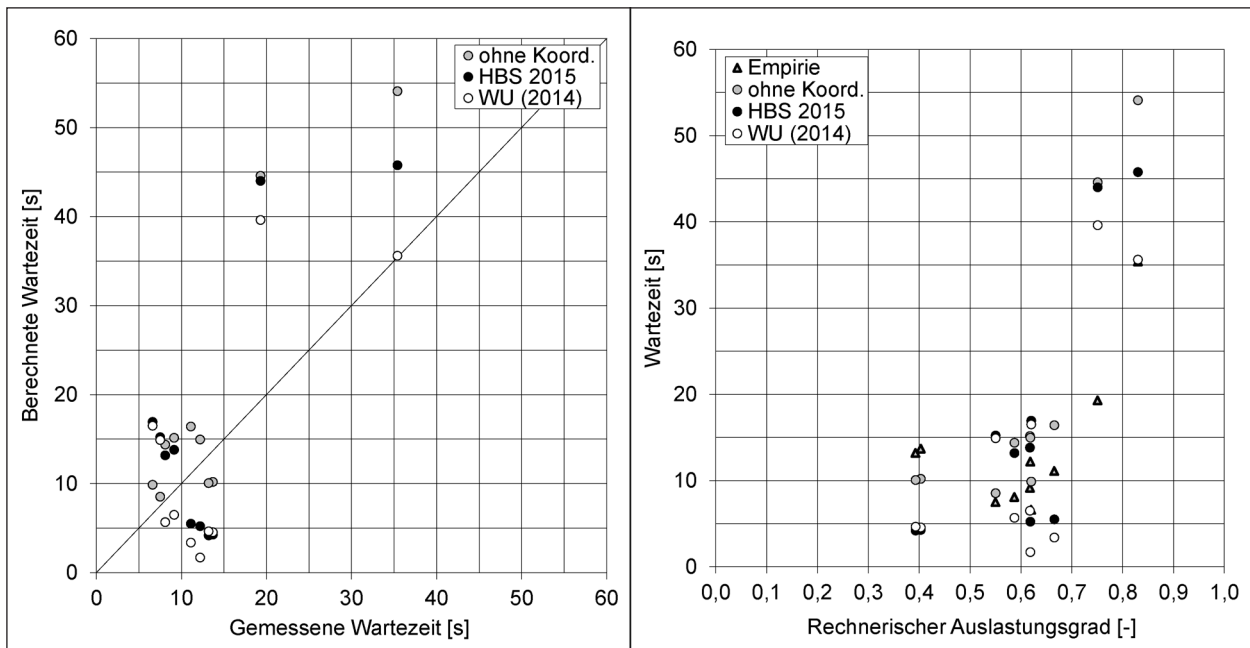


Bild 7-11: Vergleich aller mittleren Wartezeiten aus den Fahrzeiterhebungen an Abschnitten zwischen benachbarten koordinierten LSA mit den berechneten Wartezeiten nach HBS 2015 (FGSV, 2015b), WU (2014) und ohne Berücksichtigung der Koordinierung (links) sowie Zusammenhang zwischen dem rechnerischen Auslastungsgrad und der mittleren Wartezeit (rechts) für alle Abschnitte

| Fehlermaß | ohne Koordinierung | HBS 2015 | WU (2014) |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Regressionsgerade | $y = 1,514 \cdot x$ | $y = 1,133 \cdot x$ | $y = 0,905 \cdot x$ |
| Bestimmtheitsmaß | 0,924 | 0,792 | 0,732 |
| MAE [s] | 7,5 | 9,4 | 7,8 |
| MAPE [%] | 51 | 78 | 70 |

Tab. 7-20: Fehlermaße zwischen den berechneten und den gemessenen Wartezeiten zur Ermittlung der Schätzgüte der analysierten Berechnungsverfahren

Wartezeiten. Daher ist anzunehmen, dass die Kapazität der Zufahrten in den Berechnungen unterschätzt wird. Für alle Berechnungen wurden analog zu den Berechnungen an Straßenzügen die Standardsättigungsverkehrsstärken nach HBS 2015 angesetzt.

Die Regressionsrechnung zeigt für das Verfahren nach WU (2014) den günstigsten Steigungsparameter der Regressionsgeraden mit der geringsten Abweichung zum Wert 1,0, jedoch ergibt das Bestimmtheitsmaß die größte Streuung der Werte (Tabelle 7-20). Die weiteren Fehlermaße ergeben für das Verfahren ohne Berücksichtigung der Koordinierung die geringsten Abweichungen. Somit kann anhand dieser Analyse ebenfalls keine eindeutige Empfehlung für eines der analysierten Verfahren ausgesprochen werden.

7.3 Vergleich der analytisch ermittelten Wartezeiten mit den Simulationsergebnissen

Alle bisher analysierten Untersuchungsobjekte wurden zusätzlich in der mikroskopischen Simulation nachgebildet. Im Gegensatz zur Analyse auf der Grundlage der empirisch erhobenen Werte wurden die Verkehrsstärken aller Verkehrsströme aus der

Simulation als Eingangswerte für die Rechenverfahren verwendet. Die Kapazität der Fahrstreifen wurde mit den Standardparametern nach HBS 2015 für unbehinderten Abfluss ermittelt, damit die Effekte der Progressionsfaktoren im Vergleich zur Ermittlung der Wartezeiten mit Festzeitsteuerung deutlich werden. Dadurch ergeben sich zwar u. U. systematische Abweichungen der analytisch ermittelten Wartezeiten zu den Simulationsergebnissen, jedoch sind die Abweichungen für die verglichenen analytischen Verfahren gleich groß. Das Diagramm in Bild 7-12 zeigt den Vergleich der Simulationsergebnisse aller Untersuchungsobjekte mit den analytisch ermittelten Werten. Dabei wurden Werte bis zu einem Auslastungsgrad von 0,85 in den Vergleich einbezogen. An fünf Abschnitten lag der Auslastungsgrad über 0,85. Die Berechnungswerte dieser Abschnitte ergaben vergleichsweise hohe Abweichungen zu den Simulationsergebnissen. Da die Verfahren zur Wartezeitermittlung an koordinierten LSA bei hohen Auslastungsgraden aufgrund des regelmäßig auftretenden Rückstaus bei Freigabezeit nicht geeignet sind, wurden diese Ergebnisse nicht weiter berücksichtigt.

Die Fehlermaße zwischen den in den Bild 7-12 dargestellten berechneten Wartezeiten und den simulierten Wartezeiten sind in Tabelle 7-21 enthalten. Die rechnerischen Ergebnisse weisen für die Schät-

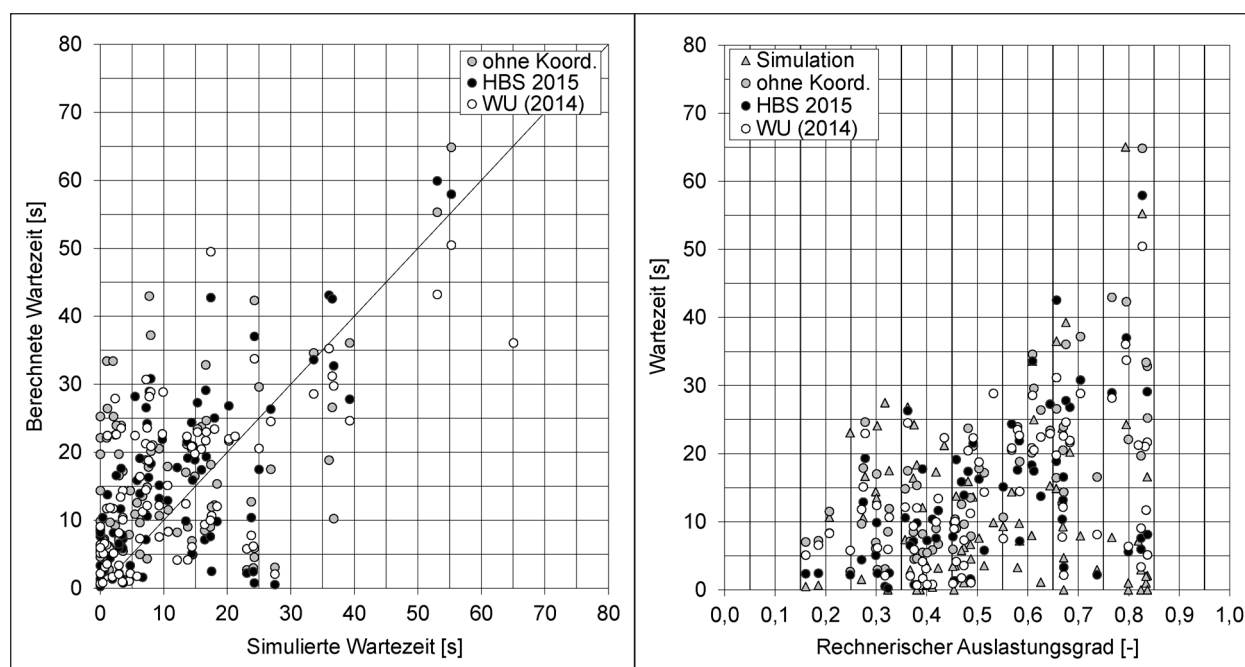


Bild 7-12: Vergleich aller mittleren Wartezeiten aus den Simulationsuntersuchungen mit den berechneten Wartezeiten nach HBS 2015 (FGSV, 2015b), WU (2014) und ohne Berücksichtigung der Koordinierung (links) sowie Zusammenhang zwischen dem rechnerischen Auslastungsgrad und der mittleren Wartezeit (rechts) nach Ausschluss unplausibler Werte

| Fehlermaß | ohne Koordinierung | HBS 2015 | WU (2014) |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Regressionsgerade | $y = 0,649 \cdot x$ | $y = 0,740 \cdot x$ | $y = 0,761 \cdot x$ |
| Bestimmtheitsmaß | 0,582 | 0,705 | 0,665 |
| MAE [s] | 10,6 | 8,7 | 8,4 |
| MAPE [%] | 259 | 175 | 169 |

Tab. 7-21: Fehlermaße zwischen den berechneten Wartezeiten und den Simulationsergebnissen zur Ermittlung der Schätzgüte der analysierten Berechnungsverfahren

zungen mit Berücksichtigung der Koordinierung nach WU (2014) den günstigsten Steigungsparameter der Regressionsgeraden auf. Der Steigungswert liegt mit 0,761 jedoch relativ deutlich unter dem Idealwert von 1,0. Insgesamt liegen die Wartezeiten der Berechnungsverfahren im Gegensatz zum Vergleich der analytischen Ergebnisse mit den empirischen Wartezeiten im vorhergehenden Kapitel unter den Vergleichswerten der Simulationsuntersuchungen. Die Steigungsparameter der Regressionsgeraden der Verfahren ohne sowie mit Berücksichtigung der Koordinierung nach HBS 2015 liegen unter dem Steigungsparameter der Geraden mit Berücksichtigung der Koordinierung nach WU (2014). Die Parameter zeigen, dass beide Verfahren die berechneten Wartezeiten ohne Koordinierung erhöhen und somit überwiegend zutreffend beeinflussen. Mit dem Verfahren nach HBS 2015 werden die rechnerischen Wartezeiten im Vergleich zum Verfahren nach WU (2014) jedoch etwas weniger erhöht. Die Regressionsrechnung liefert für das Verfahren nach HBS 2015 mit einem Wert von 0,705 das günstigste Bestimmtheitsmaß. Die Betrachtung des mittleren absoluten Fehlers (MAE) sowie des mittleren absoluten prozentualen Fehlers (MAPE) ergibt für die Berechnungsergebnisse nach WU (2014) die geringsten Abweichungen zu den Simulationsergebnissen.

7.4 Wahl geeigneter Wartezeitmodelle

Die Ergebnisse in den vorhergehenden Kapiteln zur Analyse der Wartezeitmodelle zeigen, dass beide Verfahren zur Berücksichtigung der Koordinierung in der analytischen Wartezeitschätzung ähnliche Abweichungen zu den empirischen Werten ergaben. Die gemeinsame Betrachtung der Berechnungsergebnisse der analysierten Verfahren gegenüber den empirischen Ergebnissen lässt keine eindeutige Empfehlung für eines der beiden Verfahren zu. Mit dem Verfahren nach WU (2014) werden die empirischen Ergebnisse unterschätzt und mit dem

Verfahren nach HBS 2015 überschätzt. Der Vergleich der berechneten Werte mit den Simulationsergebnissen ergab für beide Verfahren eine Unterschätzung der Simulationsergebnisse. Die niedrigsten Abweichungen wurden für das Verfahren nach WU (2014) festgestellt. Im Vergleich zu den Abweichungen der Berechnungsergebnisse von den empirischen Ergebnissen sind die Abweichungen der Verfahren jedoch deutlich größer. Für die Fälle mit Überlastungserscheinungen in den empirischen Ergebnissen konnten mit keinem Verfahren zutreffende Ergebnisse ermittelt werden. Für sehr gut koordiniert gesteuerte Straßenzüge mit geringem Anteil an Verkehr aus den Nebenrichtungen im Vergleich zur Hauptrichtung liefert das Verfahren nach HBS 2015 unrealistische Wartezeiten (vgl. Kapitel 7.2, Straßenzug Eiffestraße).

Das Verfahren nach HBS 2015 ist im Vergleich zum Verfahren nach WU (2014) aufgrund der deutlich weniger komplexen Ermittlung der Progressionsfaktoren besser für die Anwendung in standardisierten Bemessungsverfahren geeignet. Mit dem Verfahren nach HBS ergeben sich jedoch zum Teil unrealistische Wartezeitschätzungen, die nicht wie in anderen Fällen auf die Abweichungen zwischen tatsächlicher und rechnerischer Kapazität der Zufahrten zurückzuführen sind. Die ermittelte Wartezeit entspricht bei Koordinierungen mit guter Versatzzzeitabstimmung und geringem Verkehrsaufkommen aus den Nebenstraßen der Reststauwartezeit. Die Grundwartezeit reduziert sich mit dem Verfahren nach HBS 2015 auf null. In der Analyse der Berechnungsmodelle zeigte sich dieses Modellverhalten am Beispiel der Eiffestraße in Hamburg. Für zukünftige Weiterentwicklungen der Bemessungsverfahren kann folglich die Verwendung des Verfahrens nach WU (2014) in Betracht gezogen werden. Das Verfahren nach WU (2014) bietet im Gegensatz zum Verfahren nach HBS 2015 zudem die Möglichkeit, die Fortpflanzung der Koordinierungseffekte über mehrere LSA hinweg zu berücksichtigen.

8 Wartezeitmodelle für Einzelknotenpunkte mit verkehrsabhängiger Steuerung

8.1 Methodik

Die Analyse der Modelle zur Ermittlung der Wartezeiten an Einzelknotenpunkten mit verkehrsabhängiger LSA-Steuerung umfasst das Verfahren aus dem HCM 2000 (TRB, 2000) sowie eine Variante dieses Verfahrens mit veränderter Ermittlung des Faktors K zur Korrektur der Grundwartezeit $t_{W,G}$ nach NEWELL (1969). Die Berechnungen beruhen auf den gemessenen Verkehrsstärken und Signalzeiten. Zum Vergleich mit den Verfahren für verkehrsabhängige Steuerung wurden auch die Wartezeiten nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) für Festzeitsteuerungen, auf dem die Ansätze zur Behandlung verkehrsabhängiger Steuerungen basieren, ermittelt und den Messwerten gegenübergestellt.

Die Berechnungen für die Untersuchungsobjekte werden nachfolgend am Beispiel des Knotenpunkts B 83/Nürnberger Straße in Kassel dargestellt. Analog zu den empirischen Erhebungen wurden die Berechnungen für Stunden-Intervalle durchgeführt. Bei der Ermittlung der Zeitbedarfswerte wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen für andere Knotenpunkte keine ortsspezifischen Faktoren berücksichtigt. Die Übereinstimmung der gemessenen Wartezeiten mit den analytisch ermittelten Werten wurde mit Regressionsanalysen geprüft. Die Verlustzeiten aus Kapitel 5 enthalten im Vergleich zu den Wartezeiten nach HBS (FGSV, 2015b) aufgrund der verwendeten Messmethodik zusätzliche Verlustzeitanteile, die durch die Beschleunigung der Fahrzeuge hinter den Haltlinien entstehen. Analog zum Vorgehen bei der Analyse der Wartezeiten an koordiniert festzeitgesteuerten Knotenpunkten wurden daher für die Regressionsanalysen von den an verkehrsabhängig gesteuerten Einzelknotenpunkten gemessenen Verlustzeiten aus Kapitel 5 pauschal jeweils 2 s abgezogen.

8.2 Vergleich der analytisch ermittelten Wartezeiten mit den Messwerten

Zunächst wurde die Übereinstimmung zwischen den mit dem Verfahren nach HBS 2015 für Knoten-

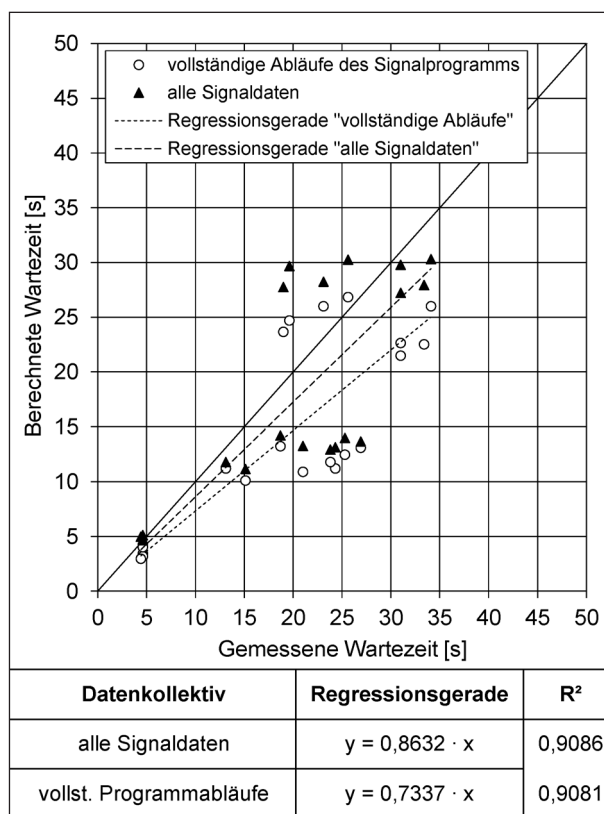


Bild 8-1: Gegenüberstellung der Wartezeiten aus den Fahrzeiterhebungen und den berechneten Wartezeiten für Festzeitsteuerungen nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) am Beispiel des Knotenpunkts B 83/Nürnberger Straße in Kassel

punkte mit Festzeitsteuerung ermittelten Wartezeiten und den gemessenen Wartezeiten analysiert. Bild 8-1 zeigt die Ergebnisse der Regressionsanalyse auf der Grundlage der mittleren Signalzeiten aller protokollierten Signalzeiten sowie der mittleren Signalzeiten aus den vollständigen Abläufen des Signalprogramms mit Freigabe aller Signalgruppen innerhalb der Umläufe.

Die Regressionsparameter für den Fall mit den mittleren Signalzeiten aus allen aufgezeichneten Signalzeiten zeigen eine höhere Übereinstimmung der berechneten Werte mit den empirischen Daten als im Vergleichsfall mit Filterung der Daten nach vollständigen Programmabläufen. Die Bestimmtheitsmaße sind für beide Ansätze mit rund 0,9 sehr hoch, sodass die resultierende Regressionsgerade die Punkte sehr gut repräsentiert.

Die Verfahren aus dem HCM 2000 sowie nach NEWELL (1969) für verkehrsabhängige Steuerungen berücksichtigen die Steuerungsart bei der Berechnung der Wartezeit über den Faktor K , der zum Wert 1 addiert und mit der Grundwartezeit multipliziert wird. Die Verfahren unterscheiden sich hin-

sichtlich der Ermittlung des Faktors K. Im Verfahren von NEWELL wird der Faktor durch den Quotient der Varianz der Sperrzeit und des Quadrats der mittleren Sperrzeit nach Gleichung (2-34) ermittelt.

Die mittleren Sperrzeiten und deren Varianzen wurden aus den aufgezeichneten Signalzeiten berechnet. Das Verfahren nach HCM 2000 sieht die Ermittlung des Faktors K in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der Zufahrt bzw. des signalisierten Verkehrsstroms nach Gleichung (2-33) vor. In Bild 8-2 sind die mit den beiden Verfahren ermittelten Wartezeiten den empirisch ermittelten Wartezeiten gegenübergestellt. Im Vergleich zu den Werten in Bild 8-1 liegen die berechneten Wartezeiten deutlich höher. Insbesondere die Wartezeiten der Nebenrichtung werden nicht zutreffend abgebildet. Für den Linksabbiegestrom aus der Nebenrichtung ergeben sich zu hohe Werte, für den Rechtsabbiegestrom der Nebenrichtung werden die Werte hingegen mit beiden Ansätzen um ca. 10 bis 15 s unterschätzt. Gegenüber den Regressionsparametern in Bild 8-1 liegen die Steigungsparameter der Regressionsgeraden in beiden Verfahren zur Berücksichtigung der verkehrsabhängigen Steuerung näher am Wert 1,0. Die Bestimmtheitsmaße R^2 aus der Regressionsanalyse der beiden Verfahren bleiben im Vergleich zum Verfahren nach HBS 2015 für Knotenpunkte mit festzeitgesteuerten LSA nahezu unverändert.

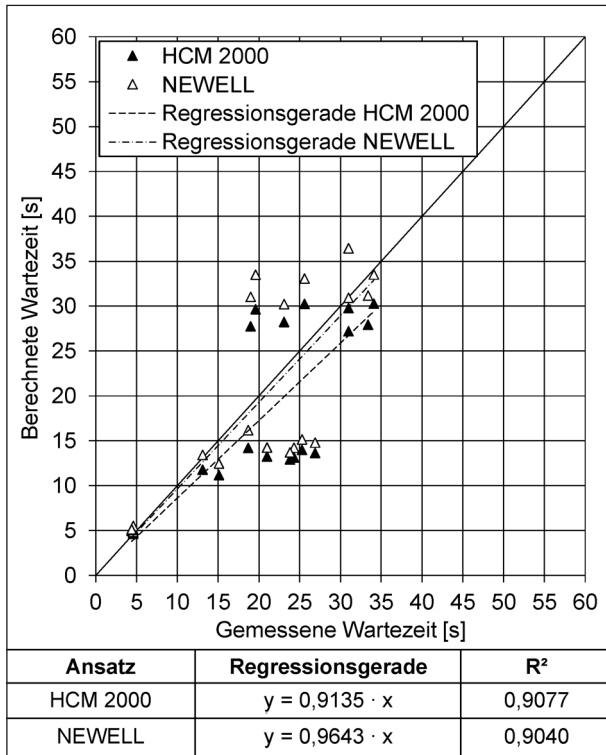


Bild 8-2: Gegenüberstellung der Wartezeiten aus den Fahrzeiterhebungen und den berechneten Wartezeiten mit dem Verfahren nach HCM 2000 (TRB, 2000) und dem Verfahren nach NEWELL (1969) am Beispiel des Knotenpunkts B 83/Nürnberger Straße in Kassel (für alle aufgezeichneten Signaldaten)

Die Diagramme in Bild 8-3 zeigen die analytisch ermittelten Wartezeiten aller untersuchten Verkehrsströme der Knotenpunkte mit verkehrsabhängiger LSA-Steuerung im Vergleich zu den empirischen Werten für vollständige Abläufe der Signalprogramme. Die zugrundeliegenden Signalzeiten wurden aus den protokollierten Daten der Steuergeräte

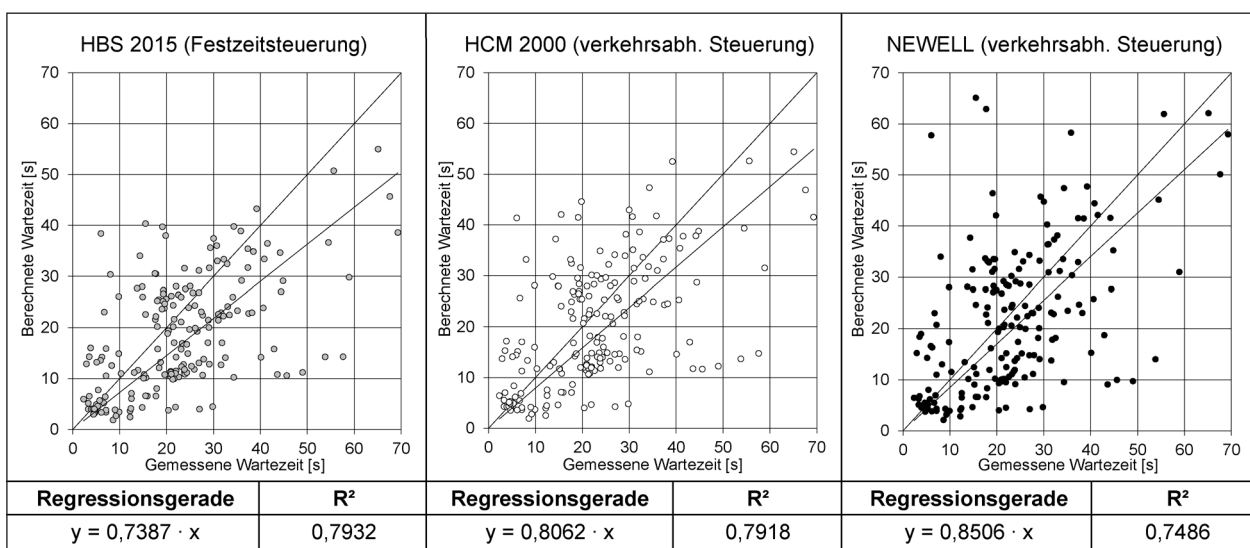


Bild 8-3: Gegenüberstellung der Wartezeiten aus den Fahrzeiterhebungen und den berechneten Wartezeiten mit dem Verfahren nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) für Festzeitsteuerung sowie den Verfahren nach HCM 2000 (TRB, 2000) und nach NEWELL (1969) für verkehrsabhängige Steuerungen (für vollständige Abläufe der Signalprogramme)

ermittelt. Die beste Übereinstimmung zeigen die mit dem Verfahren von NEWELL (1969) ermittelten Werte. Die Verfahren nach HCM 2000 und insbesondere nach HBS 2015 liefern im Vergleich dazu im Mittel niedrigere Wartezeiten. Mit dem Verfahren nach NEWELL (1969) streuen die Werte jedoch etwas stärker als die der beiden anderen Verfahren.

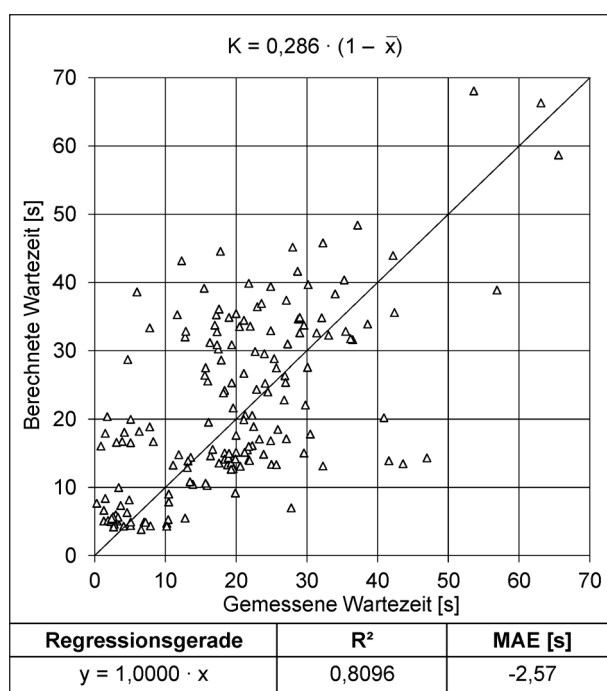


Bild 8-4: Gegenüberstellung der Wartezeiten aus den Fahrzeiterhebungen und den berechneten Wartezeiten mit dem Verfahren nach HCM 2000 (TRB, 2000) und dem optimierten Parameter in Gleichung (2-33) (für alle Signaldaten)

Die Ergebnisse in den Diagrammen in Bild 8-5 wurden mit den Signalzeiten aus allen aufgezeichneten Signaldaten ermittelt. Im Vergleich zu den Diagrammen in Bild 8-3 ist eine geringere Streuung der berechneten Wartezeiten zu erkennen, insbesondere für die Ergebnisse nach NEWELL (1969). In dem Verfahren nach NEWELL (1969) sind nicht nur die Wartezeiten von den Signalzeiten aus den Protokollen der Steuergeräte abhängig, sondern auch der Faktor K. Daraus erklärt sich die geringere Streuung der berechneten Werte nach NEWELL (1969) in Bild 8-5 im Vergleich zu den Werten in Bild 8-3.

In Gleichung (2-33) zur Bestimmung des Faktors K nach HCM 2000 ist eine Konstante enthalten, mit dem der Term $(1 - \bar{x})$ multipliziert wird. Die Konstante hat im HCM 2000 den Wert 0,08. Mithilfe der Solver-Funktion in MS-Excel wurde die Konstante in der Gleichung dahingehend optimiert, dass der Steigungsparameter der Regressionsgeraden den Wert 1,0 annimmt. Die Optimierung ergab einen Wert von 0,286. In Bild 8-4 ist das Optimierungsergebnis dargestellt. Mit dem optimierten Parameter ergibt sich eine mittlere Restabweichung von 2,57 s zwischen den analytisch ermittelten und den gemessenen Wartezeiten. Für die Verwendung in Gleichung (2-33) wird der Wert auf 0,3 gerundet.

Neben dem Faktor K zur Korrektur der Grundwartezeit wird im HCM 2000 ein weiterer Parameter zur Korrektur der Reststauwartezeit verwendet. Der Faktor ist abhängig von der Abbruchzeitlücke

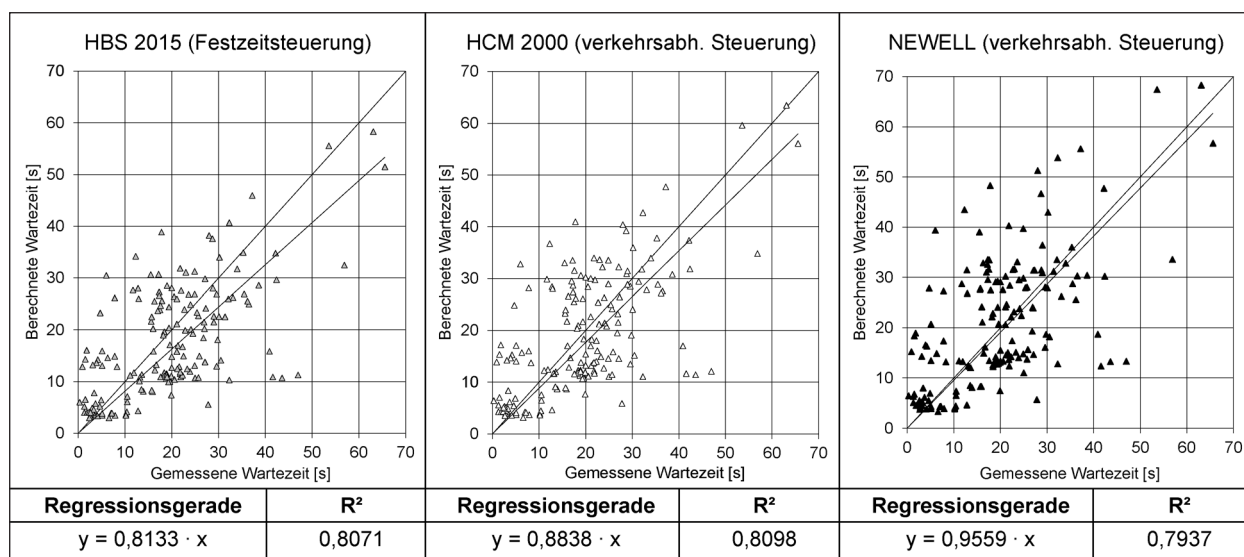


Bild 8-5: Gegenüberstellung der Wartezeiten aus den Fahrzeiterhebungen und den berechneten Wartezeiten mit dem Verfahren nach HBS 2015 (FGSV, 2015b) für Festzeitsteuerung sowie mit den Verfahren nach HCM 2000 (TRB, 2000) und nach NEWELL (1969) für verkehrsabhängige Steuerungen (für alle Signaldaten)

und dem Auslastungsgrad der Signalgruppe. Mit dem Faktor wird die Reststauwartezeit bei verkehrsbahngängigen Steuerungen ab einem Auslastungsgrad von 0,5 und einer Abbruchzeitlücke von 2,0 bis 5,0 s gegenüber der Reststauwartezeit für Festzeitsteuerungen abgemindert. Mit zunehmendem Auslastungsgrad und zunehmender Abbruchzeitlücke wird die Abminderung durch den Faktor geringer. In den beobachteten Werten in Bild 8-4 sind die Abweichungen zwischen den gemessenen Wartezeiten und den berechneten auch im Bereich hoher Wartezeiten relativ gering. Daher wird in der vorliegenden Untersuchung auf einen weiteren Korrekturfaktor zur Abminderung der Reststauwartezeit verzichtet.

8.3 Vergleich der analytisch ermittelten Wartezeiten mit den Simulationsergebnissen

Für den Vergleich der analytisch ermittelten Wartezeiten mit den Simulationsergebnissen wurden alle Ergebnisse der einzelnen Simulationsmodelle gemeinsam betrachtet. Dabei wurden zunächst solche Ergebnisse entfernt, die nicht verwertbar waren. Dazu zählen Werte, die z. B. durch Überstauung von Abbiegefahrstreifen zustande kamen. Trotz sorgfältiger Festlegung der Eingangsverkehrsstärken für die Simulationen ließen sich diese Erscheinungen nicht vollständig ausschließen. Bei den aussortierten Werten handelt es sich hauptsächlich um Werte von Relationen, die auch bereits in den empirischen Ergebnissen auffallend hohe Werte selbst mit geringerer Verkehrsstärke auf-

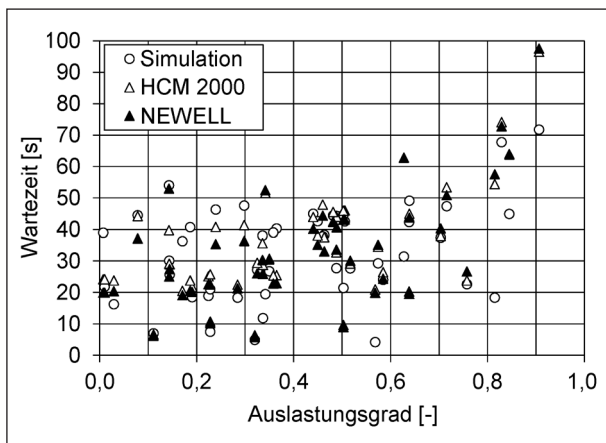


Bild 8-6: Wartezeiten aus der Simulation ohne Ausreißerwerte sowie analytisch ermittelte Wartezeiten nach HCM 2000 (TRB, 2000) und NEWELL (1969) in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad

wiesen. In Bild 8-6 sind die Wartezeiten aus den Simulationen im Vergleich zu den analytisch ermittelten Wartezeiten nach HCM 2000 mit dem optimierten Parameter zur Ermittlung von K aus Kapitel 8.2 sowie nach NEWELL (1969) in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad dargestellt. Bild 8-7 zeigt den Vergleich der simulierten mit den analytisch berechneten Wartezeiten. Im Diagramm ist zu erkennen, dass sich für beide Verfahren Regressionsgeraden mit einem Steigungsparameter nahe am Idealwert von 1,0 ergeben. Mit dem Verfahren nach HCM 2000 in Verbindung mit dem optimierten Parameter in Gleichung (2-33) zur Bestimmung des Faktors K werden die gemessenen Wartezeiten geringfügig überschätzt werden.

Die Abweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Wartezeiten entstehen bei niedrigen Auslastungsgraden kleiner 0,5 durch die höheren Verkehrsstärken in der Simulation im Vergleich zu den in Kapitel 8.2 analysierten realen Verkehrsstärken. Dadurch können zusätzliche Verlustzeiten beispielsweise durch kurzzeitige Blockiereffekte der Geradeausfahrer durch Überstauungen von Abbiegefahrstreifen in den Simulationen nicht immer vermieden werden. Demzu-

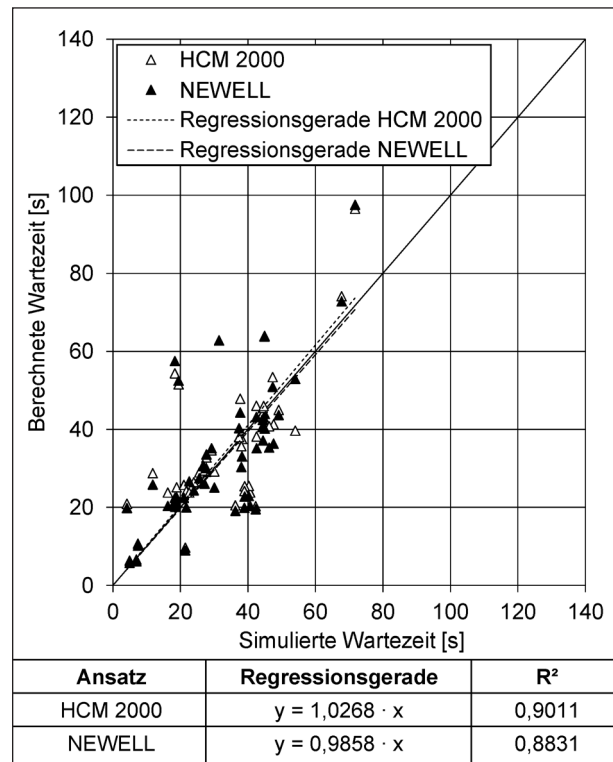


Bild 8-7: Vergleich der Wartezeiten aus der Simulation ohne Ausreißerwerte mit den analytisch ermittelten Wartezeiten nach HCM 2000 (TRB, 2000) sowie nach NEWELL (1969)

folge kann der Auslastungsgrad in solchen Fällen nicht zutreffend ermittelt werden. Jedoch zeigen die Ergebnisse auch bei höheren Auslastungsgraden nicht durchgehend höhere rechnerische Wartezeiten im Vergleich zu den gemessenen Werten. In diesem Bereich ist davon auszugehen, dass die Reststauwartezeit einen zunehmenden Einfluss auf die Höhe der gesamten Wartezeit hat. Eine zusätzliche Abminderung der Reststauwartezeit, wie im HCM 2000 enthalten, erscheint daher auch in Verbindung mit den Simulationsergebnissen dieser Untersuchung nicht sinnvoll.

8.4 Wahl geeigneter Wartezeitmodelle

Die Analyse der Verfahren aus dem HCM 2000 und nach NEWELL (1969) hat ergeben, dass sich beide Verfahren gleichermaßen eignen, um die Wartezeiten an den untersuchten Knotenpunkten mit verkehrsabhängiger LSA-Steuerung zu schätzen. Sämtliche Signalzeiten für die Berechnungen wurden aus den Daten der Steuergeräte ermittelt. In den dargestellten Ergebnissen nach NEWELL (1969) beruhen somit auch die mittleren Sperrzeiten sowie deren Varianz zur Berechnung des Faktors K nach Gleichung (2-34) auf diesen Daten. In WU (2004) wird eine Möglichkeit zur analytischen Schätzung der Varianzen der Sperrzeiten vorgestellt. Jedoch ist das Verfahren im Vergleich zur Ermittlung des Faktors K nach HCM 2000 komplex und daher für die Anwendung in Regelwerken nur eingeschränkt geeignet.

Das Verfahren nach NEWELL (1969) liefert zwar eine bessere Anpassung an die empirischen Wartezeiten gegenüber dem Verfahren aus dem HCM 2000, die Unterschiede sind jedoch verhältnismäßig gering. Daher rechtfertigt der Genauigkeitserfolg nicht die Anwendung des ungleich komplexeren Verfahrens. Das Verfahren aus dem HCM 2000 ist aufgrund der geringen Unterschiede in den Untersuchungsergebnissen und der geringeren Komplexität dem Verfahren nach NEWELL (1969) vorzuziehen.

Anhand der durchgeführten Minimierung der Summe der Fehlerquadrate zwischen den empirisch ermittelten Wartezeiten und den analytisch ermittelten Wartezeiten nach HCM 2000 wurde die Gleichung zur Ermittlung des Faktors K optimiert. Im Ergebnis wurde das Berechnungsmodell zur Schätzung der Wartezeiten an Knotenpunkten mit verkehrsabhängiger Steuerung über die Gleichung

(2-33) folgendermaßen an deutsche Verkehrsverhältnisse angepasst:

$$K_i = 0,3 \cdot (1 - \bar{x}_i) \quad (8-1)$$

mit:

K_i Korrekturfaktor der Grundwartezeit zur Berücksichtigung der verkehrsabhängigen Steuerung [-]

\bar{x}_i Auslastungsgrad an der Signalgruppe i [-]

In der Gleichung (8-1) wurde der Multiplikator des Terms $(1 - \bar{x}_i)$ von 0,08 nach HCM auf den Wert 0,3 erhöht.

Eine Korrektur der Reststauwartezeit an Einzelknotenpunkten mit verkehrsabhängiger Steuerung gegenüber der Festzeitsteuerung ist in Verbindung mit den Ergebnissen aus den Kapiteln 8.2 und 8.3 nicht sinnvoll. Auf einen Korrekturfaktor für die Reststauwartezeit wird daher verzichtet.

Das Verfahren zur Schätzung der Wartezeiten an Knotenpunkten mit verkehrsabhängiger LSA-Steuerung wurde für die Anwendung im HBS richtlinienkonform aufbereitet. Das aufbereitete Verfahren ist in Anhang D enthalten.

9 Validierung und Überprüfung der Praxistauglichkeit des Verfahrens

9.1 Vorbemerkung

Die in Kapitel 7 und 1 gewählten Bemessungsverfahren wurden auf der Grundlage von theoretischen Überlegungen und Messungen von Kenngrößen an realen Untersuchungsobjekten entwickelt. Die Bemessungsverfahren wurden anschließend in Simulationsstudien an unabhängig von der Kalibrierung der Verfahren erstellten Objekten aus der Praxis validiert. Die Validierung basiert dabei auf Simulationsmodellen realer Knotenpunkte bzw. Straßenzügen mit koordiniert gesteuerten Knotenpunkten. Die Praxisbeispiele und deren Simulationsmodelle mussten jedoch für die Untersuchung aufbereitet und teilweise vereinfacht werden. Die Simulationsmodelle wurden in erster Linie für die Analyse von besonderen verkehrlichen Situationen angefertigt, deren Verkehrsabläufe nicht nach den Regelwerken bewertet werden konnten. Daher mussten teil-

weise auch die Signalprogramme der einzelnen Praxisbeispiele vereinfacht werden. Insbesondere innerorts existieren nur wenige Straßenzüge, deren Knotenpunkte durchgängig über festzeitgesteuerte Signalprogramme betrieben werden. Häufig sind nicht zuletzt aufgrund einer ÖPNV-Beschleunigung verkehrsabhängige Elemente auch bei koordiniert gesteuerten Straßenzügen vorhanden. Zudem wurden vorhandene Verkehrsarten wie Fußgänger, Radfahrer, Busse und Straßenbahnen aus den Modellen entfernt.

Insgesamt wurden sechs Straßenzüge mit mindestens drei koordinierten LSA mit Festzeitsteuerung sowie sechs Einzelknotenpunkte mit verkehrsabhängiger LSA-Steuerung betrachtet. Die Berechnungsverfahren wurden mit verschiedenen, von den realen Belastungen abweichenden Belastungsszenarien mittels der gewählten Beispiele überprüft. Da die verkehrliche Situation der Praxisbeispiele mit der realen Situation vor Ort damit nur noch zum Teil übereinstimmt, wird im Folgenden auf eine Nennung der Örtlichkeiten der Praxisbeispiele verzichtet.

9.2 Methodik

Die Untersuchungsobjekte wurden mit der Simulationssoftware VISSIM (Version 7.00-04) nachgebildet. Mithilfe des Zusatzmoduls VAP (Verkehrsabhängige Programmierung) wurden in VISSIM die verkehrsabhängigen Signalsteuerungen simuliert. Die Durchführung der Simulationsuntersuchung erfolgte unter Berücksichtigung der Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation der FGSV (2006). Eine gesonderte Kalibrierung der Simulationsmodelle für die Untersuchungsobjekte war nicht notwendig, da diese bereits für die jeweiligen verkehrstechnischen Untersuchungen durchgeführt wurde. Die Planungsunterlagen (Lageplan, Signalprogramm, Zwischenzeitenmatrix etc.) lagen für die Untersuchungsobjekte vor.

Für die koordiniert festzeitgesteuerten Knotenpunktzufahrten der sechs Straßenzüge sowie für die Zufahrten der sechs Einzelknotenpunkte mit verkehrsabhängiger Steuerung wurden die Wartezeiten mit den in Kapitel 7 gewählten Berechnungsverfahren ermittelt. Die Berechnung wurde jeweils für die drei nachfolgend beschriebenen Belastungsszenarien vorgenommen. Zur Validierung der Ergebnisse des Berechnungsverfahrens wurde mithilfe der Simulationsmodelle die Kenngröße „mittlere

Verlustzeit“ verwendet. In der Simulation entspricht diese Kenngröße der Differenz zwischen der tatsächlichen Überfahrzeit an einem Knotenpunkt und der Fahrtzeit, die bei freier Fahrt ohne die Beeinflussung durch die LSA und andere Fahrzeuge möglich ist. In den nachfolgenden Kapiteln wurde die Verlustzeit aus der Simulation als „Wartezeit“ bezeichnet, um den Vergleich zwischen der „berechneten Wartezeit“ und der „simulierten Wartezeit“ darstellen zu können. Die Messquerschnitte wurden so positioniert, dass Anfahrzeitverluste infolge der Beschleunigung hinter der Haltlinien nicht in die Messung einfließen. Den Ergebnissen liegen jeweils zehn Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen zugrunde. Die Verkehrsstärken wurden in einem Intervall von einer Stunde betrachtet. Die Dauer eines Simulationslaufs betrug zwei Stunden. Davon entfällt eine Stunde auf die Simulation des Verkehrszustandes des betrachteten Szenarios. Als Vorlauf- und Nachlaufzeit wurde jeweils eine halbe Stunde verwendet. Den Ergebnissen aus der Simulation liegt jeweils ein einheitlicher Parametersatz zugrunde.

Die Anzahl von zehn Simulationsläufen ist bis zu einer Auslastung von 80 bis 85 % in der Regel ausreichend, um einen gesicherten Mittelwert im Rahmen gewisser Toleranzen zu erhalten. Für mehr als 85 % Auslastung und insbesondere für Auslastungsgrade um 100 % ist eine deutlich höhere Zahl an Simulationsläufen erforderlich. Hier kann die notwendige Anzahl an Simulationsläufen aufgrund der extremen Streuung der Wartezeiten bei deutlich über 100 Läufen liegen. Daher sind die simulierten Werte für die Wartezeit für Auslastungsgrade über 85 % nur als Näherungswerte anzusehen. Da allerdings die Einsatzbereiche der Koordinierung bei Auslastungsgraden unterhalb von 85 % liegen, wurde auf eine größere Anzahl von Simulationsläufen verzichtet.

Die sechs Streckenzüge und die sechs Einzelknotenpunkte wurden mit drei unterschiedlichen Verkehrsbelastungsszenarien analysiert. Folgende Belastungsszenarien wurden hierzu für die koordiniert gesteuerten Straßenzüge unterschieden:

- Szenario 1
Tatsächlich vorhandene Verkehrsbelastung in der Spitzenstunde,
- Szenario 2
Erhöhung der Verkehrsbelastungen, bis die Kapazität des betrachteten Knotenpunktes

erreicht oder überschritten ist (meist 140 bis 160 % der Verkehrsbelastungen aus Szenario 1),

- Szenario 3
Reduzierung der Verkehrsbelastungen aus Szenario 2 um 20 %, sodass eine Auslastung von maximal rund 80 % für den betrachteten Verkehrsstrom erreicht wird.

Für die verkehrabhängigen Einzelknotenpunkte wurden folgende Belastungsszenarien unterschieden:

- Szenario 1
Tatsächlich vorhandene Verkehrsbelastung in der Spitzenstunde,
- Szenario 2
Erhöhung der Verkehrsbelastungen, bis die Kapazität des betrachteten Knotenpunktes erreicht oder die Fahrstreifen überstaut sind (meist 110 bis 120 % der Verkehrsbelastungen aus Szenario 1, mit Ausnahme von Modell Nr. 5, bei dem die Verkehrsbelastung in Szenario 1 schon an der Kapazitätsgrenze liegt),
- Szenario 3
Reduzierung der Verkehrsbelastungen aus Szenario 1 um 20 %, sodass eine Auslastung von maximal rund 80 % für den betrachteten Verkehrsstrom erreicht wird.

9.3 Zusammenfassende Beurteilung

9.3.1 Koordinierte Festzeitsteuerungen

Die Beschreibung der Simulationsmodelle und die vollständigen Simulationsergebnisse sind im Anhang B enthalten. Für die sechs untersuchten Modelle sind jeweils der Streckenverlauf, das Grünband und die Lagepläne der LSA dargestellt. Die Auswertungen der Ergebnisse aus der Simulation wurden je Fahrtrichtung und Szenario vorgenommen.

In der folgenden zusammenfassenden Beurteilung der Übereinstimmung zwischen den simulierten und berechneten Wartezeiten werden nur die „gültigen“ Ergebnisse der drei Szenarien dargestellt. Dabei wurden z. B. die freien Rechtsabbieger und Verkehrsströme mit einem hohen Auslastungsgrad (größer 85 %) bei der Auswertung nicht betrachtet. Werden alle Simulationsergebnisse betrachtet, sind die simulierten Wartezeiten häufig deutlich höher als die berechneten Wartezeiten. Dies liegt an den

hoch ausgelasteten oder überlasteten Zufahrten, die meist im Szenario 2 oder teilweise auch im Szenario 3 vorzufinden sind. Dabei kann häufig ein Rückstau bis zum stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt entstehen, sodass nicht die vollständige Freigabezeit genutzt werden kann und die Verkehrsstärke nicht der Kapazität entspricht. Gleichzeitig konnte die vollständige Verlustzeit in der Simulation auch dann nicht bestimmt werden, wenn der Rückstau über den stromaufwärts liegenden Knotenpunkt hinausreichte.

Das Verfahren zur Berechnung der Wartezeit für koordinierte Verkehrsströme ist bei hohen Auslastungsgraden größer als 85 % nicht geeignet, da hierbei immer ein Rückstau bei Freigabezeitende auftritt, sodass die Koordinierung unterbrochen wird. In diesen Fällen wird empfohlen, das Berechnungsverfahren für Einzelknotenpunkte mit Festzeitsteuerung anzuwenden. Da das Verfahren zur Wartezeitermittlung bei überlasteten Streckenzügen nicht angewendet werden kann, wurden die Ergebnisse gefiltert und in Bild 9-1 nur die „gültigen“ Ergebnisse dargestellt. Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung der simulierten und berechneten Wartezeiten. Die Steigung der Regressionsgerade liegt mit 0,9122 relativ nahe bei 1, das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,8395.

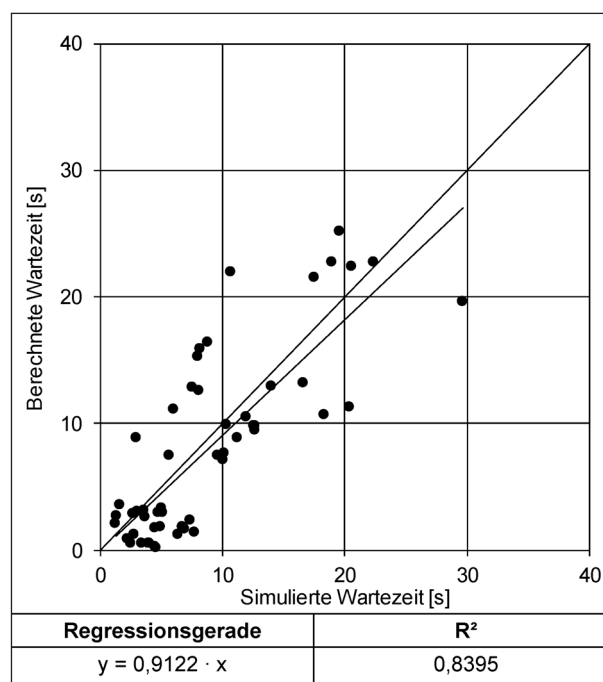


Bild 9-1: Vergleich der simulierten und berechneten Wartezeiten für festzeitgesteuerte Koordinierungen (alle Modelle, nur „gültige“ Ergebnisse)

9.3.2 Verkehrsabhängig gesteuerte Einzelknotenpunkte

Im Anhang C sind die Beschreibungen der Simulationsmodelle und die Simulationsergebnisse enthalten. Für die sechs untersuchten Modelle ist jeweils der Lageplan dargestellt. Die Auswertungen der Simulationsergebnisse wurden je Szenario vorgenommen.

Analog zu den festzeitgesteuerten Koordinierungen werden für die zusammenfassende Beurteilung der Simulationsergebnisse in Bild 9-2 nur die „gültigen“ Ergebnisse betrachtet. Bei dem Vergleich zeigt sich eine insgesamt sehr gute Übereinstimmung der simulierten und berechneten Wartezeiten. Die Steigung der Regressionsgerade weicht nur geringfügig vom Idealwert von 1,0 ab. Das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,9187.

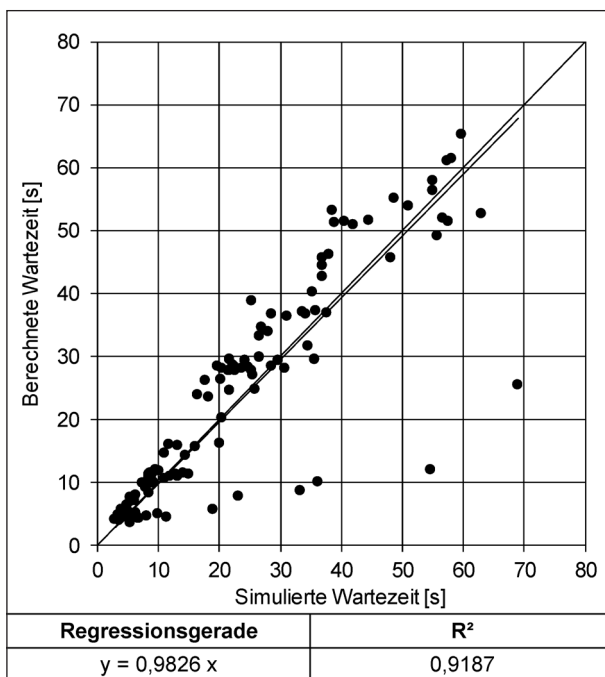


Bild 9-2: Vergleich der simulierten und berechneten Wartezeiten für verkehrsabhängig gesteuerte Einzelknotenpunkte (alle Modelle, nur „gültige“ Ergebnisse)

10 Zusammenfassung und Fazit

In der vorliegenden Untersuchung wurden verschiedene analytische Modelle auf ihre Eignung zur Schätzung der Wartezeit an Knotenpunkten mit koordiniert festzeitgesteuerten LSA sowie verkehrsabhängig gesteuerten LSA an Einzelknotenpunkten analysiert. Dazu wurden umfangreiche empirische Erhebungen an Straßenzügen und Einzelknotenpunkten sowie mikroskopische Verkehrsflusssimulationen durchgeführt. Aus den Erhebungen wurden Kenngrößen zur Bewertung des Verkehrsablaufs ausgewertet und miteinander verglichen. Für Straßenzüge mit koordinierten LSA ist das zugrunde gelegte Bewertungsmaß entscheidend für die Ermittlung der Verkehrsqualität. Zum Teil zeigten sich große Unterschiede in Abhängigkeit vom maßgebenden Bewertungskriterium.

Im HBS 2015 (FGSV, 2015b) wurde erstmals ein Verfahren zur Schätzung der Wartezeit für koordinierte Zufahrten integriert. Das Verfahren beruht größtenteils auf dem Ansatz des HCM 2010 (TRB, 2010). Die in dieser Untersuchung gewonnenen Auswertungsergebnisse an koordiniert festzeitgesteuerten LSA dienen in erster Linie der Kalibrierung und Weiterentwicklung dieses Verfahrens für Verkehrsverhältnisse in Deutschland. Das Verfahren sieht vor, das Modell zur Schätzung der Wartezeiten an Einzelknotenpunkten mit festzeitgesteuerten LSA durch Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Effekte der Koordinierung auf den Verkehrsablauf zu erweitern. Dabei handelt es sich um zwei Faktoren, die in die Gleichung zur Schätzung der Grundwartezeit bzw. in die Gleichung zur Schätzung der Reststauwartezeit integriert werden. In der vorliegenden Untersuchung wurden zwei Ansätze zur Ermittlung der Faktoren bewertet. Zum einen der Ansatz aus dem Verfahren nach HCM 2010, der auch im HBS 2015 enthalten ist, und zum anderen der Ansatz nach WU (2014).

Zur Schätzung der Wartezeiten an Einzelknotenpunkten mit verkehrsabhängigen LSA-Steuerungsverfahren existieren verschiedene Ansätze. Grundlage der Verfahren ist stets die Kenntnis von mittleren Signalzeiten der Steuerung des Knotenpunkts. Diese wurden in der vorliegenden Untersuchung aus Mitschriften der Daten der Steuergeräte oder durch eigene Auswertungen der Signalzeiten gewonnen. In Verbindung mit den Ergebnissen der empirischen Erhebungen wurden die mittleren Signalzeiten für die Analyse von Modellen zur Schät-

zung der Wartezeiten genutzt. Untersucht wurden das Verfahren aus dem HCM 2000 (TRB, 2000), welches in komplexerer Form auch im HCM 2010 enthalten ist, und das Verfahren nach NEWELL (1969) in Kombination mit einer Erweiterung nach WU (2004). Analog zur Berücksichtigung der Koordinierungseffekte wird auch bei der Analyse von verkehrsabhängigen LSA-Steuerungen die Wartezeit bei einer festzeitgesteuerten LSA als Referenzgröße verwendet und durch Faktoren zur Berücksichtigung der Steuerungsart angepasst.

Die mit den genannten Ansätzen erhaltenen analytischen Ergebnisse wurden zunächst mit Ergebnissen einfacher fiktiver Simulationsmodelle verglichen. Damit konnte zum einen die prinzipielle Eignung der Verfahren, insbesondere der beiden bisher nur als theoretische Herleitung vorliegenden Ansätze nach WU (2014, 2004), unter Laborbedingungen nachgewiesen werden. Zum anderen wurden die Simulationsmodelle genutzt, um Anpassungsmöglichkeiten der Variablen in den Ansätzen zu testen. Hierbei zeigte sich an Einzelknotenpunkten mit verkehrsabhängiger LSA-Steuerung, dass die vollverkehrsabhängige „Alles-Rot“-Steuerung gegenüber der Steuerung mit Freigabezeitverlängerung innerhalb eines Rahmenplans bessere Anpassungen der analytischen Werte an die Simulationsergebnisse durch die Optimierung der Variablen zulässt. Das Verfahren nach HCM 2010 zur Schätzung der Wartezeiten an koordinierten Zufahrten erwies sich dabei unter Laborbedingungen ohne weitere Anpassung als gut geeignet.

Anschließend wurden die Wartezeiten für alle Untersuchungsobjekte analytisch ermittelt und den Ergebnissen der Messungen und der Simulationen gegenübergestellt. Der Vergleich der analytischen und empirischen Werte für koordinierte Steuerungen ergab, dass sowohl das Verfahren nach HCM 2010 als auch der Ansatz nach WU (2014) geeignete Schätzungen der Wartezeiten erlauben. Die Ergebnisse streuen aufgrund stochastischer Einflüsse jedoch stark. Das Verfahren nach HCM 2010 weist Defizite bei der Schätzung der Wartezeiten an gut koordinierten Zufahrten mit geringen Verkehrsstärken in den Nebenzufahrten im Vergleich zur Verkehrsstärke der Hauptrichtungen auf. Für diese Konstellation ergibt das Verfahren eine Grundwartezeit von $t_{W,G} = 0$ s. Dieses Ergebnis entspricht aufgrund der Einflüsse der Pulkauflösung zwischen koordiniert gesteuerten Knotenpunkten jedoch nur selten der Realität. Im Verfahren nach HCM 2010

wird bei der Ermittlung des Progressionsfaktors zur Berücksichtigung der Koordinierungseffekte auf die Grundwartezeit von einer gleichbleibenden Abflussverkehrsstärke während der Freigabezeit ausgegangen. Die Abflussverkehrsstärke entspricht der Sättigungsverkehrsstärke. Im Verfahren nach WU (2014) hingegen wird berücksichtigt, dass nicht der gesamte Verkehrsstrom während der Freigabezeit mit Sättigungsverkehrsstärke abfließt. Damit können die Einflüsse der Pulkauflösung zwischen den LSA realistischer nachgebildet werden. Das Verfahren nach WU (2014) ermöglicht zudem, die Fortpflanzung der Einflüsse der Pulkbildung über mehrere benachbarte Zufahrten zu berücksichtigen.

Für die betrachteten Einzelknotenpunkte mit verkehrsabhängiger LSA-Steuerung streuen die analytischen Ergebnisse weniger stark und lassen daher aussagekräftigere Vergleiche mit den empirischen Werten zu. Dabei zeigte sich erwartungsgemäß, dass die Reststauwartezeit im Vergleich zur Grundwartezeit an nahezu allen Signalgruppen vernachlässigt werden kann. Die Berücksichtigung eines Korrekturfaktors ist folglich nicht notwendig. Keine gute Übereinstimmung der analytischen Ergebnisse mit den empirischen Wartezeiten ergab sich jedoch für gering ausgelastete Signalgruppen mit Freigabezeitanforderung. Hier erwies sich die Ermittlung der Signalzeiten aus den Daten der Steuergeräte als ungeeignet, da die signalgruppenfeine Auswertung entsprechend hohe Umlaufzeiten infolge langer Sperrzeiten ohne Anforderung ergab. Sofern die Signalzeiten jedoch zutreffend ermittelt wurden, stimmen die analytischen Ergebnisse der beiden untersuchten Verfahren mit den gemessenen Werten überein. Die bessere Schätzung erlaubt das Verfahren nach NEWELL (1969) und WU (2004). Da das Verfahren gegenüber dem Ansatz nach HCM 2000 jedoch deutlich komplexer ist, rechtfertigt der Genauigkeitszugewinn nicht dessen Anwendung in den Richtlinien. Aus diesem Grund wurde der Ansatz nach HCM 2000 weiterverfolgt. Darin erfolgt die Berücksichtigung der verkehrsabhängigen LSA-Steuerung analog zu den Progressionsfaktoren im Verfahren zur Schätzung der Wartezeiten an koordinierten Zufahrten ebenfalls über Korrekturfaktoren. Mit dem Faktor K wird die Grundwartezeit, die nach dem Verfahren für Einzelknotenpunkte mit festzeitgesteuerten LSA ermittelt wird, korrigiert. Durch die Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den analytischen und den empirischen Ergebnissen wurde eine Optimierung

der Konstanten in der Gleichung (2-33) zur Ermittlung des Faktors K durchgeführt. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Optimierung wird eine Erhöhung der Konstante in der Gleichung von 0,08 auf 0,3 vorgeschlagen. Die Ermittlung der Reststauwartezeit für verkehrabhängige LSA-Steuerungen kann nach dem Verfahren für Festzeitsteuerungen erfolgen.

Sofern mit dem Verfahren nach HCM 2000 zur Schätzung der Wartezeiten realistische Signalzeiten verwendet werden, liefert dieser Ansatz geeignete Ergebnisse für die untersuchten Objekte. Zur Schätzung der mittleren Signalzeiten eignet sich z. B. das Verfahren nach AKÇELIK (1994) und WU (2004).

Die gewählten Verfahren wurden an unabhängig erstellten Simulationsmodellen von Anwendungsbeispielen aus der Praxis validiert. Um die Überprüfung der Ergebnisse der Berechnungsmodelle zu ermöglichen, wurden die Simulationsmodelle für die Validierung dahingehend vereinfacht, dass kapazitätsmindernde Einflüsse wie beispielsweise starke Fußgängerströme unberücksichtigt blieben. Die Validierung ergab eine für die praktische Anwendung insgesamt zufriedenstellende Übereinstimmung der geschätzten Wartezeiten mit den Simulationsergebnissen.

Insgesamt hat die Untersuchung gezeigt, dass die Verfahren zur Schätzung der Wartezeiten an Knotenpunkten mit koordinierten Zufahrten nach HCM 2010 (TRB, 2010) und an Einzelknotenpunkten mit verkehrabhängiger LSA-Steuerung nach HCM 2000 (TRB, 2000) prinzipiell auf deutsche Verkehrsverhältnisse übertragbar sind. Das Verfahren nach HCM 2010 zur Schätzung der Wartezeiten für koordinierte Zufahrten ist bereits im HBS 2015 enthalten. Im Gegensatz zum Verfahren nach WU (2014) ist die Ermittlung der Progressionsfaktoren zur Berücksichtigung der Koordinierungseffekte deutlich weniger aufwendig. Für zukünftige Weiterentwicklungen kann jedoch aufgrund der realistischeren Ergebnisse für Straßenzüge mit gut koordinierten LSA auch das Verfahren nach WU zur Ermittlung Progressionsfaktoren in Betracht gezogen werden. Das Verfahren nach WU ermöglicht zudem, die Effekte der Koordinierung über mehrere Knotenpunkte hinweg in die Ermittlung der Wartezeit einzubeziehen.

Die Wartezeitmodelle für koordinierte Zufahrten können auch für die Ermittlung der Wartezeit als Eingangsgröße für einen Performance Index zur

Bewertung von Koordinierungen im Netz eingesetzt werden. Der Performance Index ermöglicht eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Varianten einer Koordinierung, stellt jedoch keine aussagekräftige Qualitätskenngröße dar.

Zur Berücksichtigung der Auswirkungen verkehrabhängiger Steuerungen an Einzelknotenpunkten wird eine Anpassung des Verfahrens aus dem HCM 2000 vorgeschlagen, welche für die Aufnahme in das HBS aufbereitet wurde. Durch die Einbeziehung des Ansatzes zur Bestimmung der Wartezeiten an Knotenpunkten mit verkehrabhängiger LSA-Steuerung, die trotz ihrer weiten Verbreitung in der Praxis im HBS bislang nicht behandelt werden, kann der Anwendungsbereich des HBS-Bemessungsverfahrens erheblich erweitert werden.

11 Literatur

- AKÇELIK, R. (1981): Traffic Signals: Capacity and timing Analysis. Research Report ARR No. 123, ARRB Transport Research Ltd., Vermont South, Australia
- AKÇELIK, R. (1994): Estimation of Green Times and Cycle time for Vehicle-Actuated Signals. Transportation Research Record – Journal of the Transportation Research Board, No. 1457, pp. 63-72
- AKÇELIK, R. (1995): Extension of the Highway Capacity Manual Progression Factor Method for Platooned Arrivals. Research Report ARR No. 276, ARRB Transport Research Ltd., Vermont South, Australia
- AKÇELIK, R.; CHUNG, E (1995): Calibration of Performance Models for Traditional Vehicle-Actuated and Fixed-Time Signals. Working Paper WD TO95/013, ARRB Transport Research Ltd., Vermont South, Australia
- AKÇELIK, R.; ROUPHAIL, N. (1993): Estimation of Delays at Traffic Signals for Variable Demand Conditions. Transportation Research B, Vol. 27(2), pp. 109-131
- AKÇELIK, R.; ROUPHAIL, N. (1994): Overflow Queues and Delays with Random and Platoon Arrivals at Signalized Intersections. Journal of Advanced Transportation, Vol. 28, No. 3, pp. 227-251

- ALLSOP, R. E. (1971): Delay-minimising settings for fixed-time traffic signals at a single road junction. *Journal of the Institute for Mathematics and its Applications*, Vol. 8, No. 2, pp. 164-185
- ANON (1988): Research of signal control methods on main roads (in Japanese). Japan Management Technology Association, Tokyo
- BELL, M. C.; BRETHERTON, R. D. (1986): Ageing of fixed-time traffic signal plans. *Proceedings of the 2nd International Conference on Road Traffic Control*, Institution of Electrical Engineers, London
- BELL, M. G. H.; BROOKES, D. (1993): Discrete Time-Adaptive Traffic Signal Control. *Transportation Research C*, Vol. 1, No. 1, pp. 43-55
- BOLTZE, M.; BUSCH, F.; FRIEDRICH, B.; FRIEDRICH, M.; KOHOUTEK, S.; LÖHNER, H.; LÜSSMANN, J.; OTTERSTÄTTER, T. (2011a): AMONES: Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen. *Straßenverkehrstechnik*, Heft 5-7/2011, Kirschbaum-Verlag, Bonn
- BOLTZE, M.; WOLFERMANN, A. (2011b): Der Einfluss von Zwischenzeiten auf die Kapazität von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage. *Straßenverkehrstechnik*, Heft 11/2011, Kirschbaum-Verlag, Bonn
- BRAUN, R.; KEMPER, C.; WEICHENMEIER, F.; MENIG, C.; WEGMANN, J. (2008): Travolution – Comparing Different Adaptive Traffic Signal Control Optimization Methods – Field Test Results. 15th World Congress on ITS, New York City
- BRILON, W.; HOHMANN, S.; GIULIANI, S.; WIETHOLT, T. (2013): Verkehrsadaptive Netzsteuerungen – Untersuchung ihrer Einflussmöglichkeiten auf die Emissions- und Immissionsbelastung städtischer Straßennetze. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Heft V 230, Bergisch Gladbach
- BRILON, W.; GROSSMANN, M.; BLANKE, H. (1996): Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs auf Straßen. *Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 669, Bonn
- BRILON, W.; REICHARDT, G.; WESTPHAL, S.; WU, N. (1997): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Schlussbericht zu FE 02.171 R96A im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum
- BRILON, W.; SCHNABEL, W. (2003): Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen. *Straßenverkehrstechnik*, Heft 01/2003, Kirschbaum-Verlag, Bonn
- BRILON, W.; WU, N. (1990): Delays at fixed-time traffic signal under time-dependent traffic conditions. *Traffic Engineering and Control*, Dec. 1990, Hemming Group Ltd., London
- BRILON, W.; WU, N.; WIETHOLT, T. (2007): Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen: Abgrenzung von Einsatzbereichen von Grünen Wellen einerseits und verkehrsabhängiger Steuerung andererseits sowie Ableitung der zweckmäßigen Einsatzkriterien. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Heft V 163, Bergisch Gladbach
- BROOKES, D.; BELL, M.G. (1991): Expected Delays and Stop Calculation for Discrete Adaptive Traffic Signal Control. *Proceedings of the 1st International Symposium on Highway Capacity*, Karlsruhe
- COHEN, S. L. (1983): Concurrent use of MAXBAND and TRANSYT signal timing programs for arterial signal optimization. *Transportation Research Record*, Journal of the Transportation Research Board, No. 906, pp. 81-84
- COURAGE, K. G.; WALLACE, C. E.; ALQASEM, R. (1988): Modeling the Effect of Traffic Signal Progression on Delay. *Transportation Research Record*, Journal of the Transportation Research Board, No. 1194, pp. 139-146
- COURAGE, K.; FAMBRO, D. B.; AKÇELIK, R.; LIN, P.; ANWAR, M.; VILORIA, F. (1996): Capacity Analysis of Traffic-Actuated Intersection. Final Report, NCHRP Project 3-48, Transportation Research Board, Washington D.C.
- COWAN, R. (1978): An Improved Model for Signalized Intersection with Vehicle-Actuated Control. *Journal of Applied Probability*, 15, pp. 384-396

- FAMBRO, D. B.; CHANG, E. C. P.; MESSER, C. J. (1991): Effects of the Quality of Traffic Signal Progression on Delay. Final Report, NCHRP Project-339, Transportation Research Board, Washington D.C.
- Federal Highway Administration (1985): Traffic Control Systems Handbook. Report FHWA-IP-85-11, US Department of Transportation, Washington D.C.
- FGSV (2001): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln
- FGSV (2006): Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation – Grundlagen und Anwendung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln
- FGSV (2012): Begriffsbestimmungen: Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln
- FGSV (2015a): Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr (RiLSA), Ausgabe 2015. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln
- FGSV (2015b): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2015): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln
- FRIEDRICH, B. (2000): Steuerung von Lichtsignalanlagen: Balance – ein neuer Ansatz. Straßenverkehrstechnik, Heft 7/2000, Kirschbaum-Verlag, Bonn
- GARTNER, N. (1982): Prescription for demand-responsive urban traffic control. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 881, pp. 73-76
- GARTNER, N. (1985): Demand-responsive traffic signal control research. Transportation Research A, Vol. 19, No. 5/6, pp. 369-377
- GARTNER, N.; ASSMAN, S. F.; LASAGE, F.; HOU, D. L. (1991): A multiband approach to arterial traffic signal optimization. Transportation Research B, Vol. 25, No. 1, pp. 55-74
- GLEUE, A. W. (1972): Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung signalisierter Knotenpunkte. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 136, Bonn
- HILLIER, J. A.; ROTHERY, R. (1967): The Synchronization of Traffic Signals for Minimum Delays. Transportation Science, Vol. 2, May, pp. 81-94
- HOLROYD, J.; ROBERTSON, D. I. (1973): Strategies for area control systems present and future. TRRL Report, LR 569, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK
- HUANG, D. W.; HUANG, W. N. (2003): Traffic signal synchronization. Physical Review E, 67, 056124
- IMPROTA, G.; CANTARELLA, G. E. (1984): Control system design for individual signalized junction. Transportation Research B, Vol. 18, No.2 pp. 147-167
- KELLER, H.; FRIEDRICH, B.; WULFFIUS, H.; BEHR, E.; WOLTERS, W.; MERTZ, J.; SCHÜLER, T. (2001): Verkehrsadaptive Netzsteuerung. www.mobinet.de/Fachinformation/pdf/Tagungsband.pdf
- LI, J.; ROUPHAIL, N. M.; AKÇELIK, R. (1994): Overflow Delay Estimation for a Simple Intersection with Fully Actuated Signal Control. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 1457, pp. 73-81
- LIGHTHILL, M. H.; WHITHAM, G. B. (1957): On Kinematic Waves: II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. Proceedings of the Royal Society of London, Series A229, No. 1178, pp. 317-345
- LIN, F. (1992): Modeling Average Cycle Lengths and Green Intervals of Semi-actuated Signal Operations with Exclusive Pedestrian-actuated Phase. Transportation Research B, Vol. 26, No. 3, pp. 221-240
- LIN, F.; MAZDEYASA, F. (1983): Delay Models of Traffic Actuated Signal Controls. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 905, pp. 33-38

- LUH, J. Z.; LEE, C.-Y. (1991): Stop Probability and Delay Estimations at Low Volumes for Semi-Actuated Traffic Signals. *Transportation Science*, 25(1), pp. 65-82
- MARCHAL, W. G. (1974): Some Simple Bounds and Approximations in Queuing. Technical Memorandum Serial T-294, Institute for Management Science and Engineering, George Washington University, Washington D.C.
- MILLER, A. J. (1965): A computer control system for traffic networks. In: ALMOND, J. (ed.): *Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, London, pp. 200-220
- MILLER, A. J. (1968): Signalised intersections: capacity guide. *ARRB Bulletin*, No. 4. Reprinted as *ARRB Research Report ARR No. 79*, 1978. ARRB Transport Research Ltd., Vermont South, Australia
- MÜLLER, P. (1969): Bemessung von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen mithilfe von Konfliktbelastungen. *Straßenverkehrstechnik*, Heft 3/1969, Kirschbaum-Verlag, Bonn
- NEWELL, G. F. (1969): Properties of Vehicle Actuated Signals: I. One-Way Streets. *Transportation Science*, 3, pp. 30-52
- NEWELL, G. F. (1990): Stochastic Delays on Signalized Arterial Highways. In: KOSHI, M. (ed.): *Transportation and Traffic Theory*. Elsevier Science Publishing Co., Inc., pp. 589-598
- NEWELL, G. F.; Osuna, E. E. (1969): Properties of Vehicle-Actuated Signals: II. Two-Way Streets. *Transportation Science*, 3, pp. 99-125
- OLSZEWSKI, P. (1990): Traffic Signal Delay Model for Non-Uniform Arrivals. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, No. 1287, pp. 42-53
- ROBERTSON, D. I. (1969): *Transyt: A Traffic Network Study Tool*. TRRL Report, LR 253, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK
- ROBUSTO, C. C. (1957): The Cosine-Haversine Formula. *The American Mathematical Monthly*, Vol. 64, No. 1, pp. 38-40, Mathematical Association of America.
- ROUPHAIL, N. M. (1989): Progression Adjustment Factors at Signalized Intersections. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, No. 1225, pp. 8-17
- SKABARDONIS, A.; MAY, A. D. (1985): Comparative analysis of computer models for arterial signal timing. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, No. 1021, pp. 45-52
- STAUNTON, M. M. (1976): *Vehicle-Actuated Signal Controls for Isolated Locations*. An Foras Forbartha, Dublin, Ireland.
- STOFFERS, K. E. (1968): Berechnung von optimalen Signalzeitenplänen. *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe*, Heft 2
- TARKO, A.; ROUPHAIL, N.; AKÇELIK, R. (1993): Overflow Delay at a Signalized Intersection Approach Influenced by an Upstream Signal: An Analytical Investigation. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, No. 1398, pp. 82-89
- TRB (2000): *Highway Capacity Manual (HCM 2000)*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- TRB (2010): *Highway Capacity Manual (HCM 2010)*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- VINCENT, R. A.; MITCHELL, A. I.; ROBERTSON, D. I. (1980): User guide to *Transyt* version 8. TRRL Report No. LR 888, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK
- VINCENT, R. A.; PIERCE, J. R. (1988): *Mova: Traffic Responsive, Self Optimizing Signal Control for Isolated Intersections*. TRRL Report, 170, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK
- WEBSTER, F. V. (1958): *Traffic signal settings*. RRL Technical Paper No. 39, HMSO, London
- WU, N. (1992): Wartezeit an festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen unter zeitlich veränderlichen (instationären) Verkehrsbedingungen. *Straßenverkehrstechnik*, Heft 3/1992, Kirschbaum-Verlag, Bonn

WU, N. (1996): Rückstaulängen an Lichtsignalanlagen unter verschiedenen Verkehrsbedingungen. Straßenverkehrstechnik, Heft 5/1996, Kirschbaum-Verlag, Bonn

WU, N. (2004): Evaluierung und Erweiterung von Verfahren zur Bewertung von verkehrsabhängigen, zeitlückengesteuerten Lichtsignalanlagen. Arbeitsblätter des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 27

WU, N. (2014): Modifying Progression Adjustment Factor and Upstream Filtering Adjustment Factor at Signalized Intersections in HCM. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting Compendium of Papers, Washington, D.C.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2014

V 235: **Dynamische Messung der Nachtsichtbarkeit von Fahr-
bahnmarkierungen bei Nässe**

Drewes, Laumer, Sick, Auer, Zehntner € 16,00

V 236: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2012**

Fitschen, Nordmann € 28,50

Die Ergebnisdateien sind auch als CD erhältlich oder können außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 237: **Monitoring von Grünbrücken – Arbeitshilfe für den Nach-
weis der Wirksamkeit von Grünbrücken für die Wiedervernetzung
im Rahmen der KP II – Maßnahmen**

Bund-Länder Arbeitskreis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden. Der Anhang ist interaktiv. Das heißt er kann ausgefüllt und gespeichert werden.

V 238: **Optimierung der Arbeitsprozesse im Straßenbetriebs-
dienst – Sommerdienst**

Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00

V 239: **Dynamische Messung der Griffigkeit von Fahrbahnmar-
kierungen**

Steinauer, Oeser, Kemper, Schacht, Klein € 16,00

V 240: **Minikreisverkehre – Ableitung ihrer Einsatzbereiche und
Einsatzgrenzen**

Baier, Leu, Klemps-Kohnen, Reinartz, Maier, Schmotz € 23,50

V 241: **Rastanlagen an BAB – Verbesserung der Auslastung und
Erhöhung der Kapazität durch Telematiksysteme**

Kleine, Lehmann, Lohoff, Rittershaus € 16,50

V 242: **Bordsteinkanten mit einheitlicher Bordhöhe und Bodenin-
dikatoren an Überquerungsstellen**

Boenke, Grossmann, Piazzolla, Rebstock, Herrnsdorf, Pfeil € 20,00

V 243: **Nutzen und Kosten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen
über den gesamten Lebenszyklus**

Balmberger, Maibach, Schüller, Dahl, Schäfer € 17,50

V 244: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2013**

Fitschen, Nordmann € 28,50

V 245: **Überprüfung der Befahrbarkeit innerörtlicher Knotenpunk-
te mit Fahrzeugen des Schwerlastverkehrs**

Friedrich, Hoffmann, Axer, Niemeier, Tengen, Adams, Santel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 246: **Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Verkehrssicherheit in
Einfahrten auf Autobahnen**

Kathmann, Roggendorf, Kemper, Baier

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 247: **Befahrbarkeit plangleicher Knotenpunkte mit Lang-Lkw**

Lippold, Schemmel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 248: **Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw – Grundlage-
ermittlung**

Burg, Röhling

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

V 249: **Auswirkungen von Querschnittsgestaltung und längs-
gerichteten Markierungen auf das Fahrverhalten auf Land-
straßen**

Schlag, Voigt, Lippold, Enzfelder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 250: **Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen
mit Lang-Lkw**

Lippold, Schemmel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 251: **Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen von Straßenumge-
staltungen nach dem „Shared Space“-Gedanken**

Baier, Engelen, Klemps-Kohnen, Reinartz € 18,50

V 252: **Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose
für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen**

Gündra, Barron, Henrichs, Jäger, Höfle, Marx,

Peters, Reimer, Zipf € 15,00

V 253: **Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit und den
Ablauf des Verkehrs in Arbeitsstellen**

Baier, Kemper

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 254: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-
Lkw**

Wellner, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 255: **Überholen und Räumen – Auswirkungen auf Verkehrssi-
cherheit und Verkehrsablauf durch Lang-Lkw**

Zimmermann, Riffel, Roos

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 256: **Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagen-
teile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Vor-
aussetzung eines umfassenden Asset Managements**

Zander, Birbaum, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 257: **Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtli-
chen Hauptverkehrsstraßen**

Ohm, Fiedler, Zimmermann, Kraxenberger, Maier

Hantschel, Otto € 18,00

V 258: **Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten**

Holldorb, Streich, Uhlig, Schäufele € 18,00

V 259: **Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellie-
rung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten**

Geistefeldt, Sievers

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 260: **Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinter-
dienst**

Hausmann

€ 15,50

V 261: Nutzung von Radwegen
in Gegenrichtung – Sicherheitsverbesserungen
Alrutz, Bohle, Busek € 16,50

V 262: Verkehrstechnische Optimierung des Linksabbiegens
vom nachgeordneten Straßennetz auf die Autobahn zur Vermeidung
von Falschfahrten
Maier, Pohle, Schmotz, Nirschl, Erbsmehl € 16,00

V 263: Verkehrstechnische Bemessung von Landstraßen – Weiterentwicklung
der Verfahren
Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 16,50

V 264: Qualitätsstufenkonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung
des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen
Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 17,00

V 265: Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken
Bark, Kutschera, Resnikow, Baier, Schuckließ
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

V 266: Verfahren zur Bewertung der Verkehrs- und Angebotsqualität
von Hauptverkehrsstraßen
Baier, Hartkopf € 14,50

V 267: Analyse der Einflüsse von zusätzlichen Textanzeigen im Bereich
von Streckenbeeinflussungsanlagen
Hartz, Saighani, Eng, Deml, Barby
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 268: Motorradunfälle – Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur
Hegewald, Fürneisen, Tautz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

V 269: Identifikation von unfallauffälligen Stellen motorisierter
Zweiradfahrer innerhalb geschlossener Ortschaften
Pohle, Maier € 16,50

V 270: Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den
Straßenbetriebsdienst (KliBet)
Holldorb, Rumpel, Biberach, Gerstengarbe, Österle, Hoffmann € 17,50

V 271: Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien
bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur
Offergeld, Funke, Eschenbruch, Fandrey, Röwekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 272: Einsatzkriterien für Baubetriebsformen
Göttgens, Kemper, Volkenhoff, Oeser, Geistefeldt, Hohmann € 16,00

V 273: Autobahnverzeichnis 2016
Kühnen € 25,50

V 274: Liegedauer von Tausalzen auf Landstraßen
Schulz, Zimmermann, Roos € 18,00

V 275: Modellversuch für ein effizientes Störfallmanagement auf
Bundesautobahnen
Grahl, Skottke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 276: Psychologische Wirkung von Arbeitsstellen auf die
Verkehrsteilnehmer
Petzoldt, Mair, Krems, Roßner, Bullinger € 30,50

V 277: Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen
Kathmann, Roggendorf, Scotti
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 278: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014
Fitschen, Nordmann € 30,50

V 279: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf
Autobahnen
Geistefeldt, Giuliani, Busch, Schendzielorz, Haug, Vortisch, Leyn, Trapp € 23,00

2017

V 280: Demografischer Wandel im Straßenbetriebsdienst – Analyse
der möglichen Auswirkungen und Entwicklung von Lösungsstrategien
Pollack, Schulz-Ruckriegel € 15,50

V 281: Entwicklung von Maßnahmen gegen Unfallhäufungsstellen –
Weiterentwicklung der Verfahren
Maier, Berger, Kollmus € 17,50

V 282: Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen
Lippold, Veters, Steinert € 19,50

V 283: Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von
Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten
Bark, Krähling, Kutschera, Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Schuckließ, Maier, Berger € 19,50

V 284: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung
des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten
Geistefeldt, Sievers
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 285: Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz
Kamptner, Thümmeler, Ohmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 286: Telematisch gesteuertes Kompaktparken – Grundlagen
und Entwicklung
Kleine, Lehmann € 16,50

V 287: Werkzeuge zur Durchführung des Bestandsaudits und einer
erweiterten Streckenkontrolle
Bark, Kutschera, Resnikow, Follmann, Biederbick € 21,50

V 288: Überholungen von Lang-Lkw - Auswirkungen auf die
Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf
Roos, Zimmermann, Köhler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 289: Verkehrsqualität an verkehrsunabhängig gesteuerten und
koordinierten Lichtsignalanlagen
Geistefeldt, Giuliani, Vieten, Dias Pais € 20,00

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller
lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe
können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer
Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de