

# Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 324

**bast**

# Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA

von

Peter Vortisch  
Sebastian Buck  
Ulrike Leyn

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Verkehrswesen

Michael Baier  
Wolfgang Schuckließ

Büro für Stadt- und Verkehrsplanung  
Dr.-Ing. Reinhold Baier GmbH  
Aachen

Martin Schimpf  
Martin Schmotz

Professur für integrierte Verkehrsplanung und Straßentechnik  
Technische Universität Dresden

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 324**

**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 Ed. Schünemann KG, 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 03.0424/2007/DGB**

Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA

### **Fachbetreuung**

Andreas Medack  
Kerstin Lemke  
Christian Bansi

### **Referat**

Straßenentwurf, Verkehrsablauf, Verkehrsregelung

### **Herausgeber**

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

### **Redaktion**

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### **Druck und Verlag**

Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-95606-492-0

Bergisch Gladbach, Januar 2020

## Kurzfassung – Abstract

### Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA

Die zur Bestimmung der Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten verwendete mittlere Wartezeit je Fahrzeug unterliegt verschiedenen Einflussfaktoren. Die im HBS (2015) enthaltenen Verfahren zur Berechnung der Wartezeit wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes überprüft. Für einzelne Aspekte wurden Verbesserungspotenziale identifiziert und Anpassungsansätze vorgeschlagen.

Die empirische Basis des Projekts waren Video-messungen an 21 Knotenpunkten. Ergänzt wurden die Messungen durch Simulationsrechnungen, denen eine umfangreiche Kalibrierung des Simulationswerkzeugs voranging.

An Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage hat die Gegenüberstellung von gemessenen bzw. simulierten Wartezeiten mit den nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten gezeigt, dass die Wartezeiten meist in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Bei einzelnen Komponenten der Berechnungsverfahren wurden die nachfolgenden Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert: Der Einfluss der Instationarität an Knotenpunkten mit Lichtsignalsteuerung sollte mit einem angepassten Instationaritätsfaktor abgebildet werden, um auch unsymmetrische Belastungsverläufe in der Bemessungsstunde korrekt zu berücksichtigen. Der Einfluss der Längsneigung auf die Sättigungsverkehrsstärke und der Einfluss bedingt verträglicher Fuß- und Radfahrerströme auf die Kapazitäten der abbiegenden Fahrzeugströme sollten vertieft untersucht werden, da bei den untersuchten Knotenpunkten Unstimmigkeiten festgestellt wurden.

Die Wartezeitberechnung bei unsignalisierten Knotenpunkten sollte geringfügig modifiziert werden, um den Einfluss der Kapazität besser abzubilden

Außerdem sollten zur Verbesserung der Simulationspraxis Hinweise zur HBS-konformen mikroskopischen Simulation von Knotenpunkten erarbeitet und als Regelwerk zur Verfügung gestellt werden.

### Level of service assessment of signalized and unsignalized intersections

The average delay used to determine the level of service at intersections is influenced by various factors. In this research project, we evaluated the methods to calculate the delay based on the HBS (2015). For some aspects, we identified a potential for improvement and suggest some approaches for adaptation.

The empirical basis of the project were video measurements at 21 different intersections. The measurements were supplemented by simulations, which were preceded by an extensive calibration process.

At signalized intersections, the comparison of measured and simulated delays with those calculated by HBS (2015) has shown that the delays are usually of a similar scale. The following possible improvements have been identified for separate components of the calculation methods: The influence of instationarity at signalized intersections should be replicated with a modified instationarity factor in order to also take into account asymmetric traffic flows in the peak hour. The influence of the longitudinal slope on the saturation flow and the influence of pedestrians and cyclists on the capacity of turning traffic flows should be further investigated, since discrepancies were found at the examined intersections.

The delay calculation at unsignalized intersections should be modified slightly to reflect the influence of the capacity more precisely.

Furthermore, a reference manual for HBS-compliant microscopic simulations of intersections could be useful to enhance the practical application of simulation in this field.

## Summary

### Level of service assessment of signalized and unsignalized intersections

## 1 Objective

The German highway capacity manual assesses the quality of service at intersections by the average delay per vehicle. These are influenced by various aspects of the traffic flow, which have a known or presumed influence on the overall transit time of traffic. Some of these aspects are independent of each other, others are related.

Two topics are relevant separately and in combination: the single components of the overall delay at intersections and their mapping in the HBS methods as well as the influence of instationarity of the traffic flows on the delay. Based on empirical measurements, a detailed investigation of these questions by means of simulations is possible.

## 2 Research methods and results

The empirical basis of the project were video measurements at 21 intersections with different kinds of designs and control. At 15 intersections, several time stamps were extracted in a largely manual operation for each vehicle over two hours, e.g. the arrival of the vehicle at the end of the queue, the stop line or the exit of the intersection. The start-up behavior was also measured by video observation at two intersections and the blocking of the pedestrian crossing for turners was determined at four intersections. Simulations supplemented the measurements in order to consider further traffic situations than those occurred during the measurements.

A great effort was required in the calibration of the simulation models. The nodes were initially set up as network models in VISSIM and supplied with the fixed-time programs that were active at the time of measurement. Then, the traffic flow occurred over the measurement period was replicated in 5-minute intervals for each current.

The first result of the simulation was the time to pass the intersection for each stream. Only vehicles

without delays or obstructions were taken into account; the time losses considered are therefore only attributable to the so-called geometric delay. The times to pass the intersection were set in the simulation by so-called reduced speed areas. The simulated vehicles reduce their desired speed on these short sections. A very good reproduction of the free times to pass the intersections could be achieved.

The next calibrated value is the saturation flow rate of a lane. The saturation flow rates were calibrated differentiated according to the lane and the waiting position of the vehicle in the queue. This worked well for most intersections. In order to assess the overall calibration quality, the overall transit times (with delay) were compared between measurement and simulation for the individual lanes. The calibration resulted in a good match on average.

In the analysis of the saturation flow rate, it was noticeable that the time required for the first vehicle at the stop line to start at the beginning of green time can be adjusted well in the simulation, but in reality, start times vary much more than in the simulation. Therefore, the start-up behavior at the beginning of the green time was measured at two additional intersections. The thus determined distributions of the flow rate of the first vehicle were made available to the publisher of the simulation tool, who then implemented a user-defined start-up time distribution into the product.

At signalized intersections, the comparison of the delays from measurement and simulation in the measured traffic situation with the average delay calculated by the method of the HBS (2015) has shown that there are differences, even if one considers that a comparison of a random measurement with the mean-value-oriented results of an HBS assessment is burdened with uncertainties. The deviations of the calculation results from the HBS (2015) and the results from measurements can be significant in individual cases, but the average delays are usually of the same scale. The delay as a function of the traffic load in the HBS (2015) corresponds well with the results of the simulation. However, the delays calculated according to the HBS (2015) are usually above the simulated values if for the calculation by the method of HBS (2015) the saturation flow rate determined by the simulation is used. In particular, the spread of the overall delay at real intersections and the differences between the delays measured

and calculated according to HBS (2015) are significantly greater than the delay components resulting from the intersection type.

The comparison of the calculated delay according to the HBS (2015) and the simulatively determined delay shows that the delays are much higher in the simulation at high utilization rates. In addition, it has been shown that the queue length at green time end is much greater for high traffic situations in the simulation than those calculated according to HBS (2015). The simulatively determined queue lengths are, in individual cases, up to 3.5 times longer than the calculated queue length at green time end, which explains the observed differences between the simulatively determined and the calculated delays. The abrupt increase in queue length in the simulation at high traffic suggests that the original approach of the HBS (2001) to calculate the queue length at green time end as a function of the degree of saturation does make sense. Although the transfer into a continuous function is more user-friendly, it appears to lead to significant differences in the queue length at green time end, and thus the delay when the lane is saturated. Here, more detailed studies are needed.

When comparing HBS calculations and measurements or simulations, observations were also made in individual situations, which require further research and consideration as part of the HBS update:

- The results indicate that the influence of the longitudinal slope on the saturation FLOW in the HBS (2015) is strongly overestimated. Although only one intersection with a significant slope was included, the overestimation was clear. The influence factors mentioned in the HBS (2015) are presumably still based on obsolete vehicle technology and should be renewed, as today's vehicles have more powerful engines and start-up assistance on slopes.
- Furthermore, the influence of privileged pedestrians and/or cyclists on the delay of turning vehicles was considered. In the HBS (2015), a function is defined which specifies an additional delay for turning vehicles, depending on the number of persons. For verification, video surveys were carried out at four intersections specifically with regard to the conflict of turn-offs with pedestrians and cyclists. In the evaluation, it was determined how long the crosswalk was

actually blocked for the turning vehicles. As a result, a function with a slightly different shape is proposed, which assumes a higher blocking time for few persons, but then runs lower than the original curve.

At unsignalized intersections, the comparison of the calculated delay according to the HBS (2015) and the simulatively determined delay showed that the delays calculated according to HBS (2015) are rather over-estimated at high capacities and tend to be underestimated at low levels. As a result, a slight modification of the delay equation of the HBS (2015) is proposed.

With regard to the average overall lost times (compared to the free pass without an intersection), it can be assumed that these are, on average, about 6 s higher than the delays determined in the simulation over all traffic constellations and stress cases. Thus, the difference between the overall lost time and the delay is approximately on the order of magnitude as described by BRILON (2003). In addition, this magnitude also matches the additional time losses before and behind unsignalized intersections, which BAIER et al. (2012) described and which are specified in the HBS (2015) for the cross-site assessment of network sections.

In order to consider the influence of the instationarity at signalized intersections, a fixed-time controlled intersection was simulated at different cycle times, green times and saturation degrees. The access road was loaded for an hour with the same total amount of vehicles, but distributed to the hour according to the various instationarity profiles. As a result, the overall lost time of all vehicles was determined. The model was calibrated so that in the case of steady-state vehicle input the overall lost time coincided with the average delay calculated according to HBS (2015).

The overall lost times determined in the simulation of the profiles were then compared with one another and with the delays calculated according to the HBS (2015). For each profile, the instationarity factor was calculated and applied as defined in the HBS (2015). Generally, there were significant differences in the overall lost time. This is plausible because the instationarity factor used in the HBS only considers the ratio of the most heavily loaded 15-minute interval and the hour value and does not take into account whether the proceeding of the traffic volume is falling or rising within the hour. However, the

simulation calculations show that there are large differences in the delays in the case of high loads.

As a result of these investigations, an extended instationarity factor is proposed in order to take more into account the influence of instationarity at signalized intersections. This is dependent on the degree of saturation and also contains a variable which describes whether the load increases, decreases, is symmetrical or constant within the hour. Whether the higher accuracy of the delay calculation thus achieved justifies the higher complexity involved in the procedure must be weighed in the updating of the HBS.

An instationarity at unsignalized intersections can occur in the main current as well as in the non privileged current. Overall, however, no significant influence of instationarity could be determined for intersections controlled with traffic signs.

Finally, we looked at how the separate components of the overall delay are taken into account in the calculation methods, in particular with regards to the geometric delay. To this end, we considered a so-called intersection specific basic delay  $t_{W,G}$ , which results from the mere presence of the intersection without any influence by other traffic participants. The proportion of this additional delay, which arises from the delay before and the necessary acceleration behind the intersection, is described in chapter S6 network sections in the HBS for the different intersection types. Besides, the calculation of the delays according to chapter S4 and S5 yields an intersection specific basic delay, when the evaluation is carried out with a low traffic flow for the examined flow or lane.

For a degree of saturation  $x = 0$  and with the simplification  $t_U = t_A + t_S$ , the basic delay at signalized intersections of is  $t_{W,G} = t_S^2 / (2t_U)$  applied. This delay is due to randomly arriving vehicles during the red time, which have to wait until the start of the green time. According to chapter S6, between 1.5 and 2 seconds must be added to evaluate the overall lost time depending on the delay. Based on the calibrated models of the signalized intersections, this overall lost time can be analyzed. For this, we looked at simulation runs with very low loads, for which similar overall lost times were obtained, depending on the cycle and green time. The overall lost time was thereby determined by comparison with vehicles that are not influenced by traffic lights.

For the basic delay at unsignalized intersections, the additional time gap required for following vehicles is  $t_{W,G} = t_F$  when the load is zero veh/h in the main current. According to chapter S6, 2.0 seconds are additionally added for intersections with traffic signs 205 StVO and 8.5 seconds with traffic signs 206 StVO, in order to evaluate a network section. Simulations using the calibrated models were also carried out for intersections with traffic sign 205 StVO with very low non privileged current load and with no traffic generated in the main current. These simulation studies result in an overall lost time of about 6 seconds. Vehicles driving through a network with the same geometry, unaffected by conflict surfaces were used as comparative figures. Since the additional time gap required for following vehicles is in the range of 3 to 4 seconds, the obtained results correspond to the HBS and simulation. For intersections with traffic sign 206 StVO, no comparable results can be achieved in simulation since the stop duration at the stop line is a direct input into VISSIM. However, it is to be assumed that the empirically determined variables of chapter S6 are applicable and lead to plausible results.

For the basic delay at roundabouts, both the simulation and the calculation method according to the HBS apply the same conditions as for intersections with traffic signs 205 StVO. Only the dependence on the driving relationship was so far not considered more closely and is missing in the assessment procedure. Since the driving relationship determines the distance to be traveled on the circular path, this also determines the overall lost time, in contrast to a geometry which allows direct turning without a circular path.

### 3 Conclusions

At signalized intersections, the comparison of measured and simulated delays with those calculated by HBS (2015) has shown that differences exist in individual cases but the delays are usually of a similar scale. The waiting times are usually of the same order of magnitude. The delays calculated according to the HBS (2015) are usually above the simulated values which correspond to the conservative approach of the HBS (2015). The curve progression of the delays as a function of the load from the HBS (2015) corresponds well with the results of the simulation. The following possible

improvements have been identified for separate components of the calculation methods:

- The influence of the instationarity at signalized intersections should be replicated with a modified instationarity factor in order to also take into account asymmetric traffic flows in the peak hour.
- The delay calculation at unsignalized intersections should be modified slightly to more precisely reflect the influence of the capacity.
- The influence of the longitudinal slope on the saturation flow should be further investigated, as the current process is likely to significantly overestimate the impact.
- The influence of pedestrians and cyclists on the capacity of turning traffic flows should be further investigated.

Furthermore, the development of a reference manual for HBS-compliant microscopic simulations of intersections, provided as a guideline, could be useful to enhance the practical application of simulation in this field.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	11	<b>3</b>	<b>Messungen an ausgewählten Knotenpunkten</b> .....	38
<b>2</b>	<b>Literaturanalyse</b> .....	12	3.1	Auswahl und Festlegung von typischen Knotenpunkten .....	38
2.1	Grundlagen der Warteschlangentheorie .....	12	3.2	Messtechnik .....	39
2.1.1	Ankunftsstrom .....	13	3.3	Erhebung empirischer Daten .....	41
2.1.2	Warteraum .....	13	3.3.1	Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage ..	41
2.1.3	Bedienstelle .....	13	3.3.2	Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage .....	42
2.1.4	Abgangsstrom .....	14	3.3.3	Kreisverkehrsplätze .....	43
2.1.5	Kendall-Symbolik .....	14	3.3.4	Auswertung der Videoaufzeichnungen .....	43
2.1.6	Kenngrößen der Warteschlangentheorie .....	14	3.4	Erhobene Knotenpunkte .....	44
2.2	Bedientheorie in der Verkehrstechnik .....	15	3.4.1	Kreuzungen mit Lichtsignalanlage innerorts .....	45
2.3	Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage .....	16	3.4.2	Einmündungen mit Lichtsignalanlage innerorts .....	45
2.3.1	M/G/1- und m/M/1-Systeme .....	16	3.4.3	Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage innerorts .....	46
2.3.2	M/G2/1-Systeme .....	18	3.4.4	Einmündungen ohne Lichtsignalanlage innerorts .....	46
2.3.3	Zeitabhängige Ansätze .....	18	3.4.5	Einmündungen ohne Lichtsignalanlage außerorts .....	47
2.4	Wartezeiten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage .....	22	3.4.6	Kreisverkehrsplätze innerorts .....	48
2.4.1	Rein deterministische und rein stochastische Ansätze .....	22	3.4.7	Kreisverkehrsplätze außerorts .....	48
2.4.2	Zeitabhängige Wartezeitmodelle .....	24	3.5	Nacherhebungen .....	48
2.4.3	Die Wartezeitberechnung für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage nach HBS (2015) .....	24	3.5.1	Nacherhebungen zum Anfahrverhalten bei Grünbeginn .....	48
2.5	Instationarität im Verkehrsfluss in Bezug auf die Berechnung von Wartezeiten .....	27	3.5.2	Nacherhebungen zu bedingt verträglich geführten Fußgänger- und Radfahrerströmen .....	50
2.5.1	Definition und Nachweis von Instationarität .....	27	<b>4</b>	<b>Simulationsmodelle</b> .....	53
2.5.2	Auswirkungen von Instationarität und deren Berücksichtigung bei der Berechnung von Wartezeiten .....	27	4.1	Ziel der Simulationsmodelle .....	53
2.6	Differenzierung weiterer Verlustzeiten an Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage .....	29	4.2	Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage ..	53
			4.2.1	Aufbau der Modelle .....	53
			4.2.2	Grundlagen der Kalibrierung .....	59

4.2.3	Kalibrierung anhand der Durchfahrzeit . . . . .	59	6.3	Einfluss von Instationarität an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage. . . . .	114
4.2.4	Kalibrierung anhand der Zeitbedarfswerte. . . . .	62	6.3.1	Aufbau und Kalibrierung des Simulationsmodells mit VISSIM . . . . .	114
4.3	Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage. . . . .	69	6.3.2	Modellierung und Untersuchung der Instationarität . . . . .	114
4.3.1	Aufbau der Modelle . . . . .	69	6.3.3	Instationarität im Hauptstrom . . . . .	115
4.3.2	Kalibrierung an Messwerten. . . . .	69	6.3.4	Instationarität im Nebenstrom . . . . .	116
4.3.3	Kalibrierung nach HBS-Kenngrößen . . . . .	70	6.3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	123
4.3.4	Kalibrierung anhand der Grundkapazität G . . . . .	71	<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Empfehlungen . . . . .</b>	<b>123</b>
<b>5</b>	<b>Analyse der Zeitverluste an Knotenpunkten . . . . .</b>	<b>79</b>	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>126</b>	
5.1	Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage. . . . .	79	<b>Bilder . . . . .</b>	<b>128</b>	
5.1.1	Definition der Lastfälle . . . . .	79	<b>Tabellen . . . . .</b>	<b>133</b>	
5.1.2	Berechnung der Bezugsgrößen . . . . .	80	<b>Anhang I:</b>	<b>Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage</b>	
5.1.3	Ableitung von Ansätzen für das Bewertungsverfahren . . . . .	82	<b>Anhang II:</b>	<b>Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage</b>	
5.2	Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage. . . . .	84	<b>Anhang III:</b>	<b>Kreisverkehrsplätze</b>	
5.2.1	Definition der Lastfälle . . . . .	84	Die Anhänge zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:		
5.2.2	Berechnung der Bezugsgrößen . . . . .	85	<a href="http://bast.opus.hbz-nrw.de">http://bast.opus.hbz-nrw.de</a>		
5.2.3	Ableitung von Ansätzen für das Bewertungsverfahren . . . . .	86			
<b>6</b>	<b>Einfluss von Instationarität . . . . .</b>	<b>91</b>			
6.1	Entwicklung von typischen Ganglinien auf Basis von Realdaten. . . . .	91			
6.2	Einfluss von Instationarität an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage. . . . .	96			
6.2.1	Aufbau und Kalibrierung des Simulationsmodells mit VISSIM . . . . .	96			
6.2.2	Entwicklung der Laborbeispiele – Ganglinienformen, Signalprogramme und Simulationsvarianten. . . . .	97			
6.2.3	Ergebnisse der Simulationsstudien . . . . .	101			
6.2.4	Entwicklung einer Formalisierung zur Berücksichtigung der Instationarität . . . . .	102			
6.2.5	Validierung bzw. Identifikation der besten Variante mithilfe der Realdaten. . . . .	104			

# 1 Einleitung

Das in diesem Bericht dargestellte Projekt hat sich mit verschiedenen Aspekten des Verkehrsablaufs an plangleichen Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage beschäftigt, die einen bekannten oder vermuteten Einfluss auf die Gesamtdurchfahrzeit der Verkehrsteilnehmer haben. Einige dieser Aspekte sind voneinander unabhängig, bei anderen sind Zusammenhänge naheliegend. Die Bearbeitung folgt zwei Hauptsträngen: zum einen eine Betrachtung der verschiedenen Komponenten der Verlustzeiten an Knotenpunkten und ihre Abbildung in den Verfahren des HBS (2015) und zum anderen der Analyse des Einflusses der Instationarität der Zuflüsse auf die Wartezeiten. Die Zusammenfassung dieser beiden Fragestellungen in einem Projekt ist sinnvoll, weil ein Teil der Messungen und der Simulationen für beide Fälle gemeinsam eingesetzt werden können. Bild 1-1 illustriert die Ablaufstruktur des Projekts.

Die wesentliche empirische Basis des Projekts sind Videomessungen zahlreicher Knotenpunkte. Bei den Videomessungen wurde der Verkehrsablauf am Knotenpunkt meist über mehrere Stunden aufgenommen. Anschließend wurden in einem weitgehend manuellen Vorgang aus den Videos für jedes beobachtete Fahrzeug mehrere Zeitstempel extrahiert, die z. B. die Ankunft des Fahrzeugs am Warteschlangeneende, an der Haltlinie oder das Verlassen des Knotenpunkts markieren. Zur Unterstützung dieser Auswertung wurde ein Excel-basiertes

Softwarewerkzeug entwickelt. Ergänzend wurden Langzeitmessungen an Knotenpunktzufahrten und Messfahrten mit GPS-Aufzeichnung durchgeführt.

Die Simulation des Verkehrsablaufs ist neben der Empirie die zweite methodische Säule des Projekts. Ihr kommen zwei Rollen zu: bei der Untersuchung des Einflusses der Instationarität können in der Simulation Ceteris-Paribus-Bedingungen hergestellt werden, die es erlauben, die gleiche Belastungssituation an einem Knotenpunkt mit unterschiedlichen Instationaritätsbedingungen zu vergleichen. Diese Bedingungen können in der Simulation durch vorgegebene Profile des Zuflusses genau vorgegeben werden. Bei der Untersuchung der Verlustzeiten dient die Simulation dazu, weitere Belastungsfälle zu betrachten als die bei den Messungen aufgetretenen, also sozusagen zur Inter- und Extrapolation der Belastungssituationen. Das für die Simulationen eingesetzte Werkzeug ist PTV VISSIM.

Zur Untersuchung des Einflusses der Instationarität wird der Begriff der Instationarität auf den HBS-Kontext eingeschränkt, wo er die zeitliche Verteilung der Verkehrsbelastung innerhalb der Bemessungsstunde beschreibt. Das HBS (2015) berücksichtigt bei der Bewertung von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage bereits Instationarität durch einen Faktor, der im Wesentlichen das Verhältnis der höchstbelasteten Viertelstunde zur Gesamtbelastung der Bemessungsstunde beschreibt. Ziel der Untersuchung war es vor allem, diese Art der Berücksichtigung zu überprüfen und gegebenenfalls zu verbessern. Die-

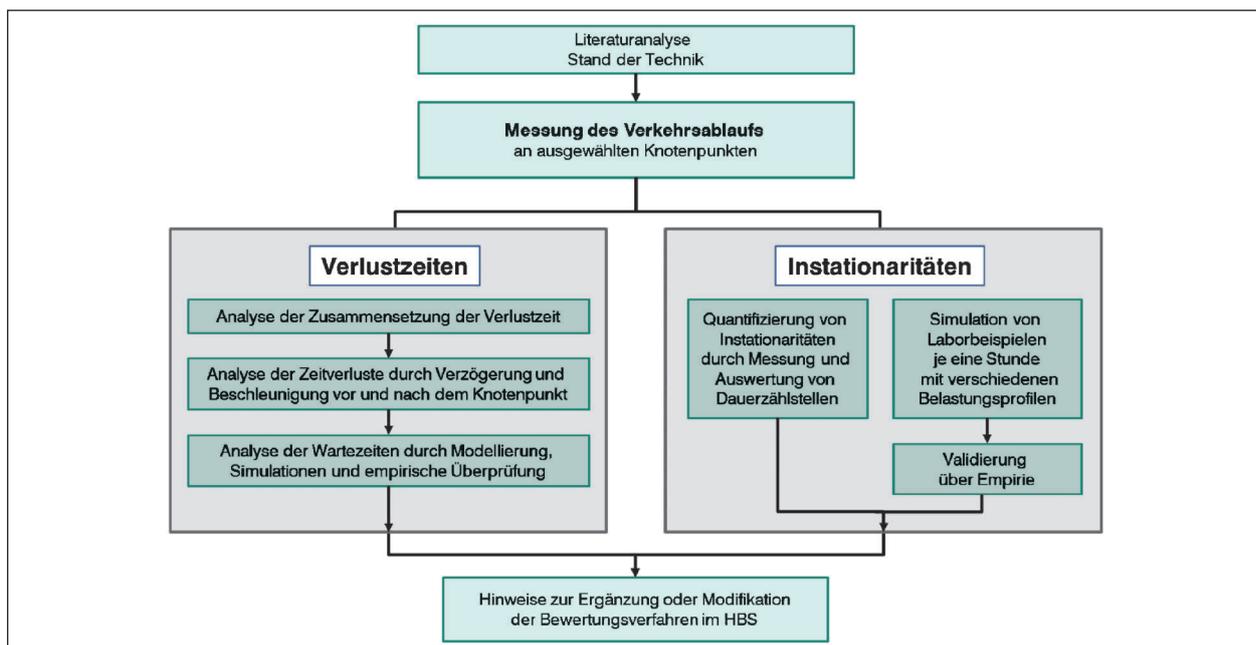


Bild 1-1: Schematische Darstellung des Projektablaufs

ser Aspekt kann weitgehend mithilfe von Simulationsrechnungen untersucht werden, indem unterschiedliche Belastungsverläufe innerhalb einer Stunde bei ansonsten gleichen Bedingungen simuliert werden. Ergänzend sollte anhand von Dauerzählstellen untersucht werden, welche Belastungsverläufe in der Realität tatsächlich auftreten.

Für die Untersuchung der Verlustzeiten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage wurde für jeden gemessenen Knotenpunkt ein Simulationsmodell aufgebaut und kalibriert. Außerdem wurde für die gemessene Belastungssituation eine Bewertung der Verkehrsqualität nach dem HBS (2015) durchgeführt. Ziel der Untersuchung war eine Überprüfung der Verlustzeitberechnungen im HBS durch die Gegenüberstellung berechneter und gemessener bzw. simulierter Verlustzeiten und insbesondere die Überprüfung, ob in den Verlustzeitberechnungen für die verschiedenen Knotenpunktstypen konsistent die gleichen Verlustzeitanteile (geometric delay, control delay) verwendet werden.

In den folgenden Kapiteln dieses Berichts steht vor allem die Methodik der Untersuchung im Vordergrund. Die Arbeitsschritte werden meist am Beispiel eines Knotenpunkts beschrieben. Die Ergebnisse für alle Knotenpunkte sind im Anhang aufgeführt. Das abschließende Kapitel fasst die Ergebnisse zusammen und gibt Hinweise für die Weiterentwicklung der HBS-Verfahren.

## 2 Literaturanalyse

Die Schätzung von Wartezeiten an Knotenpunkten ist ein elementarer Bestandteil für die Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs an solchen Verkehrsanlagen. Sie bildet gleichzeitig die Grundlage für die vergleichende Gegenüberstellung verschiedener Varianten von Kreuzungen und Einmündungen, mit und ohne Lichtsignalanlage, sowie Kreisverkehren im Rahmen von Neu-, Um- und Ausbaumaßnahmen.

Die existierenden Berechnungsansätze zur Schätzung der Wartezeiten sind dabei ähnlich vielfältig wie die Ausprägungen der unterschiedlichen Knotenpunkt- und Betriebsformen selbst. Dieser Umstand lässt zwei Schlussfolgerungen zu:

- Die Schätzung von Wartezeiten ist von großer Bedeutung für die Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten und somit für die ver-

gleichende Gegenüberstellung unterschiedlicher Knotenpunkt- und Betriebsformen.

- Keiner der Berechnungsansätze beschreibt die Realität vollumfänglich und allgemeingültig. Sie stellen vielmehr Annäherungen an reale Verhältnisse dar.

Eine Übersicht über verschiedene Formeln zur Wartezeitenschätzung für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage und deren Annahmen über die Verkehrsverhältnisse gibt BRILON (1995). In Abhängigkeit der Annahmen über die zeitliche Veränderung der Verkehrsstärke  $q$  und der Kapazität  $C$  eines Knotenpunktes werden vier Formeltypen unterschieden. Die theoretischen Grundlagen, aus welchen die Formeln entwickelt wurden, sind jedoch dieselben. Sie entstammen Überlegungen, den Verkehrsablauf an Knotenpunkten durch Modelle aus der Warteschlangentheorie zu beschreiben. Daher werden zunächst Grundlagen aus der Warteschlangentheorie (auch Bedientheorie) erläutert und der Bezug zum Verkehrsablauf dargestellt. Darauf aufbauend werden anschließend die Formeln zur Schätzung von Wartezeiten an Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage abgeleitet. Im Anschluss daran wird auf die Problematik der Instationarität und die weiteren möglichen Verlustzeiten, die an Knotenpunkten, zusätzlich zur Wartezeit, entstehen, eingegangen.

### 2.1 Grundlagen der Warteschlangentheorie

Das grundlegende Modell zur Beschreibung von Abläufen innerhalb von Warteschlangen ist ein Bediensystem. Ein Bediensystem besteht aus den Komponenten:

- Ankunftsstrom,
- Warteraum,
- Bedienstelle und
- Abgangsstrom.

Wie in Bild 2-1 dargestellt, gelangen die einzelnen Elemente über den Ankunftsstrom in das Bediensystem. Wenn es nötig ist, reihen sich die Elemente im Warteraum in eine Warteschlange ein. Die Zeit, welche die Elemente im Warteraum verbringen, wird allgemein als Wartezeit bezeichnet. An der Bedienstelle werden die eintreffenden Anforderungen abgefertigt, d. h. die Elemente werden bedient. Die

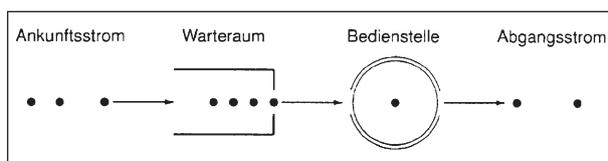


Bild 2-1: Schematische Darstellung eines Bediensystems  
(Quelle: ARENS und AUGÉ (2004))

hierfür benötigte Zeit wird auch als Bedienzeit bezeichnet. Bediente Elemente verlassen das Bediensystem über den Abgangsstrom.

### 2.1.1 Ankunftsstrom

Der Ankunftsstrom stellt die erste Komponente des Bediensystems dar. Die mittlere Anzahl von Elementen, welche innerhalb einer bestimmten Zeit in das Bediensystem einfließen, wird als Ankunftsrate  $\lambda$  bezeichnet und bestimmt sich aus:

$$\lambda = \frac{1}{E(T_A)} \quad (\text{Gl. 2-1})$$

mit

$\lambda$  Ankunftsrate

$E(T_A)$  Erwartungswert der Zwischenankunftszeiten, also der Zeiten zwischen dem Eintreffen aufeinanderfolgender Elemente

Die Zwischenankunftszeiten der einzelnen Elemente im Bediensystem sind in der Regel zufällig verteilt. Daher sind empirische Erhebungen notwendig, um eine Aussage über die Ankunftsrate  $\lambda$  treffen zu können.

### 2.1.2 Wartezimmer

Im Wartezimmer halten sich eintreffende Elemente solange auf, bis sie bedient werden. Die Größe des Warteraumes unterliegt keiner Beschränkung, ist aber in jedem Fall zu definieren, da sie bestimmt, wie viele Elemente in den Wartezimmer aufgenommen werden können. In unendlich großen Wartezimmern finden beliebig viele Elemente Platz. Ist ein begrenzt großer Wartezimmer überfüllt, so müssen ankommende Elemente abgewiesen werden und gehen dem System so verloren. Erst wenn Elemente das System verlassen, also bedient wurden, können weitere Elemente in den Wartezimmer aufgenommen werden. Die Größe des Warteraumes wird mit einer Zahl zwischen 1 und  $\infty$  beschrieben.

### 2.1.3 Bedienstelle

An einer Bedienstelle werden die Anforderungen bearbeitet, d. h. die Elemente werden dort bedient und verlassen anschließend das System. Ähnlich wie die Größe des Warteraumes unterliegt die Anzahl der Bedienstellen  $m$  in einem System keiner konkreten Beschränkung und kann zwischen 1 und  $\infty$  variieren. Bediensysteme mit nur einer Bedienstelle werden als einkanalige Systeme bezeichnet und stellen den Regelfall dar. Systeme mit mehr als einer Bedienstelle werden als mehrkanalige Bediensysteme bezeichnet. Dabei kann weiterhin zwischen Systemen unterschieden werden, bei denen die Bedienstellen parallel oder seriell angeordnet sind. Mehrkanalige Bediensysteme spielen in der Verkehrstechnik jedoch eine untergeordnete Rolle, weshalb sich an dieser Stelle auf die Nennung und den Verweis auf weiterführende Literatur zum Thema Bedientheorie beschränkt wird.

Die Anzahl der Elemente, welche innerhalb einer bestimmten Zeit bedient werden, wird durch die Bedienrate  $\mu$  beschrieben und ergibt sich aus:

$$\mu = \frac{1}{E(S)} \quad (\text{Gl. 2-2})$$

mit

$\mu$  Bedienrate

$E(S)$  Erwartungswert der Bedienzeiten

Wie auch die Zwischenankunftszeiten sind die Bedienzeiten in der Regel zufällig verteilt. Unter bestimmten Randbedingungen kann aber auch von einer deterministischen Bedienzeit ausgegangen werden. Bedienstellen besitzen die Eigenschaft, dass sie nicht mehrere Elemente gleichzeitig bedienen können. Erst nach der Bedienung eines Elementes kann eine weitere Anforderung abgearbeitet werden. Aufgrund dieser Eigenschaft ergibt sich der Belegungsgrad  $\rho$  (die Anzahl der im Mittel belegten Bedienstellen) aus dem Verhältnis zwischen Ankunfts- und Bedienrate:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{E(S)}{E(T_A)} \quad (\text{Gl. 2-3})$$

mit

$\rho$  Belegungsgrad

$\lambda$  Ankunftsrate

$\mu$  Bedienrate

$E(S)$  Erwartungswert der Bedienzeiten

$E(T_A)$  Erwartungswert der Zwischenankunftszeiten

Ein Belegungsgrad größer 1 bedeutet, dass (in einem einkanalen Bediensystem) mehr Elemente in das System einfließen als durch die vorhandene Bedienstelle abgefertigt werden können. Unter der Annahme eines unendlich großen Warteraums hat dies zur Folge, dass die Zahl der auf ihre Bedienung wartenden Elemente unbegrenzt zunimmt und sich die Warteschlange somit immer weiter verlängert. Damit ein Bediensystem stabil arbeitet, muss die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\rho < m \quad (\text{Gl. 2-4})$$

mit

$\rho$  Belegungsgrad

$m$  Anzahl der Bedienstellen

Die Reihenfolge, in welcher die in der Warteschlange wartenden Elemente bedient werden, wird durch die Wartedisziplin bestimmt. Hierfür existieren verschiedene Möglichkeiten:

FIFO – „first in, first out“

Die Elemente werden in der Reihenfolge ihres Eintreffens in der Warteschlange bedient. FIFO stellt die gebräuchlichste Art der Wartedisziplin dar.

LIFO – „last in, first out“

Die Elemente werden in umgekehrter Reihenfolge ihrer Ankunft bedient.

SIRO – „service in random order“

Die Anforderungen werden in einer zufälligen Reihenfolge abgearbeitet.

PRI– „priority“

Jeder Anforderung wird zunächst eine Priorität zugeteilt. Die Abarbeitung erfolgt dann auf der Basis der Rangfolge der Prioritäten.

### 2.1.4 Abgangsstrom

Über den Abgangsstrom verlassen die Elemente das Bediensystem. In den meisten Fällen wird angenommen, dass der Abgangsstrom unendlich ist, was bedeutet, dass abfließende Elemente keinen Einfluss mehr auf das Bediensystem ausüben.

### 2.1.5 Kendall-Symbolik

Mithilfe der Kendall-Symbolik können Bediensysteme eindeutig beschrieben werden. Hierfür werden

Platz	Bezeichnung	Symbol	Bedeutung
A	Verteilung der Zwischenankunftszeiten	M	Exponentialverteilung
		D	Deterministische Verteilung
		$E_k$	ERLANG-Verteilung mit Parameter $k$ ( $k = 1, 2, \dots$ )
		G	Beliebige Verteilung
		GI	Beliebige, voneinander unabhängige Verteilung
B	Verteilung der Bedienzeiten	M	s. o.
		D	
		$E_k$	
		GI	
m	Anzahl paralleler Bedienstellen	$1, 2, \dots, \mu$	
n	Anzahl der Warteplätze im Warteraum	$1, 2, \dots, \mu$	
d	Wartedisziplin	FIFO	first in, first out
		LIFO	last in, first out
		SIRO	service in random order
		PRI	priority

Tab. 2-1: Kendall-Symbolik  
(Quelle: HELLER und LINDENBERG (1978))

unter anderem die Verteilung der Zwischenankunftszeiten und der Bedienzeiten angegeben.

Ein Bediensystem lässt sich durch die fünf Symbole A/B/m/n/d vollständig beschreiben.

Eine Zusammenstellung verschiedener Ausprägungen zeigt Tabelle 2-1. In der Verkehrstechnik (wie auch in den meisten anderen Fällen) werden Bediensysteme betrachtet, die über einen unendlich großen Warteraum verfügen und bei denen die Elemente in der Reihenfolge ihres Eintreffens bedient werden (FIFO). Daher werden die Symbole n und d weggelassen, wenn es sich um ein System mit diesen Eigenschaften handelt.

### 2.1.6 Kenngrößen der Warteschlangentheorie

Neben der Ankunftsrate  $\lambda$ , der Bedienrate  $\mu$  und dem Belegungsgrad  $\rho$  existieren weitere Kenngrößen, mithilfe derer die Abläufe in einem Bediensystem beschrieben werden können. Dazu zählen unter anderem die Anzahl der Elemente im System und in der Warteschlange sowie die Wartezeiten der Elemente.

Die Anzahl der Elemente im System L setzt sich zusammen aus der Anzahl der Elemente in der Warte-

schlange  $L_q$  und der Anzahl der Elemente, die gerade bedient werden. Unter Verwendung der Gleichung 2-3 gilt für die Erwartungswerte von  $L$ :

$$E(L) = E(L_q) + \frac{\lambda}{\mu} = E(L_q) + \rho \quad (\text{Gl. 2-5})$$

mit

$E(L)$  Erwartungswert der Anzahl der Elemente im Gesamtsystem

$E(L_q)$  Erwartungswert der Länge der Warteschlange (Anzahl Elemente)

$\lambda$  Ankunftsrate

$\mu$  Bedienrate

$\rho$  Belegungsgrad

Ebenso wie die Anzahl der Elemente im Bediensystem setzt sich die Wartezeit der Elemente aus zwei Teilen zusammen. Die Gesamtwartezeit  $D$  (delay) eines Elements im System besteht aus der Wartezeit  $W_q$  der Elemente, welche sie in der Warteschlange verbringen, und der Wartezeit  $s$  in der Bedienstelle (Bedienzeit oder service time) zusammen.

$$E(D) = E(W_q) + E(S) = E(W_q) + \frac{1}{\mu} \quad (\text{Gl. 2-6})$$

mit

$E(D)$  Erwartungswert der Gesamtwartezeit (delay)

$E(W_q)$  Erwartungswert der Wartezeit in der Warteschlange

$E(S)$  Erwartungswert der Bedienzeit (service time)

$\mu$  Bedienrate

LITTLE (1961) entwickelte eine Formel, welche den Zusammenhang zwischen Wartezeit und der Anzahl der Elemente im System herstellt. Nach LITTLE (1961) kann dieser Zusammenhang wie folgt beschrieben werden:

$$E(T_A) \cdot E(L_q) = \frac{1}{\lambda} \cdot E(L_q) = E(W_q) \quad (\text{Gl. 2-7})$$

mit

$\lambda$  Ankunftsrate

$E(L_q)$  Erwartungswert der Länge der Warteschlange (Anzahl Elemente)

$E(W_q)$  Erwartungswert der Wartezeit in der Warteschlange

$E(T_A)$  Erwartungswert der Zwischenankunftszeiten

Unter Verwendung von Gleichung 2-5 und Gleichung 2-6 kann die von LITTLE aufgestellte Formel auch auf den Zusammenhang zwischen dem Erwartungswert der Gesamtwartezeit  $E(D)$  und der Anzahl aller Elemente im System  $E(L)$  übertragen werden, sodass gilt:

$$E(L) = \lambda \cdot E(D) \quad (\text{Gl. 2-8})$$

mit

$E(L)$  Erwartungswert der Anzahl der Elemente im Gesamtsystem

$E(D)$  Erwartungswert der Gesamtwartezeit (delay)

$\lambda$  Ankunftsrate

## 2.2 Bedientheorie in der Verkehrstechnik

Die einfachste Form eines Bediensystems in der Verkehrstechnik ist die Kreuzung zweier Einbahnstraßen ohne Lichtsignalanlage, dargestellt in Bild 2-2. Die Verkehrsstärke der untergeordneten Zufahrt (Nebenstrom) wird mit  $q_n$  (non-priority), die der bevorrechtigten Straße (Hauptstrom) mit  $q_p$  (priority) bezeichnet.

Die aus der Nebenrichtung kommenden Fahrzeuge stellen den Ankunftsstrom im Sinne der Warteschlangentheorie dar. Dabei wird die Ankunftsrate  $\lambda$

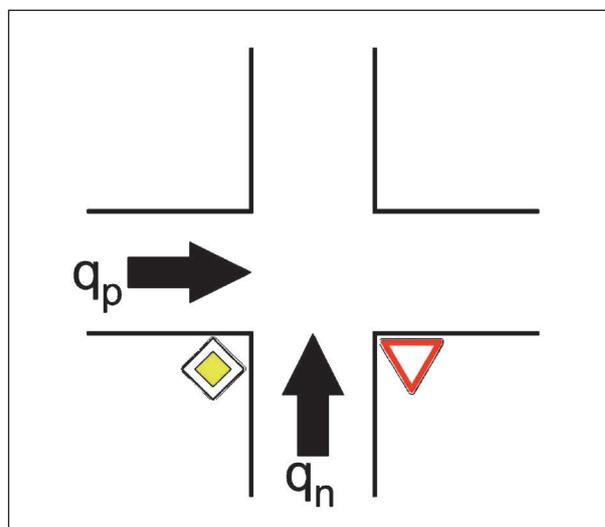


Bild 2-2: Einfaches Modell einer Kreuzung zweier Einbahnstraßen ohne Lichtsignalanlage

durch die Verkehrsstärke des Nebenstroms  $q_n$  abgebildet. Die Zeit, die ein Fahrzeug des Nebenstroms in erster Position der Warteschlange, also an der Haltlinie, verbringt, ist die Bedienzeit  $s$  im Sinne der Warteschlangentheorie. Die Zeit, die Fahrzeuge in einer höheren Position als der ersten in der Schlange verbringen, ist die Wartezeit  $W$  im Sinne der Bedientheorie. Die Haltlinie stellt somit die Bedienstelle dar. Die Bedienung eines Fahrzeuges findet statt, wenn eine genügend große Lücke im Hauptstrom auftritt, damit das in erster Position des Nebenstroms wartende Fahrzeug den Hauptstrom durchqueren kann. Die Fahrzeuge der Nebenrichtung, welche den Hauptstrom durchquert haben, stellen den Abgangsstrom im Sinne der Bedientheorie dar und haben keinen Einfluss mehr auf das System. Weiterhin kann die Bedienrate  $\mu$  der Kapazität  $C$  des Nebenstroms gleichgesetzt werden.

Der Auslastungsgrad  $x$  beschreibt das Verhältnis von Verkehrsstärke zu Kapazität und ergibt sich somit aus:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{q_n}{C} = x \quad (\text{Gl. 2-9})$$

mit

$\rho$  Belegungsgrad

$\lambda$  Ankunftsrate

$\mu$  Bedienrate

$q_n$  Verkehrsstärke des Nebenstroms [Kfz/h]

$C$  Kapazität des Nebenstroms [Kfz/h]

$x$  Auslastungsgrad [-]

Auf der Grundlage, dass die Bedienrate  $\mu$  der Kapazität  $C$  entspricht, ergibt sich die mittlere Bedienzeit zu:

$$E(S) = \frac{1}{\lambda} = \frac{3600}{C} \quad (\text{Gl. 2-10})$$

mit

$E(S)$  mittlere Bedienzeit bzw. Erwartungswert der Bedienzeiten [s/Kfz]

$\mu$  Bedienrate [s/Kfz]

$C$  Kapazität [Kfz/h]

## 2.3 Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage

### 2.3.1 M/G/1- und m/M/1-Systeme

Die Verkehrsabläufe an einem Knotenpunkt ohne Lichtsignalanlage lassen sich durch ein Bediensystem der Form  $m/G/1$  beschreiben. Das bedeutet, dass die Fahrzeuge in der Nebenrichtung zufällig eintreffen (Poissonverteilung) und somit die Zeitlücken zwischen den Nebenstromfahrzeugen exponentialverteilt sind ( $M/G/1$ ). Das Bediensystem verfügt über eine Bedienstelle ( $M/G/1$ ). Das erste Fahrzeug in der Warteschlange befindet sich an der Bedienstelle. Die Zeit, die das Fahrzeug in der ersten Position der Schlange verbringt, ist die Bedienzeit und wird maßgeblich durch den Hauptstrom beeinflusst. Es wird angenommen, dass die Zeitlücken im Hauptstrom einer beliebigen, unbekanntem Zufallsverteilung unterliegen ( $M/G/1$ ). Weiterhin werden ein unendlich großer Warteraum und eine Wartedisziplin der Form „first in first out“ (FIFO) angenommen.

Für die Berechnung der mittleren Wartezeit der Fahrzeuge in der Warteschlange (ohne die Wartezeit in der ersten Position)  $W_q$  in einem  $m/G/1$ -Bediensystem kann auf die Pollaczek-Chintschin-Formel zurückgegriffen werden (TRC (1997)).

Der Variationskoeffizient der Bedienzeiten  $\text{Var}K_s$  ist das Verhältnis von der Standardabweichung zum Mittelwert einer zufälligen Verteilung.

$$W_q = \frac{x \cdot S(1 + \text{Var}K_s^2)}{2(1 - x)} \quad (\text{Gl. 2-11})$$

mit

$W_q$  mittlere Wartezeit in der Warteschlange (ohne 1. Position) [s/Kfz]

$x$  Auslastungsgrad [-]

$S$  Wartezeit in der 1. Position (Bedienzeit) [s/Kfz]

$\text{Var}K_s$  Variationskoeffizient der Bedienzeiten  $s$  [-]

$$\text{Var}K_s = \frac{\sigma(S)}{E(S)} \quad (\text{Gl. 2-12})$$

mit

$\text{Var}K_s$  Variationskoeffizient der Bedienzeiten  $s$  [-]

$\sigma(S)$  Standardabweichung der Bedienzeiten  $s$  [s]

$E(S)$  Erwartungswert der Bedienzeiten  $s$  [s]

Eine andere Schreibweise der oben aufgeführten Pollaczek-Chintschin-Formel ist auch in HELLER und LINDENBERG (1978) zu finden. Sie ergibt sich aus Gleichung 2-11 unter Verwendung der Formel von LITTLE (1961) (Gleichung 2-7 und Gleichung 2-8) sowie Gleichung 2-6. Die mittlere Anzahl von Fahrzeugen im Bediensystem ergibt sich dann zu:

$$L = xq_n S \cdot \frac{x^2 + q_n^2 \sigma^2(S)}{2(1-x)} \quad (\text{Gl. 2-13})$$

mit

L mittlere Anzahl von Fahrzeugen im Bediensystem [Kfz]

x Auslastungsgrad [-]

$q_n$  Verkehrsstärke der Nebenrichtung [Kfz/s]

S Wartezeit in der 1. Position [s/Kfz]

$\sigma^2(S)$  Varianz der Bedienzeiten s [s<sup>2</sup>]

Wie Gleichung 2-6 darstellt, setzt sich die Gesamt-wartezeit D aus der Bedienzeit s und der Wartezeit in der Warteschlange  $W_q$  zusammen. Mit der Annahme aus Gleichung 2-10 ergibt sich aus Gleichung 2-11 die mittlere Gesamt-wartezeit D zu:

$$D = \frac{3600}{C} \left( 1 + \frac{x}{1-x} \cdot \frac{1 + \text{Var}K_S^2}{2} \right) \quad (\text{Gl. 2-14})$$

mit

D mittlere Gesamt-wartezeit [s/Kfz]

C Kapazität [Kfz/h]

x Auslastungsgrad [-]

$\text{Var}K_S$  Variationskoeffizient der Bedienzeiten s [-]

Im TRC (1997) wird betont, dass die Bedienzeiten und somit deren Variationskoeffizient  $\text{Var}K_S$  nicht ohne Weiteres zu berechnen sind. Lediglich in zwei Fällen lasse sich der Variationskoeffizient einfach bestimmen. Für den Fall regelmäßiger (deterministischer) Bedienzeiten werden die Fahrzeuge mit einem festen Zeitabstand voneinander bedient. Für die Standardabweichung der Bedienzeiten gilt daher  $\sigma(S) = 0$  und für den Variationskoeffizienten  $\text{Var}K_S = 0$ . Gleichung 2-15 liefert dann die mittlere Gesamt-wartezeit in einem m/D/1-Bediensystem.

$$D = \frac{3600}{C} \left( 1 + \frac{x}{2(1-x)} \right) \quad (\text{Gl. 2-15})$$

mit

D mittlere Gesamt-wartezeit [s/Kfz]

C Kapazität [Kfz/h]

x Auslastungsgrad [-]

Für den zweiten Fall wird angenommen, dass die Zeitlücken im Hauptstrom und somit auch die mittleren Bedienzeiten exponentialverteilt sind. Für den Erwartungswert  $E(S)$  und die Standardabweichung  $\sigma(S)$  gilt dann:

$$E(S) = \sigma(S) = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Gl. 2-16})$$

mit

$E(S)$  Erwartungswert der Bedienzeiten S

$\sigma(S)$  Standardabweichung der Bedienzeiten S

$\lambda$  Parameter der Exponentialverteilung

Daraus folgt für den Variationskoeffizienten:  $\text{Var}K_S = 1$ . Die mittlere Gesamt-wartezeit D für das m/M/1-Warteschlangensystem ergibt sich dann zu:

$$D = \frac{3600}{C} \left( 1 + \frac{x}{1-x} \right) \quad (\text{Gl. 2-17})$$

mit

D mittlere Gesamt-wartezeit [s/Kfz]

C Kapazität [Kfz/h]

x Auslastungsgrad [-]

Im TRC (1997) wird darauf verwiesen, dass keiner der beiden Fälle den Verkehrsablauf an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage exakt widerspiegelt. Dennoch könne der zweite Fall (M/M/1) als Näherungslösung verwendet werden.

Auch wird im TRC (1997) eine allgemeine Formel zur Berechnung der Wartezeiten an Knotenpunkten angegeben. Demnach ergibt sich die durchschnittliche Wartezeit pro Fahrzeug aus:

$$D = D_{\min} \left[ 1 + \frac{\gamma + \varepsilon \cdot x}{1-x} \right] \quad (\text{Gl. 2-18})$$

mit

D Gesamt-wartezeit [s/Kfz]

$\gamma$  und  $\varepsilon$  Konstanten [-]

x Auslastungsgrad [-]

$D_{\min}$  Mindest-wartezeit [s/Kfz]

$D_{\min}$  wird auch als „Adams delay“ bezeichnet und kennzeichnet die Mindestwartezeit, die Fahrzeuge der Nebenrichtung durchschnittlich erfahren. Hierfür, wie auch für  $\gamma$  und  $\varepsilon$ , sind im TRC (1997) entsprechende Formeln mit dem Verweis auf andere Autoren wie TROUTBECK und TANNER angegeben. Für die Berechnung dieser Werte sind allerdings neben Aussagen über die Grenz- und Folgezeitlücken  $t_c$  und  $t_f$  auch Kenntnisse über den Verkehrsablauf in der Hauptrichtung erforderlich. Hierbei spielt beispielsweise die Pulkung der Fahrzeuge eine entscheidende Rolle. Insbesondere diese Kenntnisse sind in der Realität aber nur sehr schwer zu messen oder abzuschätzen, weswegen an dieser Stelle auf weitere Erläuterungen verzichtet wird.

### 2.3.2 M/G2/1-Systeme

Ein auf dem m/M/1- bzw. m/G/1-Warteschlangenmodell basierender Ansatz sieht vor, zwei unterschiedliche Bedienzeiten mit jeweils eigenen Verteilungen zu definieren (TRC (1997))

Die erste Bedienzeit  $S_1$  erfahren Fahrzeuge, die in das System einfahren, ohne dass bereits ein anderes Fahrzeug in der Warteschlange (einschließlich der ersten Warteposition) auf die Bedienung wartet.  $S_1$  entspricht somit der Mindestwartezeit  $D_{\min}$  aus Gleichung 2-18. Die zweite Bedien- bzw. Wartezeit  $S_2$  erfahren Fahrzeuge, wenn sich bereits andere Fahrzeuge vor ihnen in der Warteschlange befinden. Für diese Annahmen ist in BRILON (1995) folgende Gleichung für die Gesamtwartezeit  $D$  zu finden:

$$D = \frac{E(S_1)}{v} + \frac{q_n}{2} \cdot \frac{y \cdot E(S_1^2) + z \cdot E(S_2^2)}{v \cdot y} \quad (\text{Gl. 2-19})$$

mit

$D$  Gesamtwartezeit [s/Kfz]

$E(S_1)$  Erwartungswert von  $S_1$  [s]

$E(S_2)$  Erwartungswert von  $S_2$  [s]

$v$   $y + z$  [-]

$y$   $1 - q_n \cdot E(S_2)$  [-]

$z$   $q_n \cdot E(S_1)$  [-]

$q_n$  Verkehrsstärke der Nebenrichtung [Kfz/s]

BRILON (1995) gibt auch Formeln zur Berechnung von  $E(S_1)$ ,  $E(S_2)$  sowie für  $E(S_1^2)$  und  $E(S_2^2)$  in Ab-

hängigkeit der Grenzzeitlücke  $t_g$ , der Folgezeitlücke  $t_f$  und der Hauptstrombelastung  $q_p$  an. Allerdings wird auch darauf hingewiesen, dass die aufgestellten Formeln nur für den Fall  $t_g = t_f$  gelten und für die realistischere Bedingung  $t_g > t_f$  nur überschlägige Ergebnisse liefern. Zwar existieren auch für diesen Fall Ansätze verschiedener Autoren, welche aber aufgrund ihrer Komplexität in der Praxis kaum einsetzbar sind.

Zudem gelten für diese Ansätze die folgenden Voraussetzungen:

- Die Grenz- und Folgezeitlücken  $t_g$  und  $t_f$  sind konstant.
- Die Zeitlücken im Hauptstrom unterliegen einer Exponentialverteilung.
- Die Verkehrsstärken  $q_p$  und  $q_n$  sind über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant (stationär).

Auch gelten die Formeln nur für Zustände in denen der Knotenpunkt nicht überlastet ist, also für  $x < 1$ . BRILON (1995) stellt fest, dass die Gleichungen, aufgrund dieser Restriktionen, lediglich näherungsweise die Realität an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage wiedergeben, da die vorausgesetzten Bedingungen tatsächlich kaum zu beobachten sind.

### 2.3.3 Zeitabhängige Ansätze

Die bisher vorgestellten Ansätze haben die Nachteile, dass sie nur

- für stationären Verkehrsfluss in Haupt- und Nebenrichtung sowie
- für einen Auslastungsgrad  $x < 1$ .

Gültigkeit besitzen. Diese beiden Bedingungen sind innerorts im Regelfall jedoch nicht erfüllt. Insbesondere im innerstädtischen Bereich unterliegen die Verkehrsstärken starken zeitlichen Schwankungen, womit die Annahme der Stationarität nicht mehr gegeben ist. Für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten wird auf die Verkehrsstärke der Spitzenstunde bzw. einer bestimmten n-ten Stunde zurückgegriffen. Kurzzeitige Überlastungen eines Knotenpunktes müssen deshalb auch innerhalb der betrachteten Stunde hingenommen und von den Modellen berücksichtigt werden. Von Bedeutung sind hier vor allem die Konsequenzen für die Länge der Warteschlange und der Wartezeiten,

welche sich aus der Überlastung ergeben. Wie bereits erwähnt, wächst in einem Bediensystem mit nur einer Bedienstelle die Warteschlange kontinuierlich, wenn gilt:  $\rho \geq 1$ . Unter der Bedingung  $\rho < 1$  nimmt die Länge der Warteschlange kontinuierlich bis  $L_q = 0$  ab. Für die Berechnung der Wartezeiten unter den Bedingungen instationären Verkehrsflusses und einer vorübergehenden Überlastung stellen KIMBER und HOLLIS (1979) ein Näherungsverfahren vor. BRILON (2008) beschreibt dieses Verfahren als eine Art Koordinatentransformation. Demnach liegt dem Verfahren die Idee zugrunde, dass

- für geringe Verkehrsstärken und einen geringen Auslastungsgrad  $x$  der Verkehrsablauf durch ein m/M/1-Bediensystem approximiert werden kann, da sich das System unter diesen Bedingungen sehr schnell an schwankende Verkehrsstärken anpasst,
- für hohe Verkehrsstärken und einen großen Auslastungsgrad  $x$  kann eine lange Warteschlange erwartet werden, was zur Folge hat, dass der zufällige Charakter sowohl von Fahrzeugankünften im Nebenstrom als auch im Bedienprozess zunehmend an Bedeutung für die entstehenden Wartezeiten verliert und diese sich mithilfe eines D/D/1-Bediensystem abbilden lassen.

Die Wartezeit setzt sich dann aus einem stochastischen und einem deterministischen Teil zusammen. Mit der Transformation von KIMBER und HOLLIS (1979) wird ein konsistenter Ansatz für beide Fälle ( $x < 1$  und  $x \geq 1$ ) geliefert. Bild 2-3 zeigt skizzenhaft den Ablauf der Transformation. Die so entstehende Kurve der Wartezeiten weist für  $x < 1$  die Charaktere

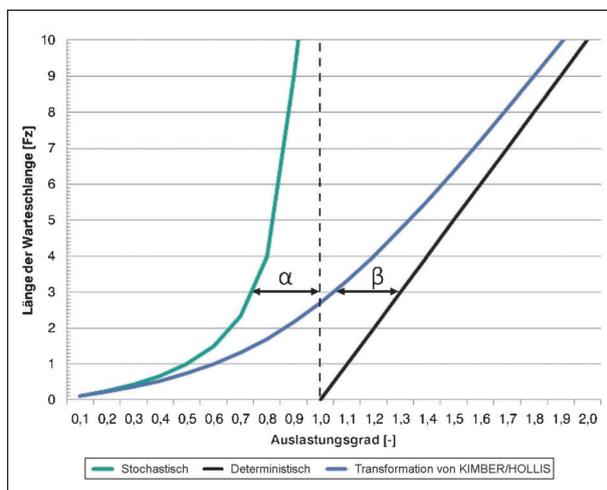


Bild 2-3: Darstellung der Koordinatentransformation nach KIMBER und HOLLIS (1979)

istik eines m/M/1-Modells und für  $x \geq 1$  die eines D/D/1-Modells auf. BRILON (2008) weist darauf hin, dass diese Transformation auch auf Basis der Kapazitätsreserve  $R$  (mit  $R = C - q_n$ ) durchgeführt werden kann.

Für die Bestimmung bzw. den Zusammenhang zwischen den Parametern  $\alpha$  und  $\beta$  gibt BRILON (2008) auf Basis des Auslastungsgrades  $x$  die folgenden Möglichkeiten an:

- A:  $\alpha = \beta$  und
- B:  $\frac{\alpha}{1} = \frac{\beta}{x_D}$ .

Zugleich verweist er jedoch darauf, dass es keinen Grund gibt, eine der beiden Näherungen zu bevorzugen. Es sei lediglich notwendig, den Ansatz zu finden, welcher unter den gegebenen Bedingungen die realistischeren Ergebnisse liefert.

Für den deterministischen Teil des Ansatzes von KIMBER und HOLLIS (1979) zeigt Bild 2-4a die Entwicklung der Verkehrsstärke  $q$  über die Zeit  $t$  in einem D/D/1-System. Es ist zu erkennen, dass für den Zeitraum  $T$  die Verkehrsstärke die Kapazität  $c$  übersteigt. Nach dem Intervall  $T$  ist die Verkehrsstärke  $q_1$  wieder deutlich geringer als die Kapazität  $c_1$ . Hier wird davon ausgegangen, dass nach dem Spitzenintervall  $T$  auch die Verkehrsstärke der Haupttrichtung abnimmt und somit die Kapazität für die Nebenrichtung ansteigt. Es gilt somit:

- $q > c$ ,
- $q > q_1$ ,
- $c < c_1$  und
- $0 \leq q_1 \leq c_1$ .

In Bild 2-4b ist die Anzahl der Fahrzeuge  $N$  (bzw.  $L_q$ ), welche sich in der Warteschlange befinden, dargestellt. Diese ergibt sich aus Differenz der Verkehrsstärke  $q$  und der Kapazität  $c$  zum Zeitpunkt  $t$ .  $N_0$  stellt die Länge der Warteschlange dar, welche bereits vor dem Spitzenintervall zu beobachten ist. Somit kann die obere Linie als Kumulation der ankommenden und die untere Linie als Kumulation der abfließenden Fahrzeuge über die Zeit verstanden werden.

Der Zeitabschnitt  $a$  kennzeichnet die Zeit, die das letzte Fahrzeug, welches im Spitzenintervall  $T$  eingetroffen ist, bis zu seiner Bedienung benötigt. Die Zeit  $a_1$  beschreibt die Dauer der Auflösung der Warteschlange nach dem Spitzenintervall.

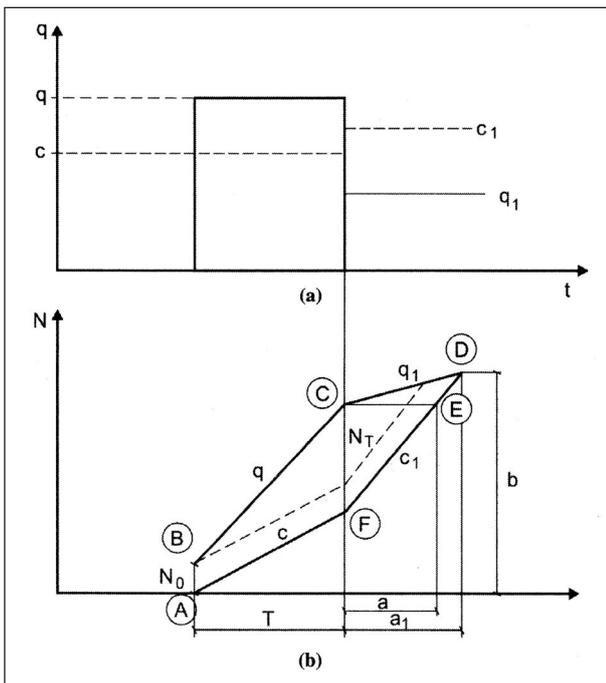


Bild 2-4: Entwicklung der Verkehrsstärke und der Warteschlangenlänge in einem D/D/1-System (Quelle: BRILON (2008))

Die Summe der Wartezeiten in der Warteschlange des deterministischen System  $SW_{q,D}$  ergibt sich nach Bild 2-4b aus der Fläche zwischen den Kurven der Zuflüsse (A-B-C-D) und der Abflüsse (A-F-D). Nach BRILON (2008) berechnet sich  $SW_{q,D}$  für den Fall, dass gilt:  $N_0 > T \cdot c \cdot (1 - x)$ :

$$SW_{q,D} = 0,5 \cdot [N_0 \cdot T + N_T (T + a)] \quad (\text{Gl. 2-20})$$

Ist die Bedingung  $N_0 > T \cdot c \cdot (1 - x)$  nicht erfüllt, so gilt:

$$SW_{q,D} = \frac{N_0^2}{2 \cdot c \cdot (1 - x)} \quad (\text{Gl. 2-21})$$

mit

$SW_{q,D}$  Summe der deterministischen Wartezeiten in der Warteschlange [s]

$N_0$  Länge der Warteschlange zu Beginn des Spitzenintervalls [Kfz]

$N_T$  maximale Länge der Warteschlange [Kfz]

$T$  Länge des Spitzenintervalls [s]

$a$  Zeit, welche das letzte in der Wartezeit ankommende Fahrzeug in der Warteschlange verbringt, bis es bedient wird [s]

Die maximale Länge der Warteschlange  $N_T$  kann berechnet werden mit:

$$N_T = \max \left\{ \begin{matrix} N_0 + c \cdot (x - 1) \cdot T \\ 0 \end{matrix} \right. \quad (\text{Gl. 2-22})$$

mit

$N_T$  maximale Länge der Warteschlange [Kfz]

$N_0$  Länge der Warteschlange zu Beginn des Spitzenintervalls [Kfz]

$C$  Kapazität während des Spitzenintervalls [Kfz/s]

$x$  Auslastungsgrad [-]

$T$  Länge des Spitzenintervalls [s]

Zur Bestimmung der Summe der Wartezeiten in der Warteschlange  $SW_{q,D}$  muss zuvor der Betrachtungszeitraum definiert werden. Hier lassen sich die in Bild 2-5 gezeigten drei Fälle unterscheiden. Fall D1 betrachtet lediglich die Wartezeiten, welche innerhalb des Spitzenintervalls  $T$  zu beobachten sind. Dieser Ansatz ist gebräuchlich, wenn Wartezeiten aus mehreren, aufeinanderfolgenden Intervallen addiert werden (BRILON (2008)).

Fall D2 betrachtet die Wartezeiten, welche die Fahrzeuge erfahren, die innerhalb des Spitzenintervalls  $T$  eintreffen. Die Wartezeit später eintreffender Fahrzeuge wird nicht berücksichtigt. Bei der (empirischen) Ermittlung von Wartezeiten stellt diese Definition den Regelfall dar.

In Fall D3 werden alle Wartezeiten berücksichtigt, die durch die kurzfristige Überlastung bis zum Abbau der Warteschlange entstehen. In diesem Fall werden auch die Wartezeiten der Fahrzeuge berücksichtigt, welche nach dem Ende des Spitzenintervalls  $T$  eintreffen.

Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten aus ökonomischer Sicht ist dies der beste Ansatz, da hier alle sich aus der Überlastung ergebenden Nachteile berücksichtigt werden (BRILON (2008)).

Unabhängig von der Auswahl des zu betrachtenden Intervalls (Fälle D1 bis D3) spiegelt  $SW_{q,D}$  die Summe der Wartezeiten in der Warteschlange wider. Die mittlere Wartezeit ergibt sich dann aus:

$$W_q = \frac{SW_{q,D}}{N} \quad (\text{Gl. 2-23})$$

mit

$W_q$  mittlere Wartezeit in der Warteschlange [s/Kfz]

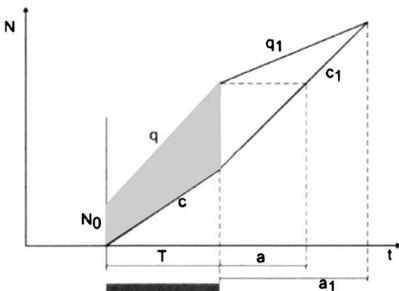
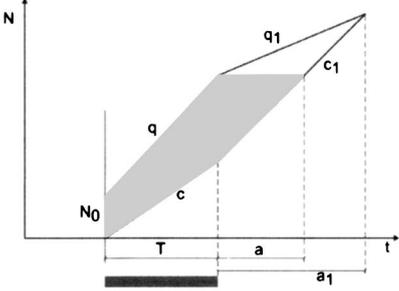
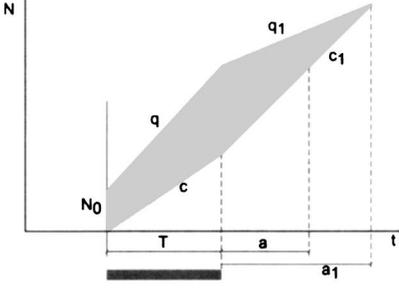
Fall	Entsprechende Fläche in Bild 4b	Gleichung für a zur Berechnung der Summe der deterministischen Wartezeiten
<p>D1</p> 	<p>A B C F</p>	<p><math>a=0</math></p>
<p>D2</p> 	<p>A B C E F</p>	<p><math>a = \frac{N_T}{c_T}</math></p> <p>a entspricht der Wartezeit des letzten Fahrzeugs, welches innerhalb des Spitzenintervalls eintrifft</p>
<p>D3</p> 	<p>A B C D E F</p>	<p><math>a = a_1 = \frac{N_T}{(c_1 - q_1)}</math></p> <p>a<sub>1</sub> entspricht der Zeit, nach welcher die im Spitzenintervall T entstandene Warteschlange vollständig abgebaut ist</p>

Bild 2-5: Betrachtungsfälle zur Bestimmung der Summe der Wartezeiten  $SW_{q,D}$  (Quelle: BRILON (2008))

$SW_{q,D}$  Summe der deterministischen Wartezeiten im Betrachtungsintervall [s]

N Anzahl der betrachteten Fahrzeuge [Kfz]

Neben den Festlegungen zum Betrachtungszeitraum und dem Zusammenhang zwischen den Transformationsparametern  $\alpha$  und  $\beta$  müssen auch für die Kapazitäten  $c$  und  $c_1$  sowie für  $N_0$  zunächst Annahmen getroffen werden.

BRILON (2008) beschreibt den einfachsten Fall wie folgt:

- $N_0 = 0$  (keine Warteschlange zu Beginn des Spitzenintervalls),
- $c = c_1$  (die Kapazität bleibt auch nach Ende des Spitzenintervalls konstant).

Unter Verwendung dieser Annahmen, der Festlegung des Betrachtungszeitraumes nach D2 (siehe

Bild 2-5) und einem Zusammenhang der Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  nach  $\alpha = \beta/x_D$  kann die mittlere Wartezeit in der Warteschlange  $W_q$  wie folgt berechnet werden (BRILON (2008)):

$$W_q = \frac{T}{4} \left[ x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8 \cdot x}{c \cdot T}} \right] \quad (Gl. 2-24)$$

KIMBER und HOLLIS (1979) treffen für ihren Ansatz ebenfalls die Annahme einer leeren Warteschlange zu Beginn des Spitzenintervalls ( $N_0 = 0$ ). Allerdings gehen sie davon aus, dass die Verkehrsnachfrage im Spitzenintervall sowohl in der Nebenrichtung als auch in der Hauptrichtung größer ist als vor und nach dem Spitzenintervall. Somit ergibt sich, dass die Kapazität des Nebenstroms vor und nach dem Spitzenintervall größer ist als innerhalb des Spitzenintervalls ( $c < c_1$ ).

Weiterhin verwenden KIMBER und HOLLIS (1979) für ihre Transformation den Ansatz  $\alpha = \beta$ . Für die Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage ergibt sich so die Formel:

$$D = \left( D_1 + E + \frac{1}{c} \right) \quad (\text{Gl. 2-25})$$

mit

$$D_1 = 0,5 \cdot \left( \sqrt{F^2 + G} - F \right)$$

$$F = \frac{1}{c_1 - q_1} \cdot \left[ \frac{T}{2} \cdot (c - q) \cdot y + P \cdot \left( y - \frac{h}{c} \right) \right] + E$$

$$G = \frac{2 \cdot T \cdot y}{c_1 - q_1} \cdot \left[ P \cdot \frac{q}{c} - (c - q) \cdot E \right]$$

$$E = \frac{P \cdot q_1}{c_1 \cdot (C_1 - q_1)}$$

$$h = c - c + q_1$$

$$y = 1 - \frac{h}{q}$$

und

D mittlere Gesamtwartezeit [s/Kfz]

T Dauer des Spitzenintervalls [s]

c Kapazität des Nebenstroms im betrachteten Spitzenintervall [Kfz/s]

$c_1$  Kapazität des Nebenstroms nach dem Spitzenintervall [Kfz/s]

q Verkehrsstärke des Nebenstroms im betrachteten Spitzenintervall [Kfz/s]

$q_1$  Verkehrsstärke des Nebenstroms nach dem Spitzenintervall [Kfz/s]

P Parameter [-]

Der Parameter P wird in Abhängigkeit der betrachteten Betriebsform des Knotenpunktes festgelegt. Für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage, bei denen von einer zufälligen Verteilung der Fahrzeugankünfte und Bedienzeiten ausgegangen werden kann, geben KIMBER und HOLLIS (1979) den Wert des Parameters mit  $P = 1$  an.

Mithilfe der dargestellten Formel von KIMBER und HOLLIS (1979) (Gleichung 2-25) lassen sich die Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage nach Ansicht von BRILON et al. (1997) sehr

gut abschätzen. Aufgrund ihrer Komplexität eignet sich die Formel jedoch insbesondere für den Einsatz in Computer-Programmen.

Durch Anwendung der Gleichung 2-6 und Gleichung 2-10 ergibt sich die Gesamtwartezeit D dann aus:

$$D = \frac{1}{c} + \frac{T}{4} \left[ x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8 \cdot x}{c \cdot T}} \right] \quad (\text{Gl. 2-26})$$

mit

D mittlere Gesamtwartezeit [s/Kfz]

c Kapazität der Nebenrichtung [Kfz/s]

x Auslastungsgrad [-]

T Dauer des Spitzenintervalls [s]

Die Formel aus Gleichung 2-26 entspricht der von AKÇELIK und TROUTBECK (1991) und wird auch im HCM (2000) sowie im HBS (2015) zur Berechnung der Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage verwendet.

## 2.4 Wartezeiten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage

### 2.4.1 Rein deterministische und rein stochastische Ansätze

Wie auch im Fall von Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage beruht die Berechnung von Wartezeiten an signalgeregelten Knotenpunkten im Grundsatz auf der Warteschlangentheorie.

Die grundlegendste Betrachtungsweise ist jedoch die rein deterministische Berechnung der Wartezeiten, die sich allein durch den Ablauf des (Festzeit-)Signalprogramms ergeben. Diese Art der Berechnung unterstellt einen gleichmäßigen Zu- und Abfluss sowie ein vollständiges Abfließen der aufgestauten Fahrzeuge während der Freigabezeit und liefert somit nur bei niedrigen Auslastungsgraden (bis etwa 0,5) einigermaßen realistische Ergebnisse (ROUPHAIL et al. (2001)).

Um bei der Wartezeitberechnung auch die statistischen Verteilungen der Zu- und Abflüsse zu berücksichtigen, wurden rein stochastische Modelle, basierend auf der Warteschlangentheorie, entwickelt. Dabei wird die Ankunftsrate  $\lambda$  durch die Anzahl der Fahrzeuge charakterisiert, die während der Umlauf-

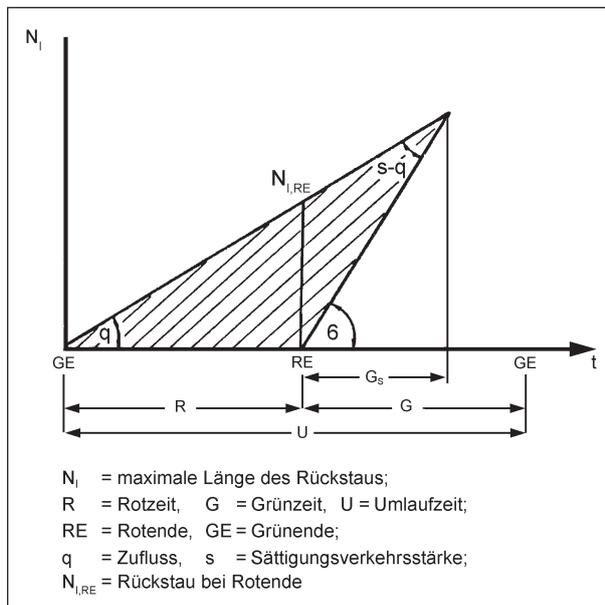


Bild 2-6: Darstellung des Auf- und Abbaus einer Warteschlange durch den reinen Ablauf eines Signalprogramms (deterministische Betrachtung), (Quelle: WU (1990))

zeit eintreffen, die Bedienrate  $\mu$  durch die Menge von Fahrzeugen, die während der effektiven Freigabezeit abfließen können. Dabei sind diejenigen Modelle, die auf rein theoretischen Grundlagen aufbauen, in ihrem Aufbau so komplex und unterliegen solch strengen Annahmen, dass an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden soll. Stattdessen liegt der Fokus auf der laut ROUPHAIL et al. (2001) großen Menge von Modellen, die, teilweise auf Näherungen basierend, daraufhin entwickelt wurden, um besser auf realistische Bedingungen eingehen zu können. Demnach war WEBSTER (1958) einer der ersten, der ein später weit verbreitetes Modell entwickelte, das sowohl einen theoretischen als auch einen durch numerische Simulation erzielten Teil beinhaltet, siehe Gleichung 2-27.

Der erste Term der Formel beschreibt dabei die mittlere Wartezeit unter der Annahme gleichverteilter Ankünfte, der laut WEBSTER (1958) bei niedrigen Auslastungsgraden bereits recht gute Ergebnisse liefert. Der zweite Term berücksichtigt zusätzlich die Zufälligkeit der Ankünfte. Diese beiden ersten Teile besitzen einen rein theoretischen Hintergrund, der letzte Term hingegen basiert allein auf den Ergebnissen numerischer Simulationen.

Insgesamt unterliegen die rein stochastischen Modelle, auch wenn sie approximative Komponenten enthalten, dennoch recht starken und einschränkenden Annahmen. Die zugrunde liegende Warteschlangentheorie unterstellt ein stochastisches

Gleichgewicht, dass laut ROUPHAIL et al. (2001) nur bei unendlichem Zeithorizont sowie stabilem Verkehrszustand erreicht werden kann. Somit sind die rein stochastischen Modelle nur bei geringem Auslastungsgrad in der Lage, realistische Ergebnisse zu liefern.

In der Realität sind diese Annahmen aus verschiedenen Gründen nicht haltbar. Für die Bestimmung der Leistungsfähigkeit eines Knotenpunkts ist nach dem HBS (2015) die Bemessungsverkehrsstärke relevant, die durch die Verkehrsstärke in der  $n$ -ten Stunde eines Jahres festgelegt ist oder die durch Messungen in der Hauptverkehrszeit ermittelte Verkehrsstärke innerhalb der entsprechenden Spitzenstunde. Damit ist die zu betrachtende Zeitspanne automatisch ein wohl definiertes und abgeschlossenes Zeitintervall.

Auch liegt die Verkehrsstärke innerhalb der Bemessungsstunde im Allgemeinen in dem Bereich um die Kapazität herum oder übersteigt diese sogar. Laut WU (1990) werde sogar auf Auslastungsgrade in der Größenordnung von 1,0 innerhalb der Spitzenzeiten in der Praxis abgezielt. Den Fall einer Überlastung oder auch eines Auslastungsgrades knapp unterhalb der Kapazität sind die rein stochastischen Modelle nicht in der Lage realistisch abzubilden. ROUPHAIL et al. (2001) argumentieren, dass für eine Auslastung nahe oder oberhalb der Kapazität die Warteschlange theoretisch auf eine unendliche Länge anwachsen würde, ohne dass sich das stochastische Gleichgewicht einstellt.

$$d = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left( \frac{c}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} x^{(2+5\lambda)} \quad (\text{Gl. 2-27})$$

mit

- $d$  mittlere Wartezeit pro Fahrzeug [s]
- $c$  Umlaufzeit [s]
- $\lambda$  effektiver Freigabezeitanteil, d. h.  $\lambda = g/c$  [-]
- $q$  Verkehrsstärke [Fz/s]
- $s$  Sättigungsverkehrsstärke [Fz/s]
- $x$  Auslastungsgrad, d. h.  $x = q/\lambda s$  [-]

Zusätzlich unterstellen diese Modelle einen stationären Verkehrsfluss, der gerade innerorts in den Spitzenstunden nicht der Realität entspricht. Genauere Ausführungen hierzu finden sich in den entsprechenden Kapiteln dieses Berichts.

### 2.4.2 Zeitabhängige Wartezeitmodelle

Um die im vorherigen Kapitel zuletzt beschriebenen Schwachstellen und die zugrundeliegenden Annahmen der rein stochastischen Modelle zu vermeiden, sind nach ROUPHAIL et al. (2001) verschiedene Herangehensweisen möglich.

Der Ansatz, der sich aufgrund seiner Qualität durchsetzen konnte, ist auch für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage die Koordinatentransformation nach KIMBER und HOLLIS (1979), die im Abschnitt über Wartezeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage bereits vorgestellt wurde. Daher soll das Verfahren an dieser Stelle nicht noch einmal vertieft werden.

Dennoch ist anzumerken, dass nach Aussage von ROUPHAIL et al. (2001) die im Modell von KIMBER und HOLLIS (1979) enthaltene modifizierte Pollaczek-Chintschin-Formel für den stochastischen Teil für den Fall eines Knotenpunktes mit Lichtsignalanlage weniger gut geeignet ist, da Teile dieser Formel dann je nach aktueller Situation entsprechend angepasst bzw. kalibriert werden müssten. Um in der Tradition von WEBSTER (1958) einfach anwendbare und robuste Modelle für signalisierte Knotenpunkte zu erhalten, verwendet AKÇELIK (1980) die Technik der Koordinatentransformation nach KIMBER und HOLLIS (1979), jedoch mit verschiedenen Varianten der zugrunde liegenden stochastischen bzw. deterministischen Berechnung der Warteschlangenlänge. Auf die verschiedenen von AKÇELIK (1980) entwickelten Modelle soll bei der Betrachtung der Wartezeitberechnung im HBS (2015) noch genauer eingegangen werden.

Ein weiterer, von WU (1990) in seiner Dissertation entwickelter, Ansatz basiert auf Markow-Ketten, mit deren Hilfe Rückstaulängen und Wartezeiten numerisch exakt bestimmt werden können. Aufgrund der dafür umfangreichen Berechnungen, entwickelt er außerdem weitere Näherungsformeln, die auch Instationaritäten des Verkehrsflusses berücksichtigen.

### 2.4.3 Die Wartezeitberechnung für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage nach HBS (2015)

Im Folgenden sollen nun die Berechnungsformeln für die Wartezeit an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage aus dem aktuellen HBS (2015) genauer beleuchtet und Bezug auf ihre Herkunft genommen

werden. Für die Bestimmung der Bestandteile dieser Formeln, auf die an dieser Stelle nicht explizit eingegangen wird, sei auf das HBS (2015) verwiesen.

Die Gleichungen 2-28 bis 2-30 dienen der Berechnung der Gesamtwarezeit  $t_{W,j}$  pro Fahrzeug auf dem Fahrstreifen  $j$ , die sich aus der Grundwarezeit  $t_{W,G,j}$ , die allein durch den Ablauf des Signalprogramms entsteht, und der Wartezeit aufgrund eines Rückstaus bei Freigabezeitende  $t_{W,R,j}$ , zusammensetzt.

$$t_{W,j} = t_{W,G,j} + t_{W,R,j} \quad (\text{Gl. 2-28})$$

mit

$t_{W,j}$  mittl. Wartezeit eines Kfz auf dem FS  $j$  [s]

$t_{W,G,j}$  Grundwarezeit aufgrund des periodischen Wechsels zwischen Freigabe- und Sperrzeit auf dem FS  $j$  [s]

$t_{W,R,j}$  Wartezeit aufgrund des Rückstaus bei Freigabezeitende auf dem FS  $j$  [s]

$$t_{W,G,j} = \frac{t_U \cdot (1 - f_{A,j})^2}{2 \cdot \left(1 - \frac{q_j}{q_{S,j}}\right)} \quad (\text{Gl. 2-29})$$

mit

$t_{W,G,j}$  Grundwarezeit aufgrund des periodischen Wechsels zwischen Freigabe- und Sperrzeit auf dem FS  $j$  [s]

$t_U$  Umlaufzeit [s]

$f_{A,j}$  Abflusszeitanteil des FS  $j$  [-],  $f_{A,j} = t_{A,j}/t_U$  mit Abflusszeit des FS  $j$  [s],  $t_{A,j} = t_{F,j} + 1\text{s}$  ( $t_{F,j}$  Freigabezeit Strom  $j$  [s])

$q_j$  Verkehrsstärke auf dem FS  $j$  [Kfz/h]

$q_{S,j}$  Sättigungsverkehrsstärke auf FS  $j$  [Kfz/h]

$$t_{W,R,j} = \frac{N_{GE,j} \cdot 3600}{C_{0,i,j}} \quad (\text{Gl. 2-30})$$

mit

$t_{W,R,j}$  Wartezeit aufgrund des Rückstaus bei Freigabezeitende auf dem FS  $j$  [s]

$N_{GE,j}$  mittl. Rückstau bei Freigabezeitende für den Betrachtungszeitraum auf FS  $j$  [Kfz]

$C_{0,i,j}$  Kapazität des Stroms  $i$  auf FS  $j$  [Kfz/h]

Die gesamte Wartezeit pro Fahrzeug ergibt sich also als Summe der Wartezeit, die dadurch ent-

steht, dass während der Sperrzeit ankommende Kfz warten müssen, bis sie während der Freigabezeit abfließen können, und der Wartezeit, die noch hinzukommt, falls sich die Warteschlange aller aufgestauten Fahrzeuge während der entsprechenden Freigabezeit nicht auflösen kann.

Die durch den reinen Ablauf des Signalprogramms entstehende Wartezeit ist somit von der Berechnung her eindeutig und wird in exakt dieser Form z. B. von WEBSTER (1958), AKÇELIK (1980) oder auch WU (1990) verwendet.

Der zweite Teil der Gesamtwartezeit, der laut WU (1990) durch Überlastungen und die Instationarität im Zufluss entsteht, basiert auf der Bestimmung der mittleren Rückstaulänge. Die Art und Weise, diese zu berechnen, mache demnach grundsätzlich den Unterschied der vielen verschiedenen Modelle zur Ermittlung der mittleren Wartezeit aus.

Im HBS (2015) wird für die Berechnung der mittleren Rückstaulänge der in Gleichung 2-33 folgende Ausdruck verwendet.

Für die genauere Betrachtung dieser Formel sollen die Faktoren 0,58 und  $f_{in,j}$  zunächst außer acht gelassen werden.

Diese Gleichung stimmt mit der obigen Einschränkung mit einer von AKÇELIK (1980) entwickelten Formel überein:

$$N_o = \frac{Q \cdot t}{4} \cdot \left[ (x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{4 \cdot x}{Q \cdot t}} \right] \quad (\text{Gl. 2-31})$$

mit

$N_o$  mittl. Rückstau (average overflow queue) [Kfz]

$t$  betrachteter Zeitraum [h]

$Q$  Kapazität [Kfz/h]

$x$  Auslastungsgrad [-]

Diese Formel ist das Ergebnis einer Koordinatentransformation nach der Art von KIMBER und HOLLIS (1979), enthält aber „einige geringfügige vereinfachende Annahmen“ (AKÇELIK (1980), S. 10), die aber nicht näher ausgeführt werden.

Der zugrundeliegende Ausdruck für die deterministische Komponente wird von ihm in der Veröffentlichung hergeleitet und lautet:

$$N_d = \frac{(1 - x) \cdot Q \cdot t}{2} \quad (\text{Gl. 2-32})$$

mit

$N_d$  mittl. Rückstau, rein deterministische Berechnung [Kfz]

$x$  Auslastungsgrad [-]

$C$  Kapazität [Kfz/h]

$T$  betrachteter Zeitraum [h]

$N_{GE,j} =$

$$\max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,58 \cdot T \cdot C_{0,i,j}}{4} \cdot \left[ (f_{in,j} \cdot x_j - 1) + \sqrt{(f_{in,j} \cdot x_j - 1)^2 + \frac{4 \cdot f_{in,j} \cdot x_j}{0,58 \cdot T \cdot C_{0,i,j}}} \right] \\ \frac{T \cdot C_{0,i,j}}{4} \cdot \left[ (x_j - 1) + \sqrt{(x_j - 1)^2 + \frac{4 \cdot x_j}{T \cdot C_{0,i,j}}} \right] \end{array} \right. \quad (\text{Gl. 2.33})$$

mit

$N_{GE,j}$  mittl. Rückstau bei Freigabezeitende für den Betrachtungszeitraum auf FS j [Kfz]

$T$  Betrachtungszeitraum (i. d. R.  $T = 1\text{h}$ ) [h]

$C_{0,i,j}$  Kapazität des Stroms i auf FS j [Kfz/h]

$f_{in,j}$  Instationaritätsfaktor für den FS j [-]

$x_j$  Auslastungsgrad des FS j [-]

Die stochastische Komponente (deren Kurve, bildlich gesprochen, bei der Koordinatentransformation an die „deterministische Gerade“ herangekippt wird) stammt nach Aussage von AKÇELIK (1980) von MCNEIL (1968) und stellt nach Aussagen beider Autoren eine Abgrenzung nach oben (einen upper-bound-Ausdruck) für Poisson-verteilte Ankünfte dar:

$$N_s = \frac{1}{2 \cdot (1 - x)} \quad (\text{Gl. 2-34})$$

mit

$N_s$  mittl. Rückstau, rein stochastische Berechnung [Kfz]

$x$  Auslastungsgrad [-]

Demnach ist laut AKÇELIK (1980) auch die Formel für die mittlere Rückstaulänge (Gleichung 2-31) „upper bound“ und liefert, gerade im Bereich von Auslastungsgraden kleiner Eins, etwas größere Werte als eine andere, in der gleichen Veröffentlichung beschriebene, Formel, die zwar ebenfalls über eine Koordinatentransformation nach KIMBER und HOLLIS (1979) entsteht, aber eine andere zugrunde liegende stochastische Komponente enthält.

WU (1990) greift in seiner Dissertation zur Entwicklung seiner Näherungsformel gerade auf diese andere Formel von AKÇELIK (1980) zurück. Auch ROUPHAIL et al. (2001) zitieren in ihrem umfassenden Überblick zum Verkehrsfluss an signalisierten Knotenpunkten diese Formel.

Der Autor selbst verfolgt ebenfalls diese andere Formel weiter, beispielsweise um in AKÇELIK und ROUPHAIL (1993) eine verallgemeinerte Variante zur Berücksichtigung verschiedener Nachfragebedingungen zu entwickeln.

Das US-amerikanische Highway Capacity Manual (HCM (2010)) greift bei der Berechnung von Wartezeiten an signalisierten Knotenpunkten ebenfalls darauf zurück. WU (1990) äußert sich allerdings gegenüber der anderen Formel von AKÇELIK (1980) in ihrer ursprünglichen Form kritisch, da sie mögliche Instationaritäten im Verkehrsfluss nur unzureichend berücksichtige und somit zu niedrige Werte für die mittlere Rückstaulänge liefere.

Nach der Darstellung der Herkunft der Formel für die mittlere Rückstaulänge im HBS (2015) sollen nun die bisher nicht berücksichtigten Faktoren 0,58 und  $f_{in,j}$  genauer beleuchtet werden. Diese Faktoren dienen der Einbeziehung von Instationarität der Verkehrsstärke in der Bemessungsstunde. Dabei erfolgt gewissermaßen eine Korrektur der Länge des betrachteten Zeitraums sowie des mittleren Auslastungsgrades, Bild 2-7 stellt diesen Zusammenhang anschaulich dar. Der Faktor 0,58 verringert also die in die Berechnung eingehende Dauer des betrachteten Zeitintervalls, das im Allgemeinen eine Stunde beträgt, auf effektiv etwa 35 Minuten. Gleichzeitig hebt der Instationaritätsfaktor  $f_{in,j}$  (siehe Gleichung 2-35), der stets einen Wert von mindes-

tens 1,0 aufweist, den für die Berechnung zu verwendenden mittleren Auslastungsgrad um den sich ergebenden Wert an. Bildlich lässt sich der Einfluss dieser Faktoren auch als eine Stauchung des Bemessungszeitraums darstellen, in der Art, dass der Anteil der stündlichen Belastung, der einen Rückstau nach Freigabezeitende verursacht, in diesem verkürzten Intervall zusammengefasst wird und in diesem eine quasi-dauerhafte Überlastung in Höhe des Produkts aus Instationaritätsfaktor und mittlerer stündlicher Verkehrsstärke herrscht. Die Auswirkung dieser „künstlich in der Mitte“ aggregierten Überlastung als Länge des mittleren Rückstaus berechnet sich dann über die anfangs dargestellte Formel von AKÇELIK (1980), Gleichung 2-31.

$$f_{in,j} = 1 + \frac{\left(\frac{q_{15,j}}{q_j} - 1\right)}{1,5} \tag{Gl. 2-35}$$

mit

- $f_{in,j}$  Instationaritätsfaktor für den FS j [-]
- $q_{15,j}$  Verkehrsstärke im höchstbelasteten 15-min-Intervall der betrachteten Stunde auf dem FS j [Kfz/h]
- $q_j$  Verkehrsstärke der betrachteten Stunde auf dem FS j [Kfz/h]

Der Instationaritätsfaktor aus dem HBS (2015) wurde von WU (1990) entwickelt. In Verbindung mit weiteren Faktoren und Anpassungen dient er der Einbeziehung von Instationarität der Verkehrsstärke unter Berücksichtigung der Ganglinienform in den von ihm entwickelten Näherungsformeln zur Berechnung der Wartezeiten. Eine genauere Betrachtung hierzu findet sich in Kapitel 2.5 zu Instationaritäten im Verkehrsfluss.

Die Herkunft des Faktors 0,58 ist im HBS (2015) in der vorliegenden Fassung nicht dokumentiert. In WU (1990) sind jedoch für die in seinen Näherungsformeln zu verwendenden Faktoren für drei unterschiedliche Ganglinienarten Werte tabelliert. Dabei weist der Faktor zur Korrektur des betrachteten Zeitintervalls im Falle einer parabelförmigen Ganglinie den Wert 0,582 auf.

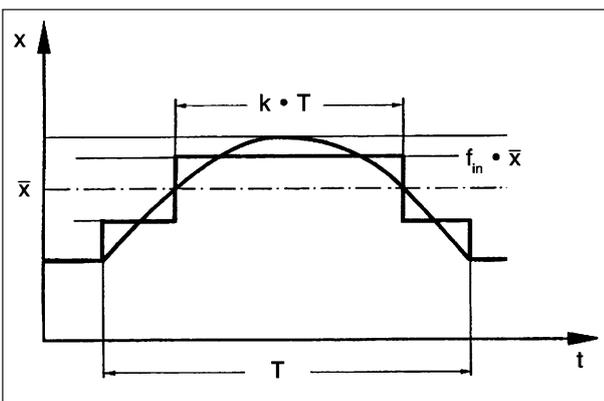


Bild 2-7: Anschauliche Erklärung des Instationaritätsfaktors anhand einer Ganglinie in Parabelform (verändert nach WU (1990))

## 2.5 Instationarität im Verkehrsfluss in Bezug auf die Berechnung von Wartezeiten

Auf die in den vorangegangenen Kapiteln bereits mehrfach angesprochene Problematik der Instationarität soll nun, vor allem in Bezug auf ihre Auswirkungen und die Berücksichtigung bei der Berechnung von Wartezeiten an Knotenpunkten, näher eingegangen werden.

Nachdem die bereits behandelten zeitabhängigen Wartezeitmodelle unter anderem aufgrund unrealistischer Annahmen zu stationären Verkehrszuständen, die nach ROUPHAIL et al. (2001) gerade während der Spitzenstunden nur selten auftreten und auf denen die rein stochastischen Modelle aufbauen, entwickelt wurden, kann von einem gewissen Konsens zur Existenz und Relevanz von Instationarität ausgegangen werden.

Daher stellt sich die Durchführung einer Literaturanalyse, explizit zum Thema der Instationarität im Zusammenhang mit der Berechnung von Wartezeiten, insofern als nicht ganz einfach dar, da dieser Aspekt in vielen Veröffentlichungen teilweise nur als Randbedingung beschrieben und behandelt wird. Wird von einem Autor das Thema Instationarität angesprochen, so sind in den meisten Fällen auch Aussagen zur Notwendigkeit der Berücksichtigung zu erkennen.

### 2.5.1 Definition und Nachweis von Instationarität

In der generellen Bedeutung ist Stationarität und damit auch der gegensätzliche Fall der Instationarität ein essentieller Aspekt der Zeitreihenanalyse, die auf der Bedingung stationärer Daten basiert. Dabei wird zwischen zwei verschiedenen starken Definitionen unterschieden. Eine Zeitreihe erfüllt die Bedingung strenger Stationarität, wenn jede beliebige aufeinanderfolgende Anzahl an Beobachtungen dieselbe gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung aufweist. Stimmen lediglich der Mittelwert und die Varianz überein, so ist die Zeitreihe (schwach) stationär (WASHINGTON et al. (2011)).

Stationarität im Verkehrskontext im Zusammenhang mit dem Verkehrsfluss wird von WU (1990) so beschrieben, dass die Verkehrsstärke nicht von der Zeit abhängt und zusätzlich der Auslastungsgrad kleiner Eins bleibt. Entsprechend liegt Instationarität vor, wenn sich die Verkehrsstärke im Verlauf der

Zeit ändert und somit auch der Auslastungsgrad nicht konstant über die Zeit ist. Zusätzlich könne im Falle von Instationarität dieser sowohl unter- als auch oberhalb von Eins liegen (WU (1990)).

Ein Nachweis, dass ein Verkehrsfluss instationär ist, ist kaum auffindbar. Es wird entweder mit verschiedenen möglichen Tests nachgewiesen oder versucht nachzuweisen, dass Stationarität vorliegt, um bestimmte Verfahren oder Modelle anwenden zu können, oder es wird, gerade im Verkehrskontext, zwar explizit auf die Behandlung der Instationarität eingegangen, sie aber als gegebene Rahmenbedingung oder auch Problem dargestellt.

So entwickelt beispielsweise JACOBS (1979) einen Stationaritätstest für Zeitlückenfolgen, genau aus dem Grund, konventionelle statistische Methoden auf Zeitlückenfolgen anzuwenden. Zusätzlich wäre ein solcher Test im hier untersuchten Zusammenhang, gerade in der Praxis, kaum durchführbar, da hierfür die Verfügbarkeit von Einzelfahrzeugdaten unumgänglich ist.

Ein Verfahren, das Daten zum Verkehrsaufkommen explizit auf Instationarität untersucht, wird von VLAHOGIANNI et al. (2006) vorgestellt. Dieses basiert jedoch allein auf dem visuellen Auffinden von Änderungen im statistischen Verhalten der Daten und benötigt dafür weiterhin recht lange Zeitintervalle. Insofern ist auch dieser Ansatz für die Feststellung oder gar Quantifizierung von Instationaritäten im Zufluss an Knotenpunkten ungeeignet.

### 2.5.2 Auswirkungen von Instationarität und deren Berücksichtigung bei der Berechnung von Wartezeiten

Um Instationarität bei der Wartezeitberechnung zu berücksichtigen, existieren zwei grundlegende Ansätze: sogenannte High-Definition- und Low-Definition-Formeln. Dabei wird bei der Verwendung von High-Definition die Ganglinie möglichst genau nachgebildet, um keine bis nur wenig Information zu verlieren, Low-Definition hingegen vereinfacht diese so weit wie möglich. Eine anschauliche Darstellung dieser beiden Ansätze liefert Bild 2-8.

Nach WU (1990) beinhalten beispielsweise die Formeln von KIMBER und HOLLIS (1978) sowie von CATLING (1977) einen High-Definition-Ansatz. Deren Autoren sind sich einig darüber, dass gerade während der Spitzenstunden auf jeden Fall die Schwankungen der Verkehrsnachfrage, inklusive

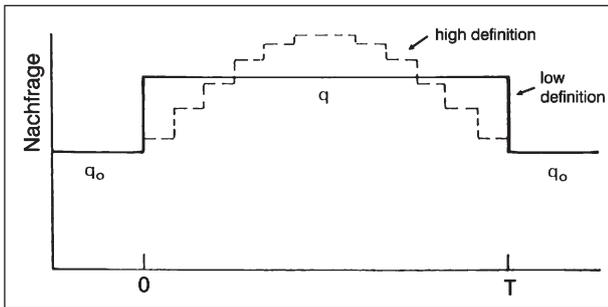


Bild 2-8: Modellierung von Verkehrsstärke-Ganglinien nach dem High-Definition- und Low-Definition-Ansatz (nach KIMBER und HOLLIS (1979))

Zu- und Abnahmen, möglichst realistisch berücksichtigt werden müssen, um die Wartezeiten im vollen Ausmaß berechnen zu können. Einen Low-Definition-Ansatz verwendet AKÇELIK (1980), den WU (1990) dahingehend kritisiert, dass die damit berechneten Wartezeiten deutlich zu niedrig ausfallen. Er begründet dies damit, dass eine realistische Ganglinie mit einer Nachfragespitze sich auf den Aufbau eines Rückstaus wesentlich anders auswirke als eine abgeflachte Low-Definition-Ganglinie. Weiterhin bemerkt WU (1990), dass je stärker die Instationarität ansteigt, desto mehr verlängern sich die Rückstaulänge und damit auch die Wartezeiten.

CATLING (1977) sagt aus, dass die Form eines Nachfrageprofils berücksichtigt werden müsse. Die von ihm entwickelten Formeln dazu sind allerdings recht komplex. Auch KIMBER et al. (1977) beschreiben drei verschiedene Nachfragemuster, die zu betrachten sind.

Die von WU (1990) entwickelte „theoretisch-empirische Wartezeit-Formel für den instationären Verkehr“ (Berechnung der mittleren Rückstaulänge siehe Gleichung 2-36) nimmt auf die Form der Nachfrage-Ganglinie über mehrere verschiedene Parameter Bezug. Die möglichen mathematischen Darstellungen von Ganglinientypen, die seiner Aussage nach am meisten verwendet werden und die bei der Berechnung berücksichtigt werden können sowie die anschauliche Bedeutung der einzelnen Parameter sind in Bild 2-9 und Bild 2-10 dargestellt. Bild 2-11 zeigt außerdem die hierfür je nach Ganglinientyp zu verwendenden Werte bzw. die Ableitung der benötigten Werte aus der Spanne  $z$  der Ganglinienfunktion.

Es ist also zu erkennen, dass WU (1990) die Charakteristik der Ganglinien möglichst genau in seiner Näherungsformel abzubilden versucht. Allerdings

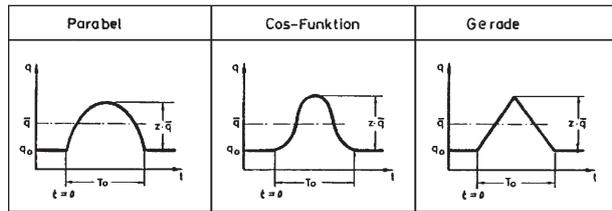


Bild 2-9: Ganglinienformen, die WU (1990) für seine Berechnungen verwendet (Quelle: WU (1990))

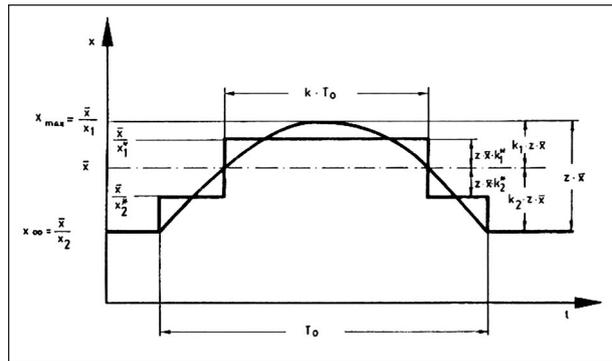


Bild 2-10: Grafische Darstellung der ganglinienformabhängigen Parameter für die Berechnung der Rückstaulänge nach WU (1990), (Quelle: WU (1990))

Gln. Form	$k_1$	$k_2$	$k_1'$	$k_2'$	$x_1$	$x_2$	$x_1'$	$x_2'$	$k$
Parabel	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{9}$	0,31	$\frac{1}{1+1/3 \cdot z}$	$\frac{1}{1-2/3 \cdot z}$	$\frac{1}{1+2/9 \cdot z}$	$\frac{1}{1-0,31 \cdot z}$	0,582
Cos	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0,32	0,32	$\frac{1}{1+1/2 \cdot z}$	$\frac{1}{1-1/2 \cdot z}$	$\frac{1}{1+0/32 \cdot z}$	$\frac{1}{1-0/32 \cdot z}$	0,5
Gerade	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{1+1/2 \cdot z}$	$\frac{1}{1-1/2 \cdot z}$	$\frac{1}{1+1/4 \cdot z}$	$\frac{1}{1-1/4 \cdot z}$	0,5

Bild 2-11: Tabelle mit den ganglinienabhängigen Parametern für die Berechnung der Rückstaulänge nach WU (1990), (Quelle: WU (1990))

ist anzumerken, dass hierbei eine Symmetrie der Ganglinie unterstellt wird. Der Autor berücksichtigt zwar in seiner numerisch exakten Wartezeit-Berechnung auch asymmetrische Verläufe, in der Näherungsformel jedoch nicht mehr in dieser expliziten Form. Einzig bei Nichtvorhandensein einer Ganglinie und alleiniger Verfügbarkeit von viertelstündlichen Auslastungsgraden wird wieder auf einen möglichen asymmetrischen Verlauf eingegangen.

$$N_o = \begin{cases} \frac{Q \cdot T_o}{4} \cdot \left[ \bar{x} - 1 + \sqrt{(1 - \bar{x})^2 + \frac{12(\bar{x}' - x_o)}{Q \cdot T_o}} \right] & \bar{x}' > x_o \\ & \bar{x} < x_2^* \\ \frac{Q \cdot T_o}{4} \cdot \left[ \bar{x} - 1 + \sqrt{(1 - \bar{x})^2 + \frac{12[(1 - x_o) \cdot x_1^* - (1 - \bar{x})]}{Q \cdot T_o}} \right] & \bar{x} > x_o \cdot x_1^* \\ & \bar{x} > x_2^* \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{(Gl. 2-36)}$$

mit

- $N_o$  mittlere Rückstaulänge [Kfz]
- $Q$  maximale Abfluss-Stärke der Zufahrt [Kfz/s]

$\bar{x}$	mittlerer Auslastungsgrad gemittelt über das Zeitintervall $T_o$ [-]
$T_o$	Länge des betrachteten Zeitintervalls [s]
$T_o'$	$T_o \cdot k_T$ [-]
$\bar{x}'$	$\bar{x} \cdot k_x$ [-]
$x_o$	$0,67 + s \cdot G/600$ [-] mit $s$ : Sättigungsverkehrsstärke [Kfz/s] und $G$ : Grünzeit [s]

WU (1990) bemerkt weiterhin, dass in der Praxis eine genaue Auflösung der Daten als Ganglinie oder in 1-Minuten-Intervallen nicht üblich sei und die genauesten verfügbaren Daten in 15-Minuten-Intervallen vorlägen. Aus diesem Grund entwickelt der Autor den später im HBS (2015) sogenannten Instationaritätsfaktor (siehe Gleichung 2-35). Dabei ist zu beachten, dass für die Bemessungsstunde genau das 60 Minuten lange Intervall mit der höchsten Belastung, unabhängig von der genauen Uhrzeit, gewählt wird.

Das US-amerikanische Highway Capacity Manual berücksichtigt Instationarität über den „peak hour factor“ (PHF). Er berechnet sich allerdings auf eine etwas simplere Art und Weise als der Instationaritätsfaktor im HBS (2015).

Dieser bezieht die mittlere stündliche Verkehrsstärke der Bemessungsstunde auf die auf 60 Minuten hochgerechnete mittlere Verkehrsstärke des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls innerhalb dieser Stunde (HCM (2010)).

Bei der Fragestellung der idealen zeitlichen Auflösung der Einzelintervalle zur Berücksichtigung von Instationarität gehen die Meinungen verschiedener Autoren allerdings auseinander.

YI et al. (2009) untersuchen, ob es eine Intervalldauer gibt, die bessere Ergebnisse liefert als der Bezug auf 15 Minuten, kommen aber zu dem Schluss, dass die bisher im Highway Capacity Manual geforderten 15 Minuten als Bezugsintervall gute und stabile Ergebnisse liefern. Als gleichwertige Alternative sehen sie eine Intervalldauer von 10 Minuten an, in kürzeren Intervallen sehen sie keinen Vorteil.

Dem widersprechen aber CATLING (1977) oder auch TRACZ und CHODUR (2011), die gerade in Spitzenstunden Intervalle mit einer Länge von 5 Minuten für angebracht halten. TRACZ und CHODUR (2011) stellen fest, dass bei Verwendung von 15-Mi-

nuten-Intervallen zu wenige Schwankungen in der Verkehrsnachfrage berücksichtigt und damit Wartezeiten so weit unterschätzt werden, dass sowohl die zugehörigen Levels of Service nach dem Highway Capacity Manual als auch die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs nach dem HBS zu gut ausfielen.

## 2.6 Differenzierung weiterer Verlustzeiten an Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage

Ein Fahrzeug, das einen Knotenpunkt mit einer Lichtsignalanlage durchfährt, muss je nach Signalphase unterschiedliche Zeitverluste für das Passieren des Knotenpunkts hinnehmen. Trifft das Fahrzeug während der Sperrzeit ein, so bedeutet dies eine bestimmte Wartezeit für das Fahrzeug. Kommt es hingegen während der Freigabezeit an, so kann das Fahrzeug zügig den Knotenpunkt durchqueren. Ähnlich verhält es sich mit vorfahrtgeregelten Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage. Nähert sich ein Fahrzeug aus einem wartepflichtigen Verkehrsstrom dem Knotenpunkt, so muss es die Vorfahrt der Fahrzeuge des Hauptstroms beachten. Je nach Verkehrsregelung am Knotenpunkt und der Verkehrsstärke auf der bevorrechtigten Fahrbahn muss es Verlustzeiten hinnehmen. Befindet es sich jedoch selbst auf der bevorrechtigten Durchfahrt des Knotenpunkts, so kann es die Kreuzung ohne weitere Reduzierung der Geschwindigkeit durchfahren, wenn keine Begrenzung durch eine zulässige Höchstgeschwindigkeit vorliegt und kein Fahrzeug kurz zuvor aus dem Nebenstrom eingebogen ist.

Beiden Knotenpunktformen ist gemein, dass bei freier Durchfahrt durch den Knoten, d. h. während der Freigabezeit der Lichtsignalanlage bzw. beim Fahren auf der bevorrechtigten Fahrbahn, im Allgemeinen keine Verlustzeiten entstehen. Anders verhält es sich bei Kreisverkehren. Hier ist eine Durchfahrt durch den Kreisverkehr ohne Zeitverluste nicht möglich. Allein das Vorhandensein des Kreisverkehrs verursacht wegen seiner geometrischen Form mit einer zu umrundenden Mittelinsel Verzögerungen, die auch ohne andere Fahrzeuge am Knotenpunkt auftreten. Diese sogenannten geometrischen Verlustzeiten an Knotenpunkten müssen von den verkehrlich bedingten Verlustzeiten, die durch Beachten bevorrechtigter Verkehrsströme entstehen, unterschieden werden. Bild 2-12 verdeutlicht diese Tatsache und zeigt den prinzipiellen Verlauf von Weg-Zeit-Linien der freien Durchfahrt für unterschiedliche Knotenpunktformen.

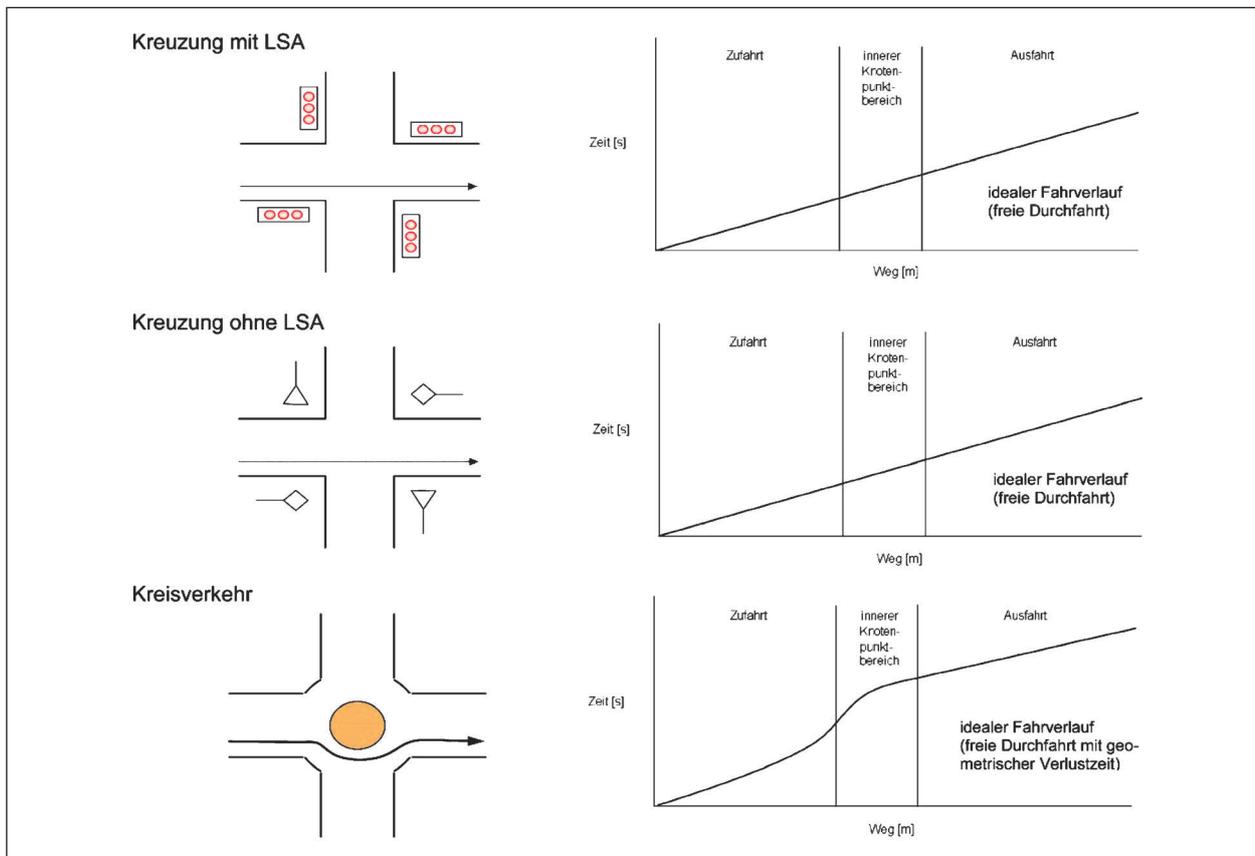


Bild 2-12: Weg-Zeit-Linien der freien Durchfahrt nach SCHUCKLIESS et al. (2003)

Während die Weg-Zeit-Linien der freien Durchfahrt an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage und einer vorfahrtsignalisierten Kreuzung ohne Lichtsignalanlage einen linearen Verlauf aufweisen, verändert sich bei Kreisverkehren die Steigung der Weg-Zeit-Linie, da sich die gefahrenen Geschwindigkeiten im Einflussbereich des Kreisverkehrs verringern und anschließend wieder vergrößern. Die an einem Knotenpunkt entstehende Verlustzeit kann also durch eine Weg-Zeit-Linie beschrieben werden, wobei sie sich im Allgemeinen sowohl aus einer geometrischen wie auch aus einer verkehrlich bedingten Komponente zusammensetzt.

BRILON et al. (1994) geben folgende Definition der bei einer Durchfahrt durch einen Knotenpunkt entstehenden Verlustzeit: Sie ist die „... Differenz zwischen der Fahrzeit, die zum Durchfahren der Strecke zwischen einem Querschnitt vor und einem Querschnitt hinter dem Knotenpunkt, an denen keine Beeinflussung durch den Knotenpunkt festzustellen ist, tatsächlich benötigt wird und einer fiktiven Fahrzeit, die für dieselbe Strecke unter Beibehaltung der Anfangsgeschwindigkeit (theoretisch) anzusetzen wäre.“

Bild 2-13 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Dargestellt ist die modellhafte Weg-Zeit-Linie eines Fahrzeugs beim Durchfahren eines Knotenpunkts.

Nach BRILON et al. (1994) stellt die Weg-Zeit-Linie A-E den realen Fahrverlauf eines Fahrzeugs durch einen Knotenpunkt dar, die Linie A-E' einen fiktiven Fahrverlauf, der bei einer freien Durchfahrt durch den Knotenpunkt entstehen würde. Die Weg-Zeit-Linie A-E' würde also entstehen, wenn der Knotenpunkt nicht vorhanden wäre und sich das Fahrzeug entlang einer geraden Strecke bewegen würde. Die Zeit  $t_v$  gibt die Gesamtverlustzeit an, die bei einer realen Fahrt entsteht. Sie ist die Differenz zwischen der Zeit, die für die reale Fahrt benötigt wird und der Fahrzeit der fiktiven Fahrt A-E'. „Die Verlustzeit ergibt sich aus der geometrischen Charakteristik des Knotenpunkts und aufgrund der jeweiligen verkehrlichen Situation“, sie setzt sich also nach BRILON et al. (1994) aus der geometrischen Verlustzeit und einer verkehrlich bedingten Verlustzeit zusammen.

Die Weg-Zeit-Linie A'-E' stellt den fiktiven Fahrverlauf dar, der sich nach BRILON et al. (1994) aus Ansätzen des warteschlangentheoretischen Verlaufs ergeben würde. In ihr sind nicht die Zeitverluste  $t_{vb}$

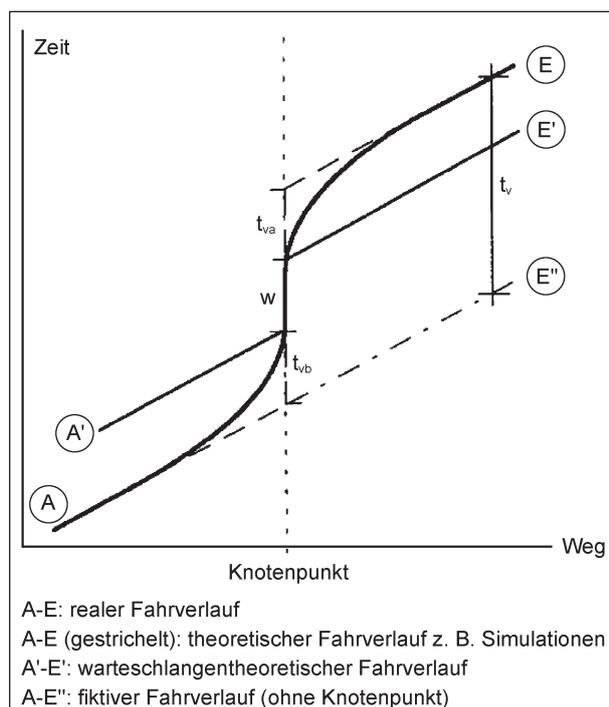


Bild 2-13: Vergleich des realen Fahrverlaufes an einem Knotenpunkt mit verschiedenen Ansätzen zur modellhaften Nachbildung nach BRILON et al. (1994)

und  $t_{va}$  aufgrund von Brems- und Beschleunigungsvorgängen enthalten. Die aus dieser Weg-Zeit-Linie entstehenden Zeitverluste entsprechen nach dieser Definition ausschließlich der mittleren Wartezeit  $w$  der Fahrzeuge in der Warteschlange.

KIMBER et al. (1986) unterscheiden vier Fälle, wobei die ersten zwei Unterscheidungen von BRILON et al. (1994) zu einem Fall zusammengefasst werden:

#### Fall 1a: Keine weiteren Fahrzeuge, keine Orientierung

Wenn sich keine weiteren Fahrzeuge im System befinden, d. h. weder im betrachteten Verkehrsstrom oder in einem der übergeordneten Ströme, so entstehen die Zeitverluste an einem Knotenpunkt durch das Abbremsen und das anschließende Beschleunigen des Fahrzeugs aufgrund der geometrischen Form des Knotenpunkts. Das Fahrzeug verringert zwar seine Geschwindigkeit, d. h. die Steigung seiner Weg-Zeit-Linie vergrößert sich, hält aber an dem Knotenpunkt nicht an und fährt ohne sich an dem Knotenpunkt nach anderen Verkehrsteilnehmern zu orientieren durch den Knotenpunkt. Dieser Zeitverlust wird als geometrische Verlustzeit (engl.: geometric delay) bezeichnet. Sie beschreibt jedoch einen rein theoretischen Wert, da in der Realität immer eine Überprüfung erfolgt, ob andere

Verkehrsteilnehmer eine Weiterfahrt ohne weitere Reduzierung der Geschwindigkeit erlauben.

KIMBER et al. (1986) bezeichnen diese geometrische Verlustzeit deshalb auch als „pure geometric delay“, d. h. als reine geometrische Verlustzeit. Sie setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$t_{vg} = t_{vb} + t_{va} \quad (\text{Gl. 2-37})$$

mit

$t_{vg}$  geometrische Verlustzeit [s]

$t_{vb}$  Verlustzeit beim Abbremsen [s]

$t_{va}$  Verlustzeit beim Beschleunigen [s]

#### Fall 1b: Keine weiteren Fahrzeuge, mit Orientierung

Berücksichtigt man bei der geometrischen Verlustzeit eine Orientierungszeit, in der sich der Fahrer des Fahrzeugs bei der Einfahrt in den Knotenpunkt vergewissert, ob die vorherrschende Verkehrssituation eine Weiterfahrt erlaubt, so erhält man eine in der Realität messbare Verlustzeit. KIMBER et al. (1986) bezeichnen sie deshalb auch als „measured geometric delay“, d. h. als messbare geometrische Verlustzeit. Die Weg-Zeit-Kurve des Fahrzeugs verläuft gegenüber der theoretischen geometrischen Verlustzeit etwas steiler, ohne jedoch senkrecht zu verlaufen. Das Fahrzeug hält also nicht an. Die hierdurch verursachten Zeitverluste sind jedoch nicht mehr allein auf die geometrischen Eigenschaften des Knotenpunkts zurückzuführen, weshalb eigentlich nicht mehr von einer geometrischen Verlustzeit gesprochen werden kann. BRILON et al. (1994) vermeiden deshalb an dieser Stelle auch den Zusatz geometrisch. Diese Verlustzeit inklusive einer Orientierungszeit ergibt sich zu:

$$t_v = t_{vg} + t_{vo} \quad (\text{Gl. 2-38})$$

mit

$t_v$  Gesamtverlustzeit [s]

$t_{vg}$  geometrische Verlustzeit [s]

$t_{vo}$  Verlustzeit durch Orientierung [s]

#### Fall 2: Orientierung – warten auf ein bevorrechtigtes Fahrzeug

Das betrachtete Fahrzeug des Nebenstroms fährt wie im Fall 1b beschrieben an die erste Warteposition vor der Haltlinie des Knotenpunkts heran und

muss nach einer Orientierungszeit mindestens einem bevorrechtigten Fahrzeug die Vorfahrt überlassen. Hierzu muss es für eine bestimmte Zeit anhalten und auf eine ausreichend große Zeitlücke im übergeordneten Verkehrsstrom warten. Die Weg-Zeit-Linie des Fahrzeugs verläuft nun zumindest für kurze Zeit senkrecht, d. h. es legt mit fortschreitender Zeit keinen Weg zurück. Die Verlustzeit wird nun durch eine reine Haltezeit ergänzt:

$$t_v = t_{vg} + t_{vo} + t_{vh} \quad (\text{Gl. 2-39})$$

mit

$t_v$  Gesamtverlustzeit [s]

$t_{vg}$  geometrische Verlustzeit [s]

$t_{vo}$  Verlustzeit durch Orientierung [s]

$t_{vh}$  Verlustzeit durch Halten [s]

### Fall 3: Fahrzeug reiht sich in eine Warteschlange ein

Das betrachtete Fahrzeug des Nebenstroms trifft vor dem Knotenpunkt auf andere bereits wartende Fahrzeuge und muss sich am Ende der Warteschlange einreihen. Es rückt in der Folgezeit in der Schlange immer weiter auf, bis es selbst an der ersten Warteposition vor der Haltelinie des Knotenpunkts angekommen ist. Der weitere Ablauf entspricht dem beschriebenen Fall 2. Die Weg-Zeit-Linie des betrachteten Fahrzeugs weist nun einen von der Anzahl der Anfahr- und Haltevorgänge innerhalb der Warteschlange abhängigen treppenstufenartigen Verlauf mit entsprechend den Haltevorgängen „senkrechten“ Komponenten auf. Die Verlustzeit muss nach BRILON et al. (1994) um eine „Wartezeit in der Schlange“ ergänzt werden, die die Zeitspanne des Wartens und aller Anfahr- und Bremsvorgänge innerhalb der Warteschlange beschreibt:

$$t_v = t_{vg} + t_{vo} + t_{vh} + t_{vs} \quad (\text{Gl. 2-40})$$

mit

$t_v$  Gesamtverlustzeit [s]

$t_{vg}$  geometrische Verlustzeit [s]

$t_{vo}$  Verlustzeit durch Orientierung [s]

$t_{vh}$  Verlustzeit durch Halten [s]

$t_{vs}$  Verlustzeit in der Warteschlange [s]

Verlustzeiten, welche anhand von Weg-Zeit-Linien gewonnen werden, beschreiben die Differenz zwischen der Zeit, die für die reale Fahrt A-E benötigt

wird und der Fahrzeit der fiktiven Fahrt A-E". SCHUCKLISS et al. (2003) weisen jedoch darauf hin, dass nicht irgendwelche Punkte auf der Linie A-E bzw. A-E" die Verlustzeit bestimmen, sondern genau die Punkte, an denen die „ideale“ Geschwindigkeit für den freien Streckenabschnitt vor dem Knotenpunkt verlassen und nach dem Knotenpunkt wieder erreicht wird.

Die fiktive Weg-Zeit-Linie A-E" weist also genau die Steigung auf, welche sie an der Stelle vor dem Knotenpunkt hat, an dem die Geschwindigkeit der realen Fahrt von der idealen Geschwindigkeit abweicht.

Die Verlustzeit definiert sich nun als die Differenz zwischen der Linie A-E und der fiktiven Linie A-E" an der Stelle nach dem Knotenpunkt, an der die ideale Geschwindigkeit des freien Streckenabschnitts wieder erreicht wird. Sie entspricht somit dem „senkrechten“ Abstand dieser beiden Weg-Zeit-Linien an diesem Punkt.

Anhand der Weg-Zeit-Linie kann auch der Einflussbereich eines Knotenpunkts bestimmt werden. Er ist der „waagerechte“ Weg-Abstand zwischen dem Punkt des Verlassens der idealen Weg-Zeit-Linie vor dem Knotenpunkt und dem Punkt des Wiedererreichens der idealen Weg-Zeit-Linie nach dem Knotenpunkt (siehe Bild 2-14).

In der Realität sind die Punkte des Verlassens und Wiedererreichens der idealen Weg-Zeit-Linie nicht immer einfach zu erfassen, da die freien Geschwindigkeiten auf den Streckenabschnitten vor und hinter dem Knotenpunkt verschieden groß sein können und deshalb unterschiedliche Steigungen aufweisen können. Zudem verlaufen die Geschwindigkeiten gerade bei dichten Knotenpunktabständen nicht über längere Zeit konstant.

Hierbei ist zu überlegen, ob nicht die an einem Knotenpunkt durch die Verwaltungsvorschriften angeordneten Geschwindigkeitsbeschränkungen bzw. -aufhebungen und deren Abstände vor und nach dem Knotenpunkt die idealen Weg-Zeit-Linien vorgeben können.

Über die genaue Definition der Wartezeit  $w$  existieren in der Literatur unterschiedliche Ansichten. Auch das HBS (2001/2005) legt den Begriff der mittleren Wartezeit unterschiedlich aus. Zwar ist die mittlere Wartezeit  $w$  sowohl für Knotenpunkte mit als auch ohne Lichtsignalanlage das Maß für die Qualität des Verkehrsablaufs und wird dort auch gleich definiert als die „gegenüber der freien Durchfahrt zu-

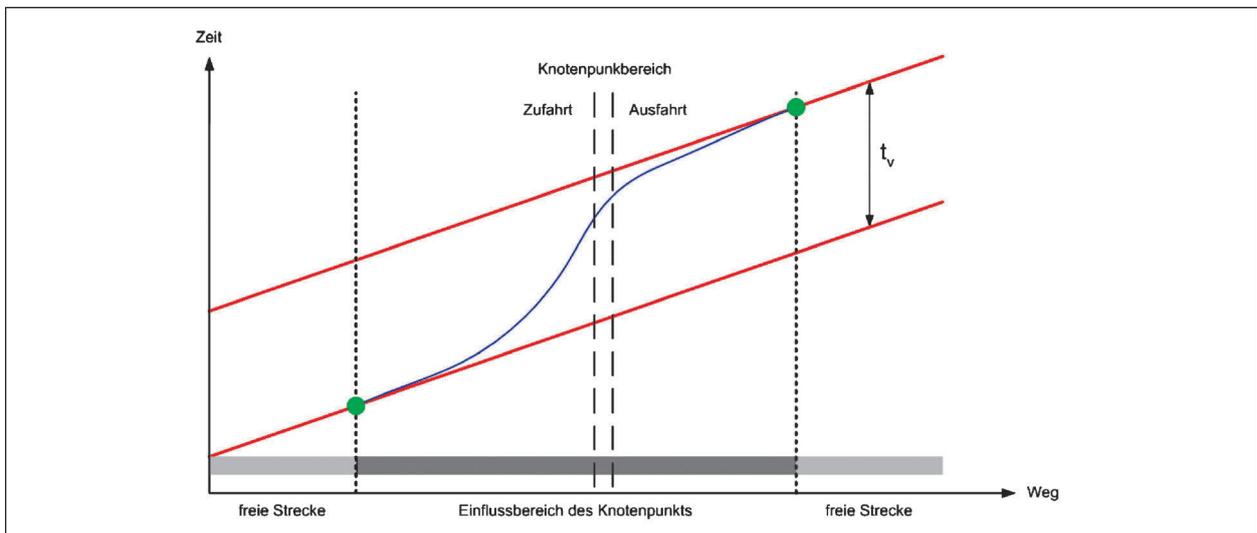


Bild 2-14: Einflussbereich eines Knotenpunkts nach SCHUCKLIESS et al. (2003)

sätzlich benötigte Zeit beim Befahren des Knotenpunktes“. SCHUCKLIESS et al. (2003) legen jedoch dar, dass an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage die mittlere Wartezeit  $w$  der tatsächlich benötigten Verlustzeit entspricht; an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage entspricht die mittlere Wartezeit  $w$  jedoch den Zeitverlusten (im Sinne von BRILON et al. (1994)) in der Warteschlange einer Zufahrt, die keine Verluste infolge Anfahr- und Bremsvorgängen beinhalten.

Nach BRILON et al. (1994) ist die mittlere Wartezeit  $w$  im Sinne der Warteschlangentheorie nach Bild 2-13 die „... Summe aus der Wartezeit in der Schlange, der Haltezeit und – gegebenenfalls je nach gewähltem Modell – aus der Orientierungszeit“. Sie beinhaltet daher ausschließlich die Zeitverluste, die durch das Halten in der Zufahrt aufgrund einer bestehenden Verkehrsbelastung sowie das Aufrücken innerhalb der Warteschlange verursacht werden. Anfahr- und Bremsvorgänge vor und nach dem Knotenpunkt werden daher nicht berücksichtigt.

Auch BRILON et al. (1999) definieren die Wartezeit  $w$  wie BRILON et al. (1994) als „... Verlustzeit abzüglich der Zeitverluste aufgrund von Brems- und Beschleunigungsvorgängen“. Es wird darauf hingewiesen, dass die Verlustzeit  $t_v$  und die Wartezeit  $w$  nicht identisch sind und ihre Differenzen unterschiedliche Werte annehmen können. Zur Berücksichtigung dieser Unterschiede kann nach BRILON et al. (1999) ein konstanter Zeitzuschlag von 5,0 s verwendet werden.

BRILON und WEINERT (2001) führen aus, dass „... die mittlere Wartezeit, die mittels der Warteschlan-

gentheorie ermittelt wird, (...) zusätzlich zu der reinen Haltezeit auch einen Zeitverlust, den der Fahrer durch das Abbremsen vor dem Knotenpunkt erleidet ...“, berücksichtigt. Da dieser Zeitverlust nicht bestimmt werden könne, müssen gemessene Wartezeiten „... um einen fiktiven Wert von 5,0 s verlängert ...“ werden, um in Übereinstimmung mit der mittleren Wartezeit nach HBS (2001/2005) zu kommen. Die mittlere Wartezeit und der Zuschlag beziehen sich nach BRILON und WEINERT (2001) nur auf die Zufahrt des Knotenpunkts.

Auch BRILON und SCHNABEL (2003) und BRILON (2003) erwähnen diesen Zuschlag von 5,0 s, begründen ihn diesmal jedoch mit „... Zeitverlusten beim Bremsen und Anfahren ...“. BRILON (2003) bezieht sich dabei auf das amerikanische HCM (2000). Dort ergeben sich die 5,0 s aufgrund von Brems- und Beschleunigungsvorgängen am gesamten Knotenpunkt. „The constant value of 5,0 s/veh is included (...) to account for the deceleration of vehicles from free-flow speed to the speed of vehicles in queue and the acceleration of vehicles from the stop line to free-flow speed.“ HCM (2000). Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass auch BRILON (2003) diesen Zuschlag nun auf den gesamten Knotenpunkt anwendet. Weiterhin erläutert er, dass die im HCM (2000) verwendeten zusätzlichen 5,0 s letztendlich ohne Wirkung bleiben würden, da dort auch um 5,0 s höhere Grenzwerte für die Qualitätsstufen verwendet würden als im HBS (2001/2005). Das HBS (2001/2005) berücksichtigt nach BRILON (2003) diesen Zuschlag folglich weder in der mittleren Wartezeit  $w$  noch in den Grenzwerten.

BOLTZE und STEPHAN (2003) beziehen sich zwar auf Knotenpunkte mit der Regelungsart „rechts vor links“, verstehen den Zeitzuschlag von 5,0 s aber im Sinne eines Zuschlags, der die Zeitverluste „nach Erreichen der ersten Warteposition während des Beschleunigens bis auf die Wunschgeschwindigkeit (Verlassen des Knotenpunktbereichs) gegenüber der Fahrzeit mit konstanter Wunschgeschwindigkeit“ berücksichtigt. Die 5,0 s beziehen sich nach Angaben von BOLTZE und STEPHAN (2003) also auf Zeitverluste infolge von Beschleunigungsvorgängen innerhalb und nach dem Knotenpunkt.

BRILON und BÄUMER (2004) sprechen schließlich nicht mehr von einem Zuschlag von 5,0 s, sondern von einer „Bedienzeit“, die im Sinne der Warteschlangentheorie zur mittleren Wartezeit hinzu addiert werden müsse. „Diese ist gleich der Aufrückzeit von Warteposition zwei in Warteposition eins. Fährt das Fahrzeug z. B. direkt in einen Kreisverkehr ein, ist nach BRILON und BÄUMER (2004) die Bedienzeit gleich der Folgezeitlücke“. Nach HBS (2001/2005) wird an Kreisverkehren eine Folgezeitlücke von 2,9 s angewandt. BRILON und BÄUMER (2004) stellten an zweistreifigen Kreisverkehren eine Folgezeitlücke von 2,5 s fest.

Die Verlustzeit an einem Knotenpunkt unterscheidet sich somit nach BRILON et al. (1994) von der Wartezeit durch die geometrische Verlustzeit, welche die Anfahr- und Bremsvorgänge der Fahrzeuge aufgrund der geometrischen Parameter des Knotenpunkts berücksichtigt. Sie bezieht sich im Gegensatz zur Wartezeit auf den gesamten Knotenpunkt.

Vor allem an Kreisverkehren ist nach KIMBER et al. (1986) der Anteil der geometrischen Komponente sehr groß und beträgt bei niedrigen Verkehrsstärken etwa zwei Drittel der Gesamtverlustzeit. Erst bei hohen Verkehrsstärken überwiegt die Wartezeit in der Schlange.

Bild 2-15 zeigt den funktionalen Zusammenhang nach KIMBER et al. (1986) zwischen der Verkehrsstärke, ausgedrückt durch den Sättigungsgrad, d. h. dem Verhältnis von Verkehrsstärke zur Kapazität, und der Gesamtverlustzeit an einem Kreisverkehrsplatz. Die in diesem Bild dargestellten Komponenten der Verlustzeit entsprechen den Fällen eins bis drei: „ $D_G$ “ ist der „pure geometric delay“ (Fall 1a), „ $k_1 \tau_C$ “ ist die Orientierungszeit (Fall 1b), die darüber liegende Komponente entspricht der Haltezeit (Fall 2) und „ $d(\infty)$ “ ist die Verlustzeit in der Warteschlange (Fall 3). Die geometrische Verlustzeit überwiegt bei gerin-

gen und mittleren Verkehrsstärken (Sättigungsgrad  $g < 0,65$ ). Sie bleibt ebenso wie die Orientierungszeit konstant. Erst ab einem Sättigungsgrad von  $g = 0,65$  wird die mittlere Wartezeit schließlich größer als die geometrische Verlustzeit und erhöht sich exponentiell. Die Berechnung der geometrischen Komponente  $D_G$  in Bild 2-15 beruht auf einer Arbeit von McDONALD et al. (1984), die ein analytisches Berechnungsverfahren für die Bestimmung der geometrischen Verlustzeit entwickelten.

Als Ergebnis der Arbeit von BANSI (2004) kann festgehalten werden, dass die Verlustzeit  $t_V$  am Gesamtknotenpunkt und insbesondere deren geometrisch bedingte Komponente an Kreisverkehren nicht vernachlässigt werden darf und bei der Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs einbezogen werden muss. Es wurde daraufhin ein Bewertungshintergrund für außerorts gelegene, gleichmäßig belastete vierarmige Kreisverkehre anhand der Gesamtverlustzeit entwickelt. Die neu definierten Grenzwerte der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für die Gesamtverlustzeit liegen um 15,0 s höher als die Grenzwerte für die mittlere Wartezeit nach HBS (2001/2005). Diese sind nach BANSI (2004) gültig für Kreisverkehre mit einem geometric

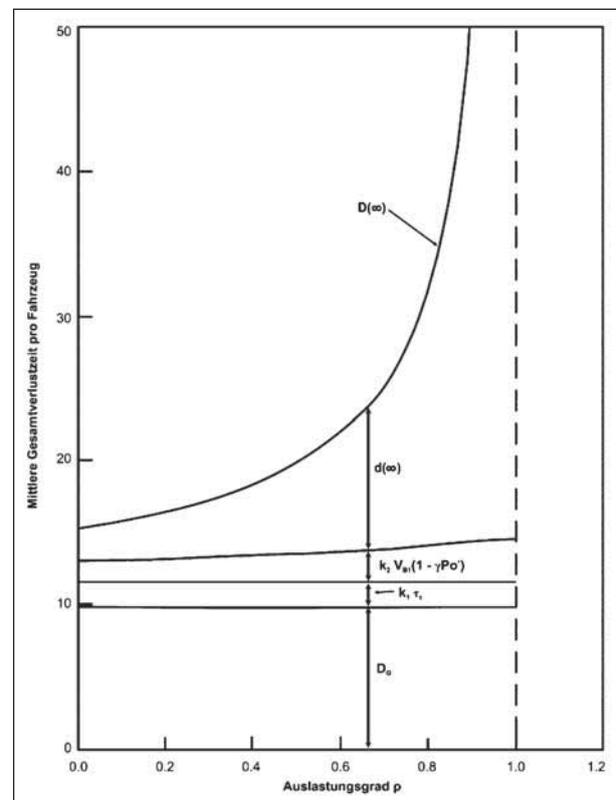


Bild 2-15: Zusammenhang zwischen dem Sättigungsgrad der Zufahrt (Traffic Intensity) und der Verlustzeit (Delay) an einem Kreisverkehr (Quelle: übersetzt nach KIMBER et al. (1986))

delay von etwa 18,0 s und ohne Störungen durch Fußgänger. Im Hinblick auf die Definition der mittleren Wartezeit  $w$  nach HBS (2001/2005) ergab sich nach den Simulationsergebnissen von BANSI (2004), dass in der mittleren Wartezeit bereits ein Anteil der geometrischen Verlustzeit in der Zufahrt von etwa 3,0 s enthalten ist. Hier konnte eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen nach BRILON und BÄUMER (2004) festgestellt werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.371/2004/AGB „Übergreifende Bewertung von Streckenabschnitten und Knotenpunkten“ wurde von STEINAUER et al. (2008) ein Verfahren entwickelt, mit dem die mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf einem Landstraßenzug aus den mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten auf den einzelnen Streckenabschnitten und in den Einflussbereichen der Knotenpunkte (400 m vor und 400 m nach Knotenpunktmitte) ermittelt werden kann. Auf Basis von freien und beeinflussten Durchfahrten an verschiedenen Knotenpunkttypen erfolgte hierbei u. a. die Ermittlung von knotenstrombezogenen Grunddurchfahrtszeiten (Bild 2-16). Die ermittelten Werte beziehen sich dabei ausschließlich auf Einflussbereiche mit angrenzenden Streckenabschnitten von Landstraßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h.

Die nach STEINAUER et al. (2008) ermittelten Grunddurchfahrtszeiten bilden im Weiteren die Grundlage zur Aufstellung des Zusammenhangs zwischen der Wartezeit nach HBS (2001/2005) und der nach Fahrtbeziehung differenzierten mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit durch den Gesamtein-

flussbereich von 800 m eines Knotenpunktes (Bild 2-17). In der derzeitigen Fortschreibung zum HBS (2015) soll ein Verfahren zur Bewertung von Netzabschnitten von Autobahnen, Landstraßen und Stadtstraßen entwickelt werden. Hierbei ist u. a. zu untersuchen, inwieweit an definierten Hauptknotenpunkten die mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit sowohl von der nach HBS berechenbaren mittleren Wartezeit an Knotenpunkten und den zusätzlich entstehenden Zeitverlusten in Bereichen der Be-

Anzahl untersuchter Verkehrsströme		mittlere Grunddurchfahrtszeiten aus freien Fahrten und mittlere Durchfahrtszeiten aus nicht freien Fahrten im Einflussbereich von 400 m ...					
		... vor dem Knotenpunkt			... nach dem Knotenpunkt		
		freie Durchfahrt		freie Durchfahrt		beeinflusste Durchfahrt	
		$t_{0,KE,v}$ [s]	$\pm s$ [s]	$t_{0,KE,n}$ [s]	$\pm s$ [s]	$t_{0,KE,n}$ [s]	$\pm s$ [s]
	11	18,0 (N=50)	2,6	17,0 (N=50)	2,0	21,7 (N=278)	4,2
	1	23,4 (N=4)	2,8	22,0 (N=4)	1,6	26,3 (N=45)	8,8
	1	20,6 (N=8)	2,9	23,2 (N=8)	1,6	29,8 (N=49)	9,5
	1	23,2 (N=9)	1,8	23,8 (N=9)	0,9	26,4 (N=22)	3,1
	1	23,5 (N=24)	2,6	21,0 (N=24)	2,5	22,3 (N=25)	5,7
	2	24,5 (N=42)	2,6	24,7 (N=42)	2,4	25,7 (N=37)	3,8
	1	21,8 (N=12)	1,9	19,8 (N=12)	1,2	21,9 (N=35)	3,1
	1	19,5 (N=7)	1,6	21,7 (N=7)	2,0	25,5 (N=42)	7,6

Bild 2-16: Ermittelte Pkw-Fahrzeiten mit den zugehörigen Standardabweichungen unterschiedlicher Verkehrsströme durch Einflussbereiche von Knotenpunkten nach STEINAUER et al. (2008)

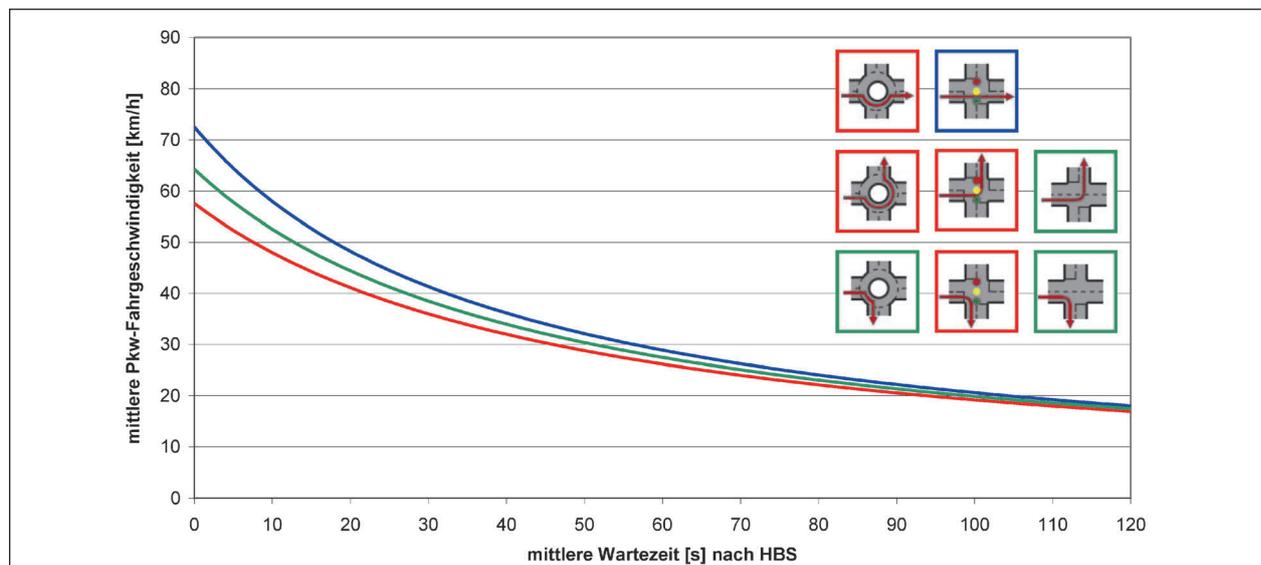


Bild 2-17: Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit bei der Durchfahrt des Einflussbereichs von 800 m bei Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage in Abhängigkeit der Fahrtbeziehung und der mittleren Wartezeit nach HBS (2001) für den betrachteten Verkehrsstrom nach STEINAUER et al. (2008)

schleunigungs- und Verzögerungsvorgänge (diese treten insbesondere an Kreisverkehren auf und werden in der Wartezeit bislang nicht berücksichtigt) beeinflusst wird.

Für Kreisverkehre z. B. wurde in Anlehnung des Ansatzes zur Bestimmung der geometrischen Verlustzeit nach RODEGERDTS (2006) (siehe Bild 2-18) mit empirischen Daten aus dem Forschungsprojekt FE 03.371/2004/AGB „Übergreifende Bewertung von Streckenabschnitten und Knotenpunkten“ die Zeitverluste einer freien Durchfahrt eines Kreisverkehrs gegenüber einer freien Durchfahrt ohne Kreisverkehr bestimmt. Als freie Durchfahrt gelten hierbei Einzelfahrten von Probanden mit einer Zeit-

lücke zum vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeug von vier Sekunden.

Aus 61 freien Fahrten, erhoben an insgesamt vier Kreisverkehren mit annähernd gleicher Geometrie (Durchmesser ca. 40 m und radial verlaufende Zufahrten im Winkel von ca. 100 gon), wurden die Parameter nach Gleichung 2-41 bestimmt und die geometrische Verlustzeit der Ausgangs- bzw. Endgeschwindigkeit gegenübergestellt. Bild 2-19 zeigt hierbei exemplarisch den Zusammenhang zwischen der Ausgangsgeschwindigkeit und der hieraus resultierenden geometrischen Verlustzeit unter gleichbleibenden geometrischen Randbedingungen (Einzelwerte in Rot).

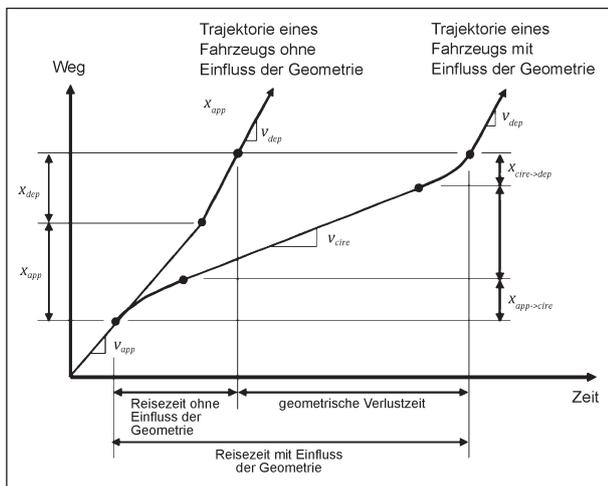


Bild 2-18: Ansatz zur Bestimmung der geometrischen Verlustzeit (Quelle: übersetzt nach RODEGERDTS (2006))

Unter der Annahme einer konstanten Verzögerung und einer konstanten Geschwindigkeit in der Kreisfahrbahn kann die geometrische Verlustzeit in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit funktional beschrieben werden. Aus den Analysen der 61 freien Fahrten ergab sich eine mittlere Verzögerung von etwa  $1,3 \text{ m/s}^2$  sowie eine gemittelte Fahrtgeschwindigkeit von  $26,3 \text{ km/h}$  innerhalb der Kreisfahrbahn.

Für die Verlustzeit in der Ausfahrt ergaben sich aus den Analysen in etwa die gleichen Größen der Kennwerte. Die Unterschiede sind im Ergebnis als zu vernachlässigend anzusehen. Daher gilt die Verwendung der Endgeschwindigkeit anstelle der Ausgangsgeschwindigkeit auch für die Ermittlung der geometrischen Verlustzeit in der Ausfahrt ab Knotenpunktmittle.

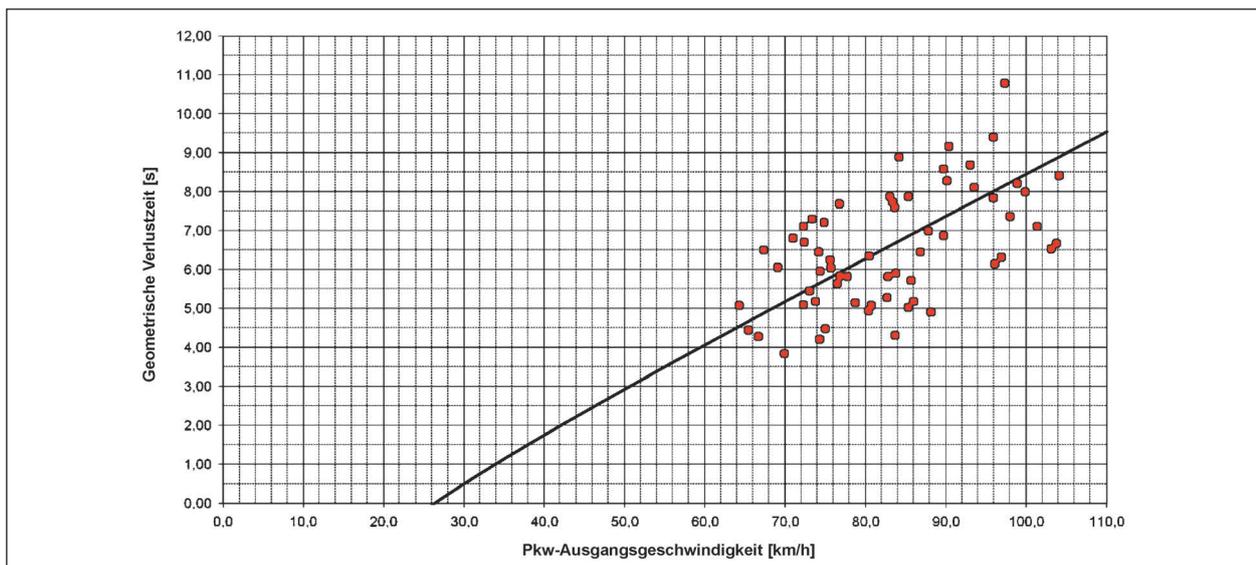


Bild 2-19: Zusammenhang zwischen der Ausgangsgeschwindigkeit und der geometrischen Verlustzeit unter gleichbleibenden geometrischen Randbedingungen nach BAIER et al. (2015)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 18. 0020/2008 wurden von BAIER et al. (2015) durch weitere empirische Daten und Analogieschlüsse für Knotenpunkte mit und ohne Lichtsignalanlage entsprechende Zeitzuschläge ermittelt (Tabelle 2-2 bis Tabelle 2-7). Diese sind im Wesentlichen abhängig von Knotenpunktart, der Verkehrsregelung sowie der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf den Streckenabschnitten vor und hinter dem Knotenpunkt.

$$d_{geo} = \left[ \frac{v_{circ} - v_{app}}{a_{app \rightarrow circ}} + \frac{x_{circ}}{v_{circ}} + \frac{v_{dep} - v_{circ}}{a_{circ \rightarrow dep}} \right] - \left[ \frac{x_{app}}{v_{app}} + \frac{x_{dep}}{v_{dep}} \right] \quad (Gl. 2-41)$$

mit

- $d_{geo}$  geometrische Verlustzeit [s]
- $v_{circ}$  konstante Geschwindigkeit in der Kreisfahrbahn [m/s]
- $v_{app}$  Ausgangsgeschwindigkeit in der Zufahrt [m/s]
- $v_{dep}$  Endgeschwindigkeit in der Ausfahrt [m/s]
- $a_{app}$  Verzögerung in der Zufahrt [m/s<sup>2</sup>]
- $a_{dep}$  Beschleunigung in der Ausfahrt [m/s<sup>2</sup>]
- $x_{circ}$  Weg in der Kreisfahrbahn mit konstanter Geschwindigkeit [m/s<sup>2</sup>]
- $x_{app}$  Weg in der Zufahrt von der Ausgangsgeschwindigkeit bis zur Geschwindigkeit in der Kreisfahrbahn [m/s<sup>2</sup>]

Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit $V_{F,S}$ [km/h]	Zeitverlust vor Knotenpunkt $t_{z,KE}$ [s]	Zeitverlust hinter Knotenpunkt $t_{z,KA}$ [s]	
		$t_w \leq 20$ s	$t_w > 20$ s
≤ 50	1,0	0,5	1,0
≤ 60	1,0	1,0	1,5
≤ 70	1,0	1,5	2,5
≤ 80	1,0	2,0	3,5
≤ 90	1,0	3,0	4,5
> 90	1,0	4,0	5,5

Tab. 2-2: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage der Straßenkategorie LS in Abhängigkeit von der mittleren Wartezeit des betroffenen Fahrstreifens (Signalgruppe) und der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))

$x_{dep}$  Weg in der Ausfahrt von der Geschwindigkeit in der Kreisfahrbahn bis zur Endgeschwindigkeit [m/s<sup>2</sup>]

Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit $V_{F,S}$ [km/h]	Zeitverlust vor Knotenpunkt $t_{z,KE}$ [s]		Zeitverlust hinter Knotenpunkt $t_{z,KA}$ [s]	
	Zeichen 205 StVO	Zeichen 206 StVO	Zeichen 205 StVO	Zeichen 206 StVO
≤ 50	1,5	8,5	0,5	1,0
≤ 60	2,5	10,0	1,0	1,5
≤ 70	3,5	11,5	1,5	2,5
≤ 80	4,5	12,5	2,5	3,5
≤ 90	5,5	13,5	3,5	4,5
> 90	6,5	14,5	4,5	5,5

Tab. 2-3: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einer Kreuzung bzw. Einmündung ohne Lichtsignalanlage der Straßenkategorie LS in Abhängigkeit von der Art der Vorfahrtregelung der betroffenen Zufahrt und der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))

Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit $V_{F,S}$ [km/h]	Zeitverlust vor Knotenpunkt $t_{z,KE}$ [s]	Zeitverlust hinter Knotenpunkt $t_{z,KA}$ [s]
≤ 50	2,5	2,5
≤ 60	3,5	3,5
≤ 70	4,5	4,5
≤ 80	5,5	5,5
≤ 90	7,0	7,0
> 90	8,5	8,5

Tab. 2-4: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einem Kreisverkehr der Straßenkategorie LS in Abhängigkeit von der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))

Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit $V_{F,S}$ [km/h]	Zeitverlust vor Knotenpunkt $t_{z,KE}$ [s]	Zeitverlust hinter Knotenpunkt $t_{z,KA}$ [s]	
		$t_{w,j} \leq 20$ s	$t_{w,j} > 20$ s
≤ 50	1,0	0,5	1,0
≤ 60	1,0	1,0	1,5
≤ 70	1,0	1,5	2,5

Tab. 2-5: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage der Straßenkategorie HS und VS in Abhängigkeit von der mittleren Wartezeit des betroffenen Fahrstreifens (Signalgruppe) und der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))

Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit $V_{F,S}$ [km/h]	Zeitverlust vor Knotenpunkt $t_{Z,KE}$ [s]		Zeitverlust hinter Knotenpunkt $t_{Z,KA}$ [s]	
	Zeichen 205 StVO	Zeichen 206 StVO	Zeichen 205 StVO	Zeichen 206 StVO
$\leq 50$	1,5	8,5	0,5	1,0
$\leq 60$	2,5	10,0	1,0	1,5
$\leq 70$	3,5	11,5	1,5	2,5

Tab. 2-6: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einer Kreuzung bzw. Einmündung ohne Lichtsignalanlage der Straßenkategorie HS und VS in Abhängigkeit von der Art der Vorfahrtregelung der betroffenen Zufahrt und der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))

Mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit $V_{F,S}$ [km/h]	Zeitverlust vor Knotenpunkt $t_{Z,KE}$ [s]	Zeitverlust hinter Knotenpunkt $t_{Z,KA}$ [s]
$\leq 50$	2,5	2,5
$\leq 60$	3,5	3,5
$\leq 70$	4,5	4,5

Tab. 2-7: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einem Kreisverkehr der Straßenkategorie HS und VS in Abhängigkeit von der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))

### 3 Messungen an ausgewählten Knotenpunkten

Die mittlere Wartezeit als maßgebendes Kriterium wird im HBS (2015) je nach Knotenpunkttyp unterschiedlich ermittelt und in Qualitätsstufen bewertet. Es ist zu erwarten, dass sich Instationarität bei verschiedenen Knotenpunkttypen unterschiedlich auswirkt. Weiterhin muss davon ausgegangen werden, dass beim Befahren unterschiedlicher Knotenpunktformen unterschiedliche Zeitverluste entstehen, welche in den verschiedenen theoretischen Berechnungsverfahren gar nicht bzw. unvollständig berücksichtigt werden. Vor dem Hintergrund vergleichbarer Bewertungsansätze für die Qualität des Verkehrsablaufs an unterschiedlichen Knotenpunktformen ist es daher notwendig, alle an diesen Knotenpunktformen entstehenden Warte- und Verlustzeiten zu erfassen und in einem möglichst konsistenten Ansatz zu beschreiben. Hierfür sind zunächst empirische Erhebungen an unterschiedlichen Knotenpunkten verschiedener Formen und Typen notwendig. Die Auswahl und Typisierung von zu untersuchenden Knotenpunkten wird im Folgenden näher beschrieben.

#### 3.1 Auswahl und Festlegung von typischen Knotenpunkten

Zunächst werden die folgenden fünf Knotenpunkt-Grundtypen definiert:

- Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage,
- Kreuzungen mit Lichtsignalanlage,
- Einmündungen ohne Lichtsignalanlage,
- Einmündungen mit Lichtsignalanlage sowie
- Kreisverkehre.

Eine weitere Unterteilung ergibt sich hinsichtlich der Unterscheidung bezüglich der Ortslage (innerorts oder außerorts), der Art der Vorfahrtsbeschilderung (Z 205 StVO oder Z 206 StVO) sowie der geometrischen Ausbildung (z. B. Anzahl der Fahrstreifen in den Zufahrten oder Durchmesser der Kreisverkehrsplätze).

Bei Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage gilt zusätzlich, dass nur solche Knotenpunkte empirisch untersucht werden, welche eine Festzeitsteuerung aufweisen. Das hat zum einen den Hintergrund, dass für die Untersuchung von verkehrsabhängigen Steuerungen bereits vom AA 3.10 „Theoretische Grundlagen der Straßenverkehrs“ der FGSV ein anderes Forschungsvorhaben mit dem Thema „Kapazität und Verkehrsqualität an verkehrsabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen“ initiiert wurde. Zum anderen stehen zurzeit weder für verkehrsabhängig gesteuerte noch für koordinierte Lichtsignalanlage auf der Wartezeit basierende Bewertungsverfahren zur Verfügung. Außerdem ist zu erwarten, dass die durch Instationaritäten im Verkehrsfluss entstehenden Einflüsse auf die Wartezeiten durch verkehrsabhängige Steuerung bzw. Koordinierung „verwischt“ werden und somit nicht direkt durch empirische Messungen erfasst werden können. Weiterhin sollen an allen Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage eigene Signalgruppen für die Abbiegeströme zur Verfügung stehen. Dies gilt insbesondere für die Linksabbieger, da für diese beim Durchsetzen des Geradeausstromes zusätzliche Wartezeiten entstehen können. Bei einer nicht gesicherten Führung der Rechtsabbieger, also gleichzeitige Freigabe mit nMIV (nichtmotorisierten Individualverkehr) in Längsrichtung, entstehen ebenfalls zusätzliche Wartezeiten, weswegen in diesen Fällen Knotenpunkte gewählt werden, welche geringe Belastung im nMIV aufweisen. Um Einflüsse von

vorhergehenden Knotenpunkten auf die Messungen auszuschließen bzw. zu minimieren, sollte in einem Abstand von 500 m vor dem betrachteten Knotenpunkt kein weiterer Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage liegen.

Generell gilt für die Auswahl von Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage, dass den unterschiedlichen Verkehrsströmen nach Möglichkeit eigene Fahrstreifen zur Verfügung stehen, um zusätzliche Verlustzeiten (z. B. durch Abbieger) auszuschließen.

### 3.2 Messtechnik

Zur Messung der Wartezeiten und von einzelnen Bestandteilen der Verlustzeiten werden an 20 ausgewählten Knotenpunkten Videobeobachtungen über einen Zeitraum von jeweils vier Stunden durchgeführt. Dabei kommen drei verschiedene Techniken zum Einsatz.

Im ersten Fall werden mehrere handelsübliche Videokameras mittels entsprechender Stative in einer Höhe von etwa 5 m im Seitenraum angebracht (siehe Bild 3-1). Die Anzahl der Kameras am Knoten wird in Abhängigkeit der Knotenpunktform (Kreuzung/Einmündung) festgelegt. Die genauen Standorte der Kameras am Knoten sind abhängig von den jeweiligen Randbedingungen (z. B. Bebauungsgrenzen) und werden daher an jedem Knotenpunkt individuell vor Ort bestimmt. Das maßgebende Kriterium für die Standortwahl ist die Erkennbarkeit des Fahrtverlaufs im Knotenpunktbereich und der Abläufe in der ersten und zweiten Position der Warteschlangen. Weiterhin werden Videokameras in den Zufahrten aufgestellt (siehe Bild 3-2), mithilfe



Bild 3-1: Aufstellort der Videokamera in der untergeordneten Zufahrt

derer das Eintreffen von Fahrzeugen am Ende der Warteschlange erfasst wird.

Zum anderen kommt ein Hochstativ mit einer maximalen Höhe von 12 m zum Einsatz (siehe Bild 3-3). Durch die deutlich größere Standfläche von etwa 3 m im Durchmesser ist die Wahl des Standortes begrenzt. Allerdings gewinnt man durch die größere Höhe an Übersicht und kann sehr viele der nötigen Positionen für die Zeitstempel auf einem Videobild erkennen.



Bild 3-2: Kamerabild am Beispiel eines Minikreisverkehrs



Bild 3-3: Hochstativ, auf 12 m Höhe vollständig ausgefahren

Außerdem wurde ein weiteres System entworfen, um an Knotenpunkten mit wenig Freiraum zur Positionierung der Stative die Videoaufzeichnungen ebenso aus größerer Höhe durchführen zu können. Dabei werden vorhandene Maste der Straßeneinrichtung genutzt (siehe Bild 3-4). In einem wetterfesten Gehäuse sind sowohl Kamera als auch Stromversorgung untergebracht. Durch dieses zuletzt beschriebene System ist die unauffälligste Beobachtung möglich (siehe Bild 3-5).

Da die Länge der Warteschlange jedoch stark von den Verkehrsbelastungen der Haupt- und Nebenrichtung abhängt, ist es unter Umständen nicht möglich, das Ende der Warteschlange bzw. das



Bild 3-4: Befestigung einer Kamera an einem Lichtmast



Bild 3-5: Kamera am Lichtmast aus einiger Entfernung

Eintreffen von Fahrzeugen am Warteschlangenenende zu erfassen. In diesen Fällen werden die Ein- und Ausfahrzeitpunkte der Kraftfahrzeuge am Knotenpunkt bestimmt. Aus der Differenz dieser Zeiten können knotenstromfeine Reisezeiten ermittelt werden. Mithilfe der Reisezeiten und der anderen erhobenen Zeitverlustwerte kann anschließend rechnerisch die Wartezeit der Fahrzeuge in der Warteschlange (ohne die erste Position) bestimmt werden.

Neben den Wartezeiten und den Verlustzeiten, die beim Befahren des Knotenpunktes entstehen, werden auch diejenigen Verlustzeiten empirisch ermittelt, welche durch Verzögerung vor dem Knoten und Beschleunigung nach dem Knoten entstehen. Diese dienen in erster Linie zur Kalibrierung und späteren Validierung der Simulationsergebnisse. Hierfür wird ein Messfahrzeug mit einem GPS-Gerät (Global-Positioning-System) ausgestattet, welches die genaue Fahrzeugposition in Intervallen von 0,1 s ermittelt und speichert.

Durch das Mitschwimmen im Verkehr (floating car) entstehen so Geschwindigkeitsprofile, welche die gefahrene Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrzeugposition bzw. des Weges darstellen (siehe Bild 3-6). Durch die kontinuierliche Befahrung des Knotenpunktes und der Annäherungsbereiche während der Videobeobachtungen können die Ergebnisse aus beiden Messverfahren im Anschluss überlagert werden. Durch eine in der Frontscheibe des Messfahrzeugs installierte Kamera wird zeitgleich der Fahrtverlauf visuell erfasst. Dadurch können im Anschluss die Zeitverluste aus Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgängen ermittelt werden, die im Zusammenhang mit dem Verkehrsablauf am Knotenpunkt stehen. Weiterhin dienen diese Daten zur Validierung der Befahrungszeitverluste im Knotenpunkt.

Parallel zu den Videobeobachtungen und den Messfahrten werden die lokalen Geschwindigkei-

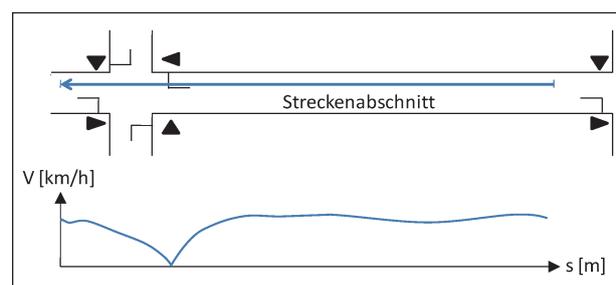


Bild 3-6: Geschwindigkeitsprofil aus Floating-Car-Data am Beispiel eines LSA-Knotens (Skizze)



Bild 3-7: Befestigung des Seitenradars an einem Schilderpfosten (Quelle: SIERZEGA (2012))

ten der Fahrzeuge mittels Seitenradar erfasst (siehe Bild 3-7). Dabei werden nur vom Knotenpunkt unbeeinflusste Geschwindigkeiten in einer Entfernung von 75 bis 100 m vor und hinter dem Knotenpunkt ermittelt. In die spätere Auswertung fließen nur Geschwindigkeiten frei fahrender Fahrzeuge (Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug  $\geq 5$  s) ein.

Aus diesen werden lokale Geschwindigkeitsprofile erstellt, die als Datengrundlage für die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen der detaillierten Simulationsmodelle dienen.

Nach Abschluss der Erhebungen an den ausgewählten Knotenpunkten werden die Ergebnisse nach den folgenden Kriterien ausgewertet:

- Kenngrößen zur Berechnung der mittleren Wartezeit,
- Zeitverluste durch Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgänge vor und nach dem Knotenpunkt und
- Zeitverluste durch die Befahrung des Knotenpunktes (geometric delay).

Zudem werden aus den Messungen Daten bereitgestellt, welche als Grundlage für detaillierte Simulationsmodelle dienen.

Zur Validierung der Untersuchungsergebnisse ist eine Nacherhebung vorgesehen, welche sich an die Auswertung der Erhebungsdaten anschließt. Diese dient neben der Validierung auch der Klärung ergebnisrelevanter offener Fragen, welche sich während der Auswertung ergeben haben. Die Nacherhebung soll sich auf drei ausgewählte Knotenpunkte beschränken, deren Art und Lage in Abhängigkeit der Auswertungsergebnisse festgelegt wird.

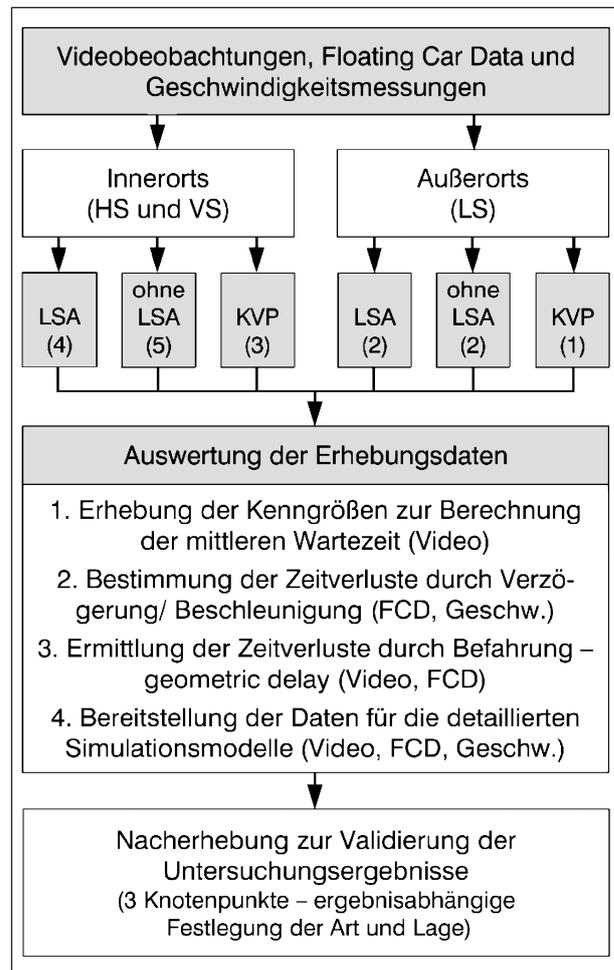


Bild 3-8: Ablauf der empirischen Untersuchungen

Bild 3-8 zeigt den Ablauf der empirischen Untersuchungen an den ausgewählten Knotenpunkten.

### 3.3 Erhebung empirischer Daten

#### 3.3.1 Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage

Die Videobeobachtungen sind auf die Morgen- und Nachmittagsspitzenverkehrszeit aufgeteilt, sodass für jeden Knotenpunkt mindestens 3 h auswertbares Videomaterial vorliegt. Hieraus werden die zwei Stunden mit der höchsten Belastung über alle Knotenzufahrten bestimmt. Anschließend erfolgt eine knotenstromfeine und detaillierte Auswertung der Spitzenstunden, ähnlich wie bei Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage.

In der detaillierten Auswertung der Spitzenstunden werden die in Bild 3-9 dargestellten Zeitstempel der einzelnen Fahrzeuge aufgenommen. Diese können wie folgt beschrieben werden:

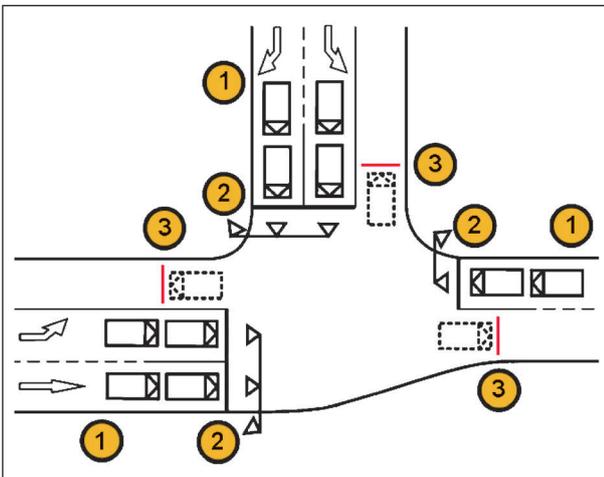


Bild 3-9: Auszuwertende Zeitstempel der Fahrzeuge an einem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage

1. Ankunft am Warteschlangeneende (ggf. Beginn Reisezeitmessung),
2. Ankunft an der Haltlinie,
3. Verlassen des Knotenpunktes (ggf. Ende der Reisezeitmessung).

Die Zeitstempel werden für jede Zufahrt stromfein erhoben. Zusätzlich werden bei Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage die Umlaufzeit sowie die Freigabe- und Sperrzeiten für jede Fahrbeziehung aufgenommen.

### 3.3.2 Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage

Auch in diesem Fall werden die Videobeobachtungen während der Morgen- und Nachmittagspitzenverkehrszeit durchgeführt, sodass für jeden Knotenpunkt mindestens 3 h auswertbares Videomaterial zur Verfügung steht.

Für diese 3 h wird die Verkehrsbelastung in den Zufahrten ausgewertet und so die zwei Spitzenstunden innerhalb der Messung ermittelt. Im Anschluss erfolgt eine knotenstromfeine Auswertung der zwei Spitzenstunden, bei welcher neben der Fahrzeugart auch die in Bild 3-10 dargestellten Zeitstempel aufgenommen werden, wodurch ein detailliertes Bild des Fahrtverlaufs entsteht. Die einzelnen Zeitstempel können dabei wie folgt beschrieben werden:

1. Einfahrzeit (Haupttrichtung),
2. Ausfahrzeit (Haupttrichtung),
3. Ankunft am Warteschlangeneende in der Nebenrichtung (ggf. Beginn der Reisezeit),

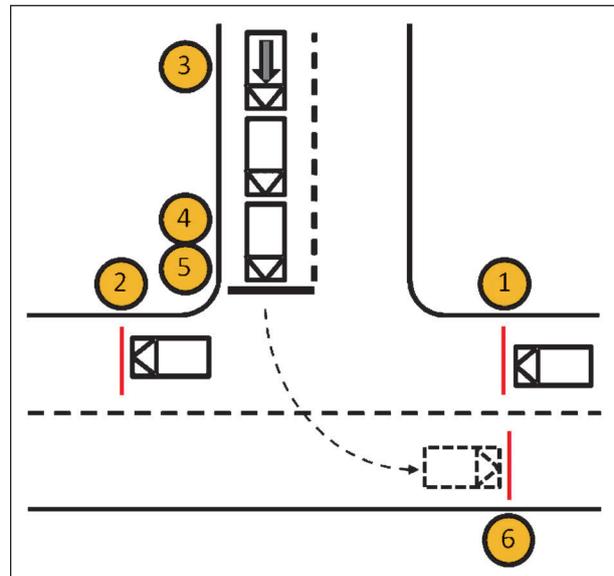


Bild 3-10: Auszuwertende Zeitstempel der Fahrzeuge an einer Einmündung ohne Lichtsignalanlage

4. Ankunft an der Haltlinie (Nebenrichtung),
5. Verlassen der Haltlinie (Nebenrichtung),
6. Verlassen des Knotenpunktbereiches (ggf. Ende der Reisezeitmessung).

Auf diese Weise können neben der maßgebenden Hauptstrombelastung auch die Verteilung der Zwischenankunftszeiten (Zeitlücken) in der Haupttrichtung sowie ggf. auftretende Befahrungszeitverluste ermittelt werden. Für die Nebenrichtung können

- die Wartezeit in der Warteschlange (ohne 1. Position),
- die Aufrückzeit in die 1. Position,
- die Bedienzeit (Wartezeit in der 1. Position),
- die Zeit zum Befahren des Knotenpunktes sowie
- die Grenz- und Folgezeitlücken

bestimmt werden. Daraus können alle für die Berechnung der Warte- und Verlustzeiten relevanten Zeiten knotenstromfein und belastungsabhängig (Haupt- und Nebenrichtung) ermittelt werden.

Weiterhin können unter Zuhilfenahme bestehender Verfahren die empirischen Kapazitäten berechnet werden.

Auf Basis dieser Erhebungen können alle relevanten Kenngrößen ermittelt werden, welche für die Anwendung der Berechnungsverfahren und zur Abschätzung der empirischen Kapazität erforderlich sind.

Weiterhin ermittelt werden können neben den Verkehrsstärken der einzelnen Ströme auch

- die Wartezeit in der Warteschlange (ohne 1. Position),
- die Bedienzeit (Wartezeit in der 1. Position),
- die Aufrückzeit von der zweiten in die erste Position der Warteschlange (Zeitbedarfswert  $t_b$ ) sowie
- die Zeit, welche zum Befahren des Knotens benötigt wird.

### 3.3.3 Kreisverkehrsplätze

An den ausgewählten Kreisverkehrsplätzen finden dreistündige Erhebungen während der Morgen- oder Nachmittagspitzenverkehrszeit statt, aus denen die jeweils zwei Stunden ausgewählt werden, welche über alle Zufahrten die höchste Belastung aufweisen.

Für die zwei Spitzenstunden werden die in Bild 3-11 dargestellten Zeitstempel für alle Fahrzeuge jedes Verkehrsstroms erhoben. Die Zeitstempel können wie folgt beschrieben werden:

1. Ankunft am Warteschlangenanende (ggf. Beginn der Reisezeitmessung),
2. Ankunft an der Wartelinie,
3. Verlassen der Wartelinie,
4. Passieren der Zufahrten (abhängig vom Richtungswunsch),
- 4a. Passieren der rechtsliegenden Zufahrt (Geradeausfahrer und Linksabbieger),
- 4b. Passieren der gegenüberliegenden Zufahrt (Linksabbieger),
5. Verlassen der Kreisfahrbahn.

Daraus abgeleitet werden kann neben den Verkehrsstärken der Einzelströme auch die maßgebende Hauptstromverkehrsstärke, welche für die rechnerische Ermittlung der Wartezeiten sowie für die Berechnung der empirischen Kapazitäten herangezogen wird.

Im Gegensatz zu den anderen betrachteten Knotenpunktformen stehen an Kreisverkehrsplätzen keine separaten Fahrstreifen für die unterschiedlichen Verkehrsströme zur Verfügung. Je nach Rich-

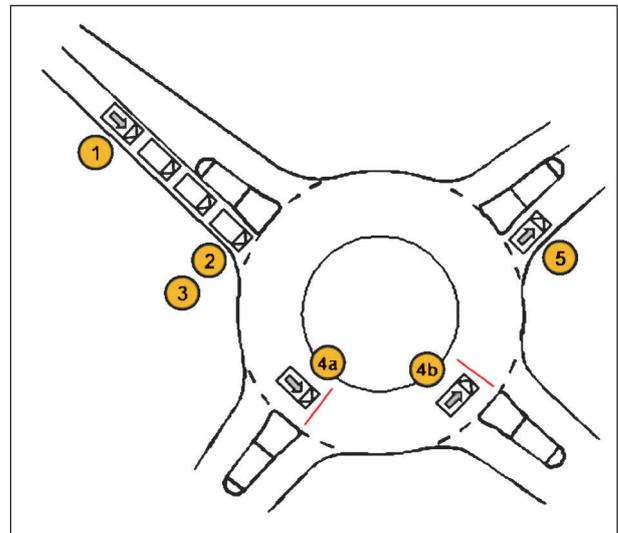


Bild 3-11: Auszuwertende Zeitstempel der Fahrzeuge an einem Kreisverkehrsplatz

tungswunsch der einzelnen Fahrzeuge kann es zu Behinderungen durch ausfahrende Fahrzeuge kommen, wodurch neben dem geometric delay (Behinderung beim Durchfahren des Kreisverkehrs) eine zusätzliche Verlustzeit entsteht. Durch die Erfassung der Zeitstempel 4a und 4b für jeden Verkehrsstrom können diese Verlustzeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke des jeweils ausfahrenden Stromes ermittelt und in der Gesamtverlustzeit berücksichtigt werden.

Wie bei den anderen Knotenpunktformen auch, können durch die erhobenen Zeitstempel die folgenden Verlustzeitbestandteile ermittelt werden:

- Wartezeit in der Warteschlange (ohne 1. Position),
- Aufrückzeit von der zweiten in die erste Position,
- Wartezeit in der 1. Position und
- benötigte Zeit zum Durchfahren des Knotenpunktes (geometric delay).

### 3.3.4 Auswertung der Videoaufzeichnungen

Um aus den aufgezeichneten Videos für jedes Fahrzeug möglichst einfach und zuverlässig die benötigten Zeitstempel zu extrahieren, wurde am IfV (KIT) ein Tool entwickelt. Bild 3-12 zeigt einen Screenshot dieses Tools. In Microsoft Excel wurde mithilfe von Visual Basic ein Script geschrieben, welches die Personen bei der Auswertung unterstützt. Das zu analysierende Video wurde zunächst geschnitten und mit roten Balken überlagert, um die Positionen

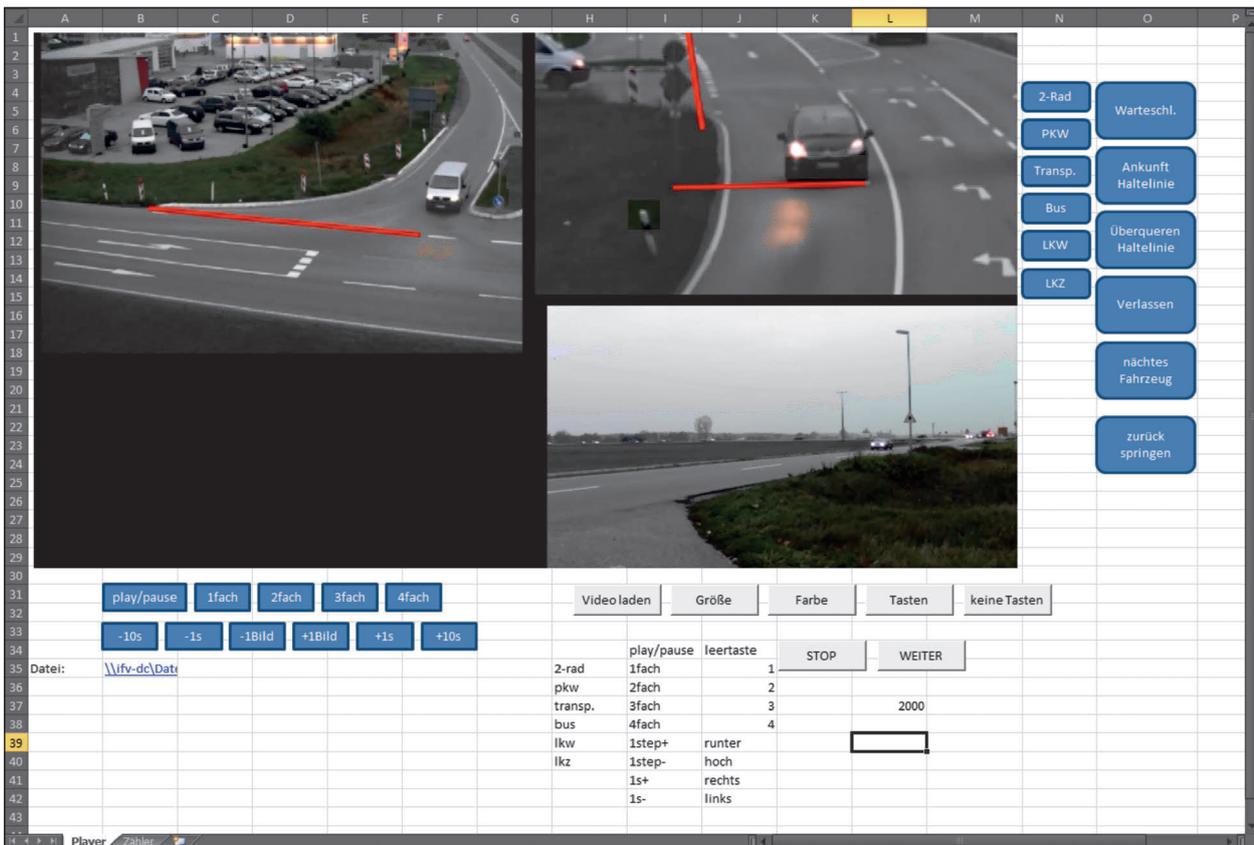


Bild 3-12: Videoauswertungstool auf der Basis von Excel

der zu erhebenden Zeitstempel zu definieren. Im Tool kann das entsprechende Video geladen und anschließend bildgenau gesteuert werden. Ist das Einzelbild im Video gefunden, in dem sich das Fahrzeug an der definierten Stelle befindet, kann der Zeitstempel auf Knopfdruck ausgelesen werden. Dabei werden diese Daten halbautomatisch dem richtigen Fahrzeug und dem richtigen Zeitstempeltyp zugeordnet. mithilfe dieses Tools konnte eine der möglichen Fehlerquellen – die auswertende Person – reduziert werden. Ein weiterer Vorteil dieser Technik ist die mögliche Verarbeitung der Videos eines Knotenpunktes durch mehrere Personen. Der Aufwand kann hiermit, im Gegensatz zur vollständig manuellen Auswertung, um etwa 30 % reduziert werden. Die erfassten Daten werden automatisch in eine Tabelle geschrieben, welche später der weiteren Auswertung unterzogen werden kann.

### 3.4 Erhobene Knotenpunkte

Die erhobenen Knotenpunkte unterscheiden sich nach:

- Kreuzungen mit und ohne LSA,

	Kreuzung		Einmündung		KVP	Σ
	mit LSA	ohne LSA	mit LSA	ohne LSA		
innerorts	2	2	2	3	3	12
außerorts	-	-	-	2	1	3
Σ	2	2	2	5	4	15

Tab. 3-1: Erhobene Knotenpunkte nach Typ (ohne Nacherhebung)

- Einmündungen mit und ohne LSA und
- Kreisverkehrsplätzen.

Weiterhin erfolgte eine Differenzierung hinsichtlich der Ortslage (innerorts bzw. außerorts), um verschiedene zulässige Höchstgeschwindigkeiten sowie gegebenenfalls zu beobachtende Änderungen des Fahrverhaltens und der Verkehrszusammensetzung zu berücksichtigen. Im Rahmen des Forschungsprojektes konnten keine festzeitgesteuerten Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage und keine Kreuzungen mit Vorfahrtsregelung in Außerortslage zur Erhebung ermittelt werden. Insgesamt wurden an 15 Knotenpunkten videotechnische Erhebungen über einen Zeitraum von jeweils 3 h durchgeführt (siehe Tabelle 3-1).

Die Erhebungen der innerhalb geschlossener Ortschaften liegenden Knotenpunkte wurden in den Städten (Anzahl der Knotenpunkte in Klammern)

- Dresden (4),
- Halle/Saale (2),
- Berlin (2),
- Pirna (2),
- Grimma (1) und
- Karlsruhe (4)

durchgeführt. Die Videobeobachtungen wurden, sofern nicht anders angegeben, stets an einem Normalwerkttag (Dienstag, Mittwoch, Donnerstag) während der Morgen- bzw. Abendspitzenstunde außerhalb der Schulferien durchgeführt. Die Lage der Spitzenstunden wurde auf Erfahrungsbasis sowie Lage und Funktion des jeweiligen Knotenpunktes im Netz abgeschätzt.

In Kapitel 3.4.1 werden die erhobenen Knotenpunkte kurz vorgestellt. Weitere Informationen dazu befinden sich in den detaillierten Knotenpunktblättern im Anhang.

### 3.4.1 Kreuzungen mit Lichtsignalanlage innerorts

#### Buschkrugallee/Späthstraße (Berlin)

Bei der lichtsignalgeregelter Kreuzung Buschkrugallee/Blaschkoallee/Späthstraße handelt es sich um einen Verkehrsknotenpunkt im südlichen Berlin. Die Späthstraße verbindet die beiden Stadtteile Treptow und Neukölln und verfügt über eine Anschlussstelle zur Stadtautobahn A 113. Die Buschkrugallee verbindet das Zentrum Berlins mit dem Stadtteil Neukölln und im weiteren Verlauf mit dem Stadtteil Rudow. Da die an diesem Knotenpunkt verknüpften Straßen sowohl mehrere große Wohngebiete untereinander als auch mit der Stadtautobahn sowie dem Zentrum verbinden, kann dem Knotenpunkt eine hohe Bedeutung, insbesondere für den Pendlerverkehr, zugerechnet werden. Diese Eigenschaften lassen auf eine hohe Verkehrsbelastung schließen, was auch dadurch unterstützt wird, dass jedem Knotenstrom mindestens ein eigener Fahrstreifen zur Verfügung steht (Bild 3-13).

#### Zeppelinstraße/Fritz-Haber-Straße (Karlsruhe)

Die Zeppelinstraße im Karlsruher Westen und ihre Verlängerung führen direkt zum Rheinhafen, an der



Bild 3-13: Blick aus der Späthstraße auf den Knotenpunkt



Bild 3-14: Blick auf die östliche Zufahrt (Zeppelinstraße) des Knotenpunkts

Fritz-Haber-Straße befindet sich die Zufahrt zu einem Briefzentrum (Bild 3-14). Im Süden und Osten der Kreuzung liegen weitere Gewerbeflächen, im Westen und Norden überwiegt Wohnbebauung in Form von Mehrfamilien- und Reihenhäusern. In Richtung des Rheinhafens im Nordwesten befindet sich ein größeres Gewerbegebiet, im Süden wiederum ein großes Wohngebiet mit vorwiegend Einfamilienhäusern. Daher kann von einem gemischten Verkehrsaufkommen hinsichtlich gewerblichen Verkehrs und Pendlern in der erhobenen Nachmittagspitzenzeit ausgegangen werden. Dieser Knotenpunkt weist mehrere Mischfahrstreifen auf, die in der Auswertung besonders berücksichtigt werden müssen. Des Weiteren wurden hier Langzeitmessungen über 24 Stunden mithilfe von Radargeräten durchgeführt.

### 3.4.2 Einmündungen mit Lichtsignalanlage innerorts

#### Märkische Allee/Raoul-Wallenberg-Straße (Berlin)

Die lichtsignalgeregelter Einmündung Märkische Allee/Raoul-Wallenberg-Straße (siehe Bild 3-15)



Bild 3-15: Blick in Richtung der einmündenden Raoul-Wallenberg-Straße

befindet sich im nord-östlich des Berliner Zentrums gelegenen Stadtteil Marzahn. Die Raoul-Wallenberg-Straße kann als Sammelstraße nach RAST 06 eingestuft werden, da sie die Verkehre der umliegenden Wohnquartiere sammelt und zu den Hauptverkehrsstraßen Märkische Allee und Landsberger Allee leitet. Die Märkische Allee ist ein Abschnitt der aus dem Nordosten auf Berlin zuführenden B 158. Durch seine Lage und Funktion im Netz kann auch diesem Knotenpunkt eine hohe Bedeutung für den Pendlerverkehr, insbesondere aus den nord-östlichen Berliner Randbezirken und Vororten zugeordnet werden.

#### **Ostring/Haid-und-Neu-Straße (Karlsruhe)**

Die Haid-und-Neu-Straße im Osten Karlsruhes ist eine der Hauptzufahrtsstraßen aus den im Nordosten gelegenen Stadtteilen in Richtung Innenstadt. Der Ostring ist eine wichtige Verbindung zwischen dem Nordosten und der BAB 5. An diesem Knotenpunkt ist das Fußgängeraufkommen sehr gering und die Straßenbahn wird parallel zur Haid-und-Neu-Straße geführt, sodass diese keinen Einfluss auf die Signalsteuerung besitzt. Normalerweise wird der Knotenpunkt durch ein verkehrsabhängiges Signalprogramm geregelt, das für den Zeitraum der Erhebung vom Tiefbauamt Karlsruhe durch das Basis-Festzeit-Signalprogramm ersetzt wurde.

#### **3.4.3 Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage innerorts**

##### **Radeberger Straße/Stolpener Straße (Dresden)**

Die durch Verkehrszeichen Z 206 und Z 306 StVO geregelte Kreuzung Radeberger Straße/Stolpener Straße liegt etwa 3 km nord-östlich des Zentrums

der Landeshauptstadt Dresden im überwiegend durch Wohnnutzung geprägten Stadtteil Radeberger Vorstadt. Die Stolpener Straße verbindet die von West nach Ost durch die Stadt verlaufende Bundesstraße 6 mit dem Stadtteil Äußere Neustadt und im weiteren Verlauf als Bischofsweg mit der von Nord nach Süd verlaufenden Bundesstraße 97. Durch ihre Nähe zu Wohngebieten sowie zu touristischen Einrichtungen wie dem Waldschlößchen oder Pfunds Molkerei wird der Kreuzung neben einer großen Bedeutung für den Pendlerverkehr auch eine gewisse Bedeutung für touristische Verkehre beigemessen.

##### **Salzmünder Straße/Lieskauer Straße (Halle/S.)**

Die Kreuzung Salzmünder Straße/Lieskauer Straße ist ein mit den Zeichen 205 und 306 StVO geregelter Verkehrsknoten im Nordwesten der Stadt Halle (Saale). Die Salzmünder Straße verbindet als Einfallstraße die nordwestlich der Saalestadt gelegenen Orte mit dem großen und überwiegend durch Wohnnutzung geprägten Stadtteil Halle-Neustadt und im weiteren Verlauf mit der ins Stadtzentrum führenden B 80. Die Lieskauer Straße bindet den Vorort an die Salzmünder Straße an. Von Bedeutung ist die Lieskauer Straße auch als einzige Zuwegung für das Krankenhaus Dölau. Somit kann unterstellt werden, dass der Knotenpunkt sowohl für den Pendlerverkehr in und aus dem Zentrum bzw. zum Krankenhaus als auch für den Besucher- und Patientenverkehr des Krankenhauses von Bedeutung ist.

#### **3.4.4 Einmündungen ohne Lichtsignalanlage innerorts**

##### **Nordstraße/Waldstraße (Halle/S.)**

Ähnlich wie der Knotenpunkt Salzmünder Straße/Lieskauer Straße ist auch die Einmündung Nordstraße/Waldstraße ein mit Z 205 und 306 StVO geregelter Verkehrsknoten im Nordwesten der Stadt Halle (Saale). Während die Salzmünder Straße westlich der Dölauer Heide verläuft, befindet sich die Nordstraße im Osten des Waldgebietes und verbindet das große Wohngebiet Heide-Nord mit dem Stadtzentrum, weswegen auch diesem Knotenpunkt eine große Bedeutung für den Pendlerverkehr unterstellt werden kann.

Da die Nordstraße keinen direkten Anschluss zu den nördlich der Stadt gelegenen Vororten bietet – wie es bei der Salzmünder Straße der Fall ist – wer-



Bild 3-16: Blick aus Süden (Nordstraße) auf den Knotenpunkt

den hohe Abbiegeströme von Süd nach West und von West nach Süd (Strom 7 und 6) erwartet. Aus diesem Grund wurde die Fahrbahn der durchgehenden Hauptrichtung im Knotenpunktbereich leicht aufgeweitet, um den Geradeausfahrern ein Überholen der wartenden Linksabbieger zu ermöglichen.

#### **Krietzschwitzer Straße/Struppener Straße (Pirna)**

Die Einmündung Krietzschwitzer Straße/Struppener Straße ist ein mit den Zeichen 205 und 306 StVO geregelter Verkehrsknoten im Westen der Stadt Pirna. Als Teil der B 172 verbindet die Krietzschwitzer Straße die Städte Pirna und Dresden mit den touristischen Gebieten Königstein und der Sächsischen Schweiz. Die Struppener Straße bindet die Verkehre des südlich von ihr gelegenen Wohngebietes an die Krietzschwitzer Straße an und dient gleichzeitig als einzige Zuwegung zum Klinikum Pirna. Dadurch gewinnt der Knotenpunkt neben seiner touristischen Bedeutung auch eine Bedeutung für den Pendlerverkehr sowie den Besucher- und Patientenverkehr des Klinikums Pirna.

#### **Winterbergstraße/Dobritzer Straße (Dresden)**

Die Einmündung Winterbergstraße/Dobritzer Straße ist ein mit den Zeichen 205 und 306 StVO geregelter Anschlussknoten südwestlich des Dresdener Stadtzentrums (Bild 3-17). Während die Winterbergstraße als Verbindung zwischen dem Stadtteil Niedersedlitz und dem Stadtzentrum dient, verbindet die Dobritzer Straße die Winterbergstraße mit der parallel verlaufende Bodenbacher Straße, sowie dem Stadtteil Seidnitz, welcher im Bereich der Dobritzer Straße noch hauptsächlich von Einfamilienhäusern geprägt wird. Dennoch kann dem Kno-



Bild 3-17: Blick auf die Einmündung aus südöstlicher Richtung

tenpunkt eine Bedeutung für den Pendlerverkehr (insbesondere in der Hauptrichtung) unterstellt werden. Ferner werden Langzeitmessungen über 12 Stunden, zusätzlich erhoben mit Radargeräten, für diesen Knotenpunkt ausgewertet.

#### **3.4.5 Einmündungen ohne Lichtsignalanlage außerorts**

##### **S177/AS Ottendorf-Okrilla (BAB 4 – Ri. Görlitz)**

Bei diesem Knotenpunkt handelt es sich um die Anschlussstelle Ottendorf-Okrilla der BAB 4 (Fahrtrichtung Görlitz) an die S 177. Die Vorfahrtsregelung erfolgt durch die Zeichen 205 und 306 StVO. Weiterhin befindet sich in unmittelbarer Nähe nördlich des Knotenpunktes ein Gewerbegebiet mit einem großen Brief- und Verteilerzentrum. Somit kann dem Knotenpunkt eine Bedeutung sowohl für den Pendler- als auch für den Wirtschaftsverkehr unterstellt werden.

##### **B 35/Neuwiesenstraße (Karlsdorf-Neuthard)**

Diese mit den Zeichen 205 und 306 StVO geregelte Einmündung im Norden von Karlsdorf-Neuthard befindet sich in direkter Nähe zum Autohof Bruchsal an der A 5 zwischen Karlsruhe und Walldorf. In unmittelbarer Nähe befinden sich außerdem eine Kiesgrube sowie ein Gewerbegebiet mit einem großen Logistikkdienstleister und dem Zollamt Bruchsal. Neben den Pendlern aus und in Richtung Karlsruhe und Heidelberg ist daher auch von einem größeren Anteil an gewerblichem (Schwer-)Verkehr in der erhobenen morgendlichen Spitzenzeit auszugehen (Bild 3-18).



Bild 3-18: Blick auf die einmündende Neuwiesenstraße

### 3.4.6 Kreisverkehrsplätze innerorts

#### Tharandter Straße/Altplauen (Dresden)

Der Kreisverkehrsplatz (KVP) Tharandter Straße/Altplauen liegt im Südwesten der Landeshauptstadt Dresden. Die Straße Altplauen bindet den Ortsteil Plauen an die Tharandter Straße an. Die Tharandter Straße selbst verläuft durch den Ortsteil Löbtau und dient als Einfallstraße für die südwestlich von Dresden gelegenen Ortschaften wie zum Beispiel Freital und Tharandt. Aufgrund dessen ist der KVP von großer Bedeutung für den Pendlerverkehr und weist insbesondere in den Morgenstunden eine sehr große Verkehrsstärke in der südlichen Zufahrt auf. Während der Erhebungen war die Ausfahrt in den westlichen Knotenarm (Fritz-Schulze-Str.) gesperrt, das Einfahren aus der Fritz-Schulze-Str. war jedoch möglich. Für diesen Knotenpunkt erfolgt außerdem die Auswertung von Langzeitmessungen mit Radargeräten über 12 Stunden.

#### Dresdner Straße/Großenhainer Straße (Reichenberg)

Der KVP Dresdner Straße/Großenhainer Straße liegt in der Ortschaft Reichenberg im Nordwesten Dresdens. Die Dresdner Straße verbindet als Teil der S179 die Landeshauptstadt Dresden mit den touristischen Zielen um Moritzburg. Aufgrund der großen Bedeutung für den Ausflugsverkehr wurden die Videoerhebungen an einem Samstag durchgeführt, da hier die größten touristischen Verkehrsströme erwartet werden konnten. Die Großenhainer Straße und die Straße Großer Gallberg sind von Wohnnutzung geprägt und für den Ausflugsverkehr weniger relevant. Die Großenhainer Straße wird lediglich an Sommertagen von den Besuchern des Freibades am Dippelsdorfer Teich genutzt.

#### Wurzener Straße/B 107 (Grimma)

Der KVP Wurzener Straße/B 107 liegt im Norden der Stadt Grimma zwischen dem Stadtzentrum und der BAB 14. Der südliche Knotenarm verbindet im Zuge der alten B 107 die BAB 4 mit dem Stadtzentrum Grimmas, während der westliche Knotenarm im Zuge der neuen B 107 den Beginn der westlichen Ortsumfahrung Grimmas darstellt. Aufgrund dieser Besonderheit kann davon ausgegangen werden, dass der KVP sowohl für den Pendler- als auch für Teile des Wirtschaftsverkehrs von Bedeutung ist. Eine Besonderheit des KVP stellt die unmittelbar im Ausfahrbereich des westlichen Knotenarmes gelegene Zufahrt zum Erlenweg dar. Die Zufahrt ist mit einem separaten Linksabbiegerfahrstreifen ausgestattet. Aufgrund dessen, dass der Erlenweg bzw. die sich anschließende Nordstraße als Wohnweg nach RAST 06 klassifiziert werden können, kann aber davon ausgegangen werden, dass nur wenige Fahrzeuge in den Erlenweg einfahren. Eine Überstauung des Linksabbiegerfahrstreifens, welche den Verkehrsablauf in der westlichen Ausfahrt des KVP beeinträchtigen würde, kann daher ausgeschlossen werden.

### 3.4.7 Kreisverkehrsplätze außerorts

#### B172/K8734

Dieser KVP befindet sich 7 km südöstlich der Stadt Pirna. Die B 172 verbindet die Stadt Pirna mit den touristischen Gebieten Königstein und der Sächsischen Schweiz. Sie wird daher hauptsächlich vom Ausflugsverkehr, aber auch von Pendlern, welche aus den Ortschaften Königstein oder Bad Schandau in die Städte Pirna und Dresden fahren, genutzt. Weiterhin befindet sich südlich des KVP eine Niederlassung der Wismut GmbH, was darauf schließen lässt, dass der Knotenpunkt auch vom Wirtschaftsverkehr genutzt wird.

## 3.5 Nacherhebungen

### 3.5.1 Nacherhebungen zum Anfahrverhalten bei Grünbeginn

Die Reaktionszeiten, die sich im realen Verkehrsfluss einstellen, sind von Mensch zu Mensch unterschiedlich. Damit ist anzunehmen, dass Reaktionszeiten immer einer Art von Verteilung unterliegen. Werden in einer Simulation eines Knotenpunkts mit Lichtsignalanlage die Fahrzeuge be-

trachtet, die an erster Position hinter der Haltlinie während der Sperrzeit stehen, so fällt auf, dass diese immer im gleichen zeitlichen Abstand zum Signalbildwechsel anfahren. Um diesen Unterschied zu quantifizieren, wurden in einer Nacherhebung an zwei Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage auf mehreren Fahrstreifen explizit diese Anfahrzeitverteilungen erhoben.

An beiden Knotenpunkten konnte beobachtet werden, dass die Anfahrzeit in etwa 2,5 s beträgt (Bild 3-19) und, wie erwartet, einer Häufigkeitsverteilung unterliegt (Bild 3-20 und Bild 3-21). Betrachtet man die Ergebnisse im Vergleich zu Simulationsergebnissen eines Laborbeispiels in Bild 3-22, ist deutlich zu erkennen, dass in VISSIM keine Verteilung der Anfahrtszeiten vorliegt. Durch die hier festgestellten Unterschiede konnte die PTV AG in VISSIM eine Verteilung der Anfahrzeit implementieren.

In unterschiedlichen Umläufen können damit Unterschiede in der Kapazität pro Umlauf entstehen. Sollte das erste Fahrzeug etwa sehr spät anfahren

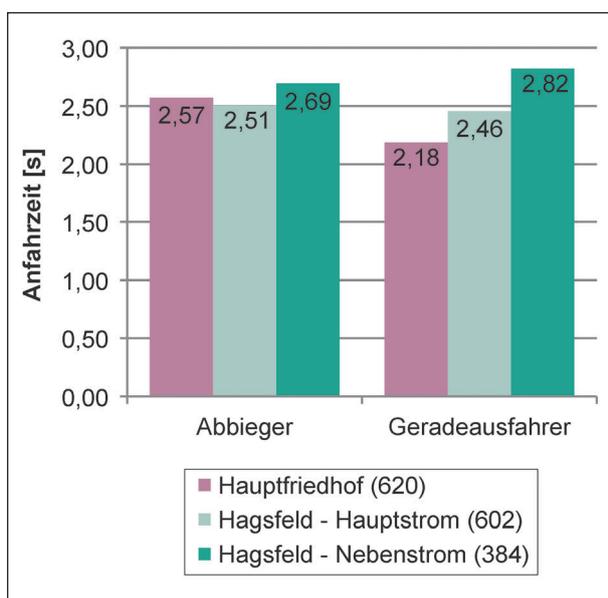


Bild 3-19: Mittlere Anfahrzeit an den erhobenen Knotenpunkten

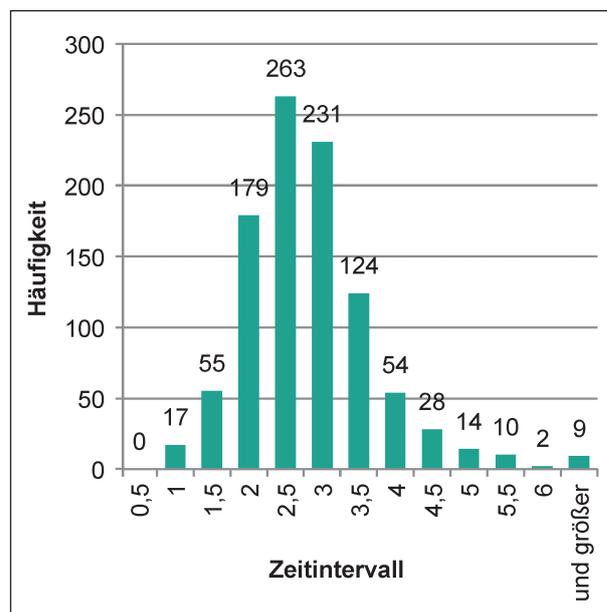


Bild 3-21: Verteilung der Anfahrzeit am Knotenpunkt Karlsruher Str./L 560

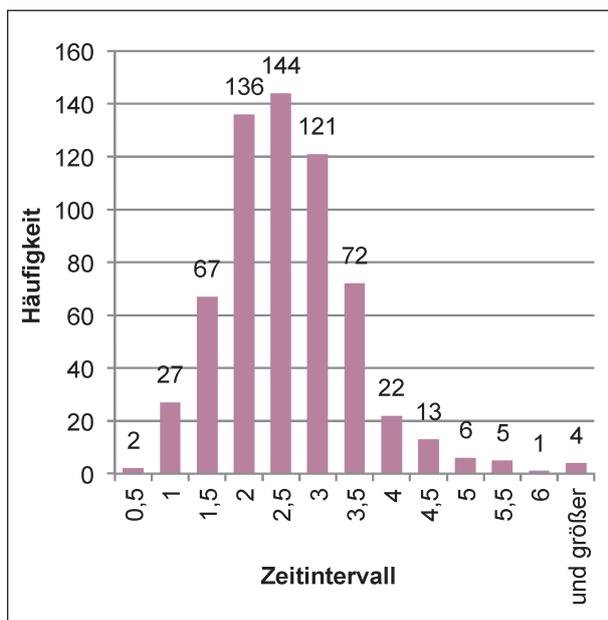


Bild 3-20: Verteilung der Anfahrzeit am Knotenpunkt Tullastraße/Haid-und-Neu-Straße

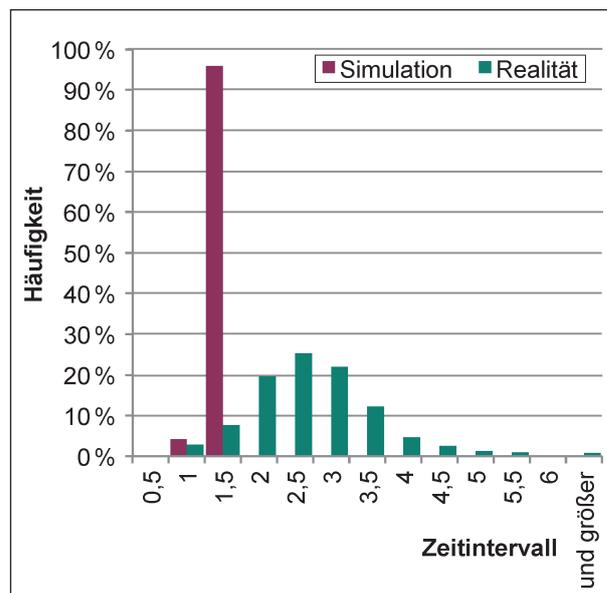


Bild 3-22: Vergleich der Anfahrzeitverteilung aus den Messungen mit der Simulation ohne Anfahrzeitverteilung

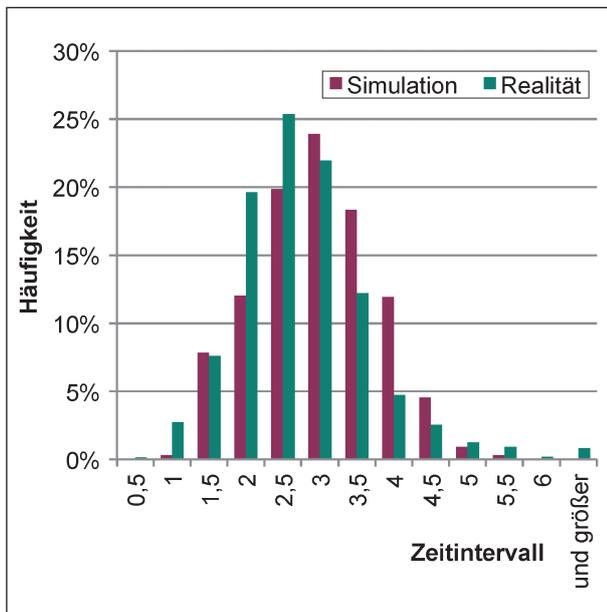


Bild 3-23: Vergleich der Anfahrzeitverteilung aus den Messungen mit in VISSIM eingestellter Anfahrzeitverteilung

(in etwa 2 s bis 3 s später als der Mittelwert), so kann bei einem Zeitbedarfswert von etwa 2 s insgesamt ein Fahrzeug weniger in diesem Umlauf passieren. Bild 3-23 zeigt eine Verteilung der Anfahrzeit in VISSIM im Vergleich mit der erhobenen Anfahrzeitverteilung und macht deutlich, dass die neue Funktionalität in VISSIM eine realistischere Abbildung des Verkehrsflusses an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage ermöglicht.

### 3.5.2 Nacherhebungen zu bedingt verträglich geführten Fußgänger- und Radfahrerströmen

Die sich im Rahmen der Kalibrierung der Abbiegerströme an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage ergebende Fragestellung, in welchem Ausmaß sich bedingt verträglich geführte Fußgänger- und Radfahrerströme auf die Kapazität auswirken, wird vom HBS (2015) im Kern durch die Kurve der Belegungszeit einer Furt in Bild S4-10 im Abschnitt S4 im Teil Stadtstraßen (Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage) behandelt. Dabei ergibt sich die Behinderung der Abbieger durch die Belegungszeit der Furt durch Fußgänger und Radfahrer, die wiederum von deren Anzahl pro Umlauf abhängig ist. Die konkrete Berücksichtigung der entsprechenden Ergebnisse innerhalb der Verfahrensschritte bis hin zum Endergebnis für die Kapazität ist im entsprechenden Kapitel des HBS (2015) nachzulesen und wird an dieser Stelle nicht vollumfänglich wiedergegeben.

Auf welcher Basis diese in Bild 3-24 dargestellte Kurve entstanden ist, konnte nicht nachvollzogen werden. Ihr Verlauf erscheint, gerade im Fall weniger Fußgänger, nicht plausibel, da diese bereits eine bestimmte Mindestzeit lang die Furt belegen. Auch der nahezu lineare weitere Verlauf gab Anlass zur Relevanz einer Überprüfung der Belegungszeiten.

Für die Erhebung wurden vier Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage in Karlsruhe ausgewählt, deren möglichst getrennt vom Geradeausstrom geführte Rechtsabbiegerströme außerdem bedingt verträglich zum parallelen Fußgänger- und Radfahrerstrom signalisiert werden und ausreichend große Verkehrsstärken aller relevanten Ströme aufweisen.

Dabei wurden Messungen über vier bis fünf Stunden mittels Video aus großer Höhe durchgeführt, die hinsichtlich Anzahl der querenden Personen, der Belegungs- bzw. Blockierungszeit und der Kfz im Abbiegerstrom ausgewertet wurden.

Erfasst wurden dabei 2.826 Personen (Fußgänger- und Radfahreranteil jeweils etwa 50 %) in 548 Phasen mit einer Belegungsanzahl von 851 und einer Gesamtbelegungszeit von 7.180 s. mit folgenden Durchschnittswerten:

- 1,6 Belegungen pro Phase,
- 5,2 Personen queren die Furt pro Phase,
- 3,3 Personen queren die Furt pro Belegung und
- Belegungszeit verlängert sich pro zusätzlicher Person um 2,5 s.

Bild 3-25 stellt die erfassten Belegungszeiten für alle erfassten Knotenpunkte zusammenfassend dar. Es ist klar zu erkennen, dass die Ergebnisse stark streuen und die Funktion aus dem HBS (2015) lediglich eine Art untere Grenze der Belegungszeiten wiederzugeben scheint. Die Streuung dürfte zum größten Teil in der zusammenfassenden Betrachtung von Fußgängern und Radfahrern zu begründen sein, weswegen diese in Bild 3-26 nochmals separat dargestellt werden.

Die Belegung ist definiert als die Anwesenheit eines Fußgängers oder Radfahrers in der Furt, was nicht unbedingt zur Folge haben muss, dass ein Kfz des Abbiegerstroms die Furt nicht befahren kann. Insbesondere bei langen Fußgängerfurten sollte also die Belegungszeit von der Blockierungszeit unterschieden werden, in der die Furt überquerende Per-

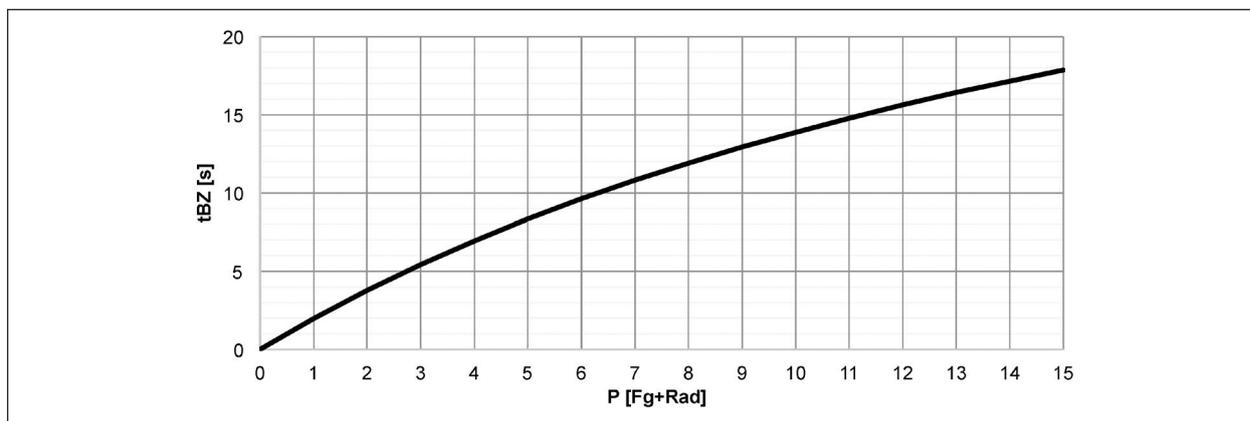


Bild 3-24: Belegungszeit einer Fußgängerfurt pro Umlauf nach HBS (2015)

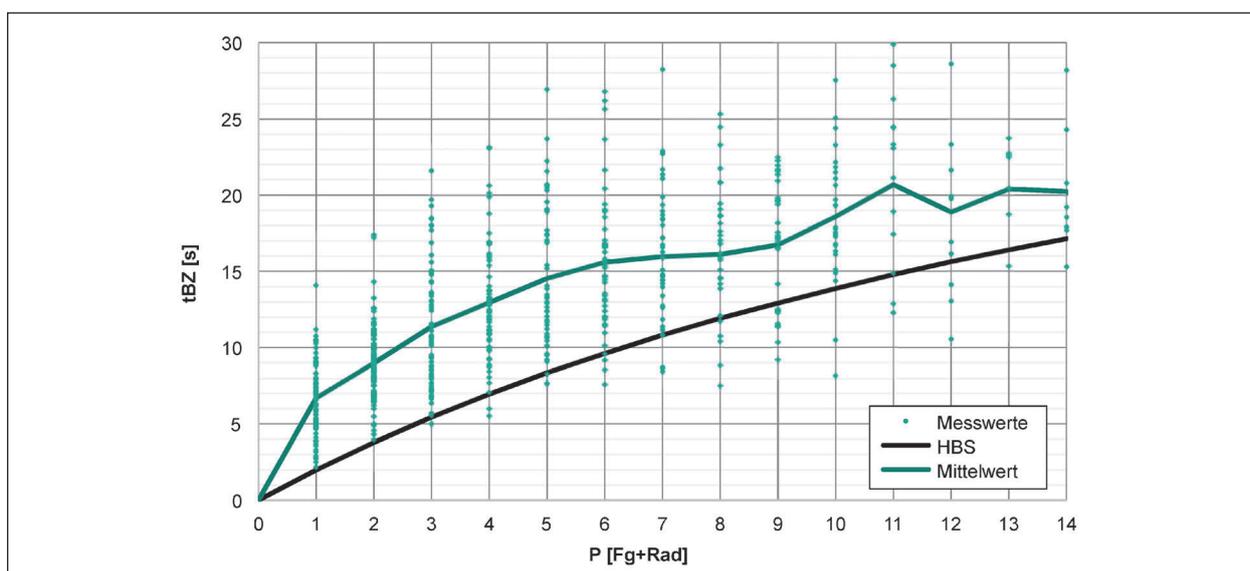


Bild 3-25: Belegungszeiten: Einzelmesswerte, Mittelwerte und Funktion nach HBS (2015)

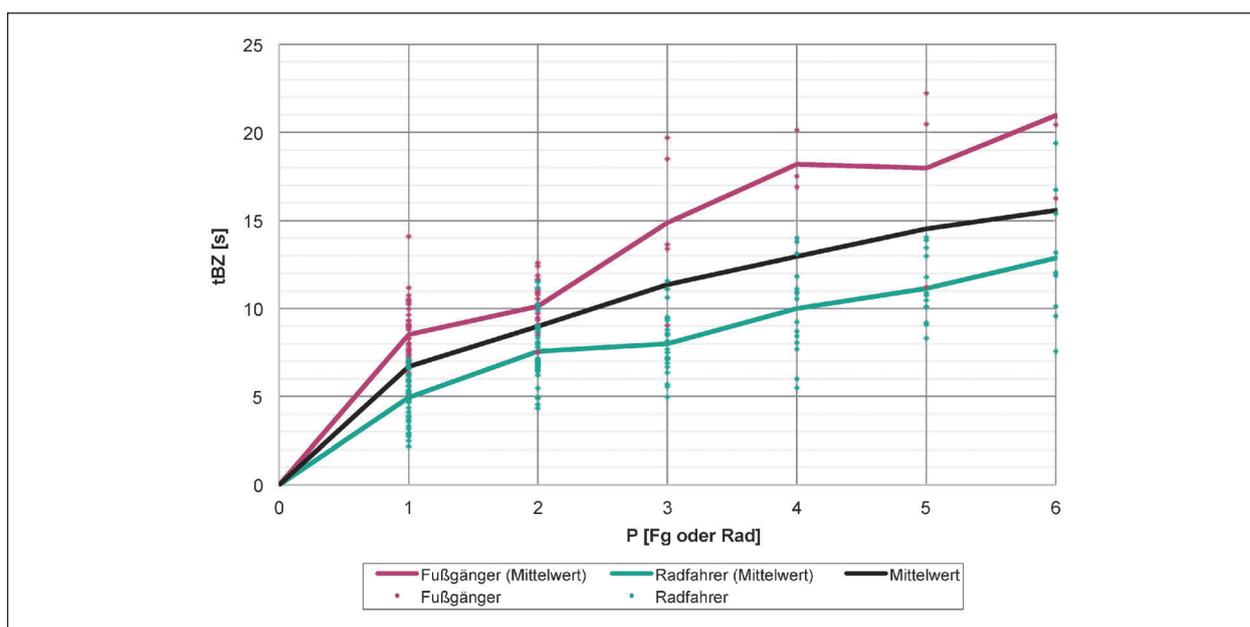


Bild 3-26: Belegungszeiten, unterschieden nach Fußgänger- oder Radfahreranzahl pro Phase

sonen den Kfz-Strom tatsächlich am Abbiegen hindern. Eine ausschließliche Berücksichtigung des letzten Falls wäre als Erklärung der in den meisten Fällen unterhalb der Messwerte liegenden Kurve nach dem HBS (2015) (siehe Bild 3-26) denkbar. Bild 3-27 stellt deshalb die Blockierungszeit explizit und im Vergleich zur Belegungszeit dar.

Hierbei liegen die Mittelwerte auf Basis der Messungen dennoch oberhalb der Werte der Funktion nach HBS (2015). Eine Anpassung dieser wäre also eine

durchaus sinnvolle Option, wobei zur Steigerung der Genauigkeit eine Unterscheidung nach langen und kurzen Furten (Grenze: 10 m) erfolgen könnte. Bild 3-28 zeigt einen Vorschlag für solche Regressionskurven mit, hinsichtlich der Ergebnisse der Messungen, realistischerem Verlauf mit höheren Belegungszeiten im Fall einiger weniger die Furt überquerender Personen und weniger steil ansteigenden Werten bei höherer Fußgänger- und Radfahrerbelastung.

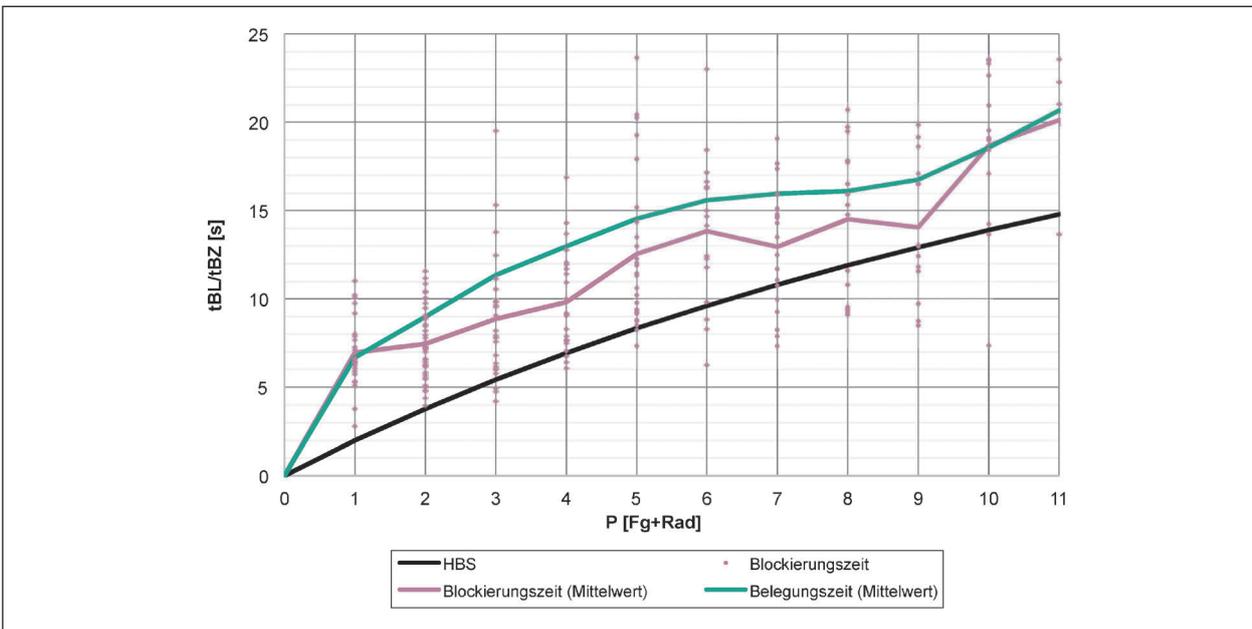


Bild 3-27: Blockierungszeit und Belegungszeit auf Basis der Messungen und Belegungszeitkurve nach HBS (2015)

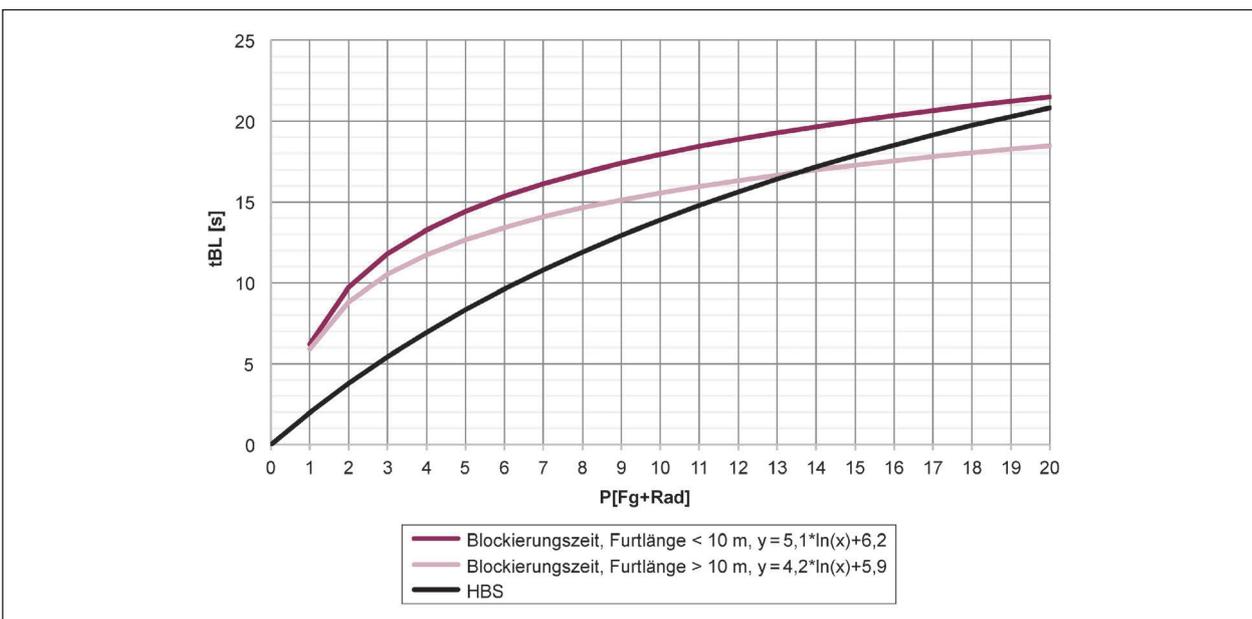


Bild 3-28: Annäherungskurven der gemessenen Blockierungszeit von Furten kürzer bzw. länger als 10 m im Vergleich zur Belegungszeit-Kurve des HBS (2015)

## 4 Simulationsmodelle

### 4.1 Ziel der Simulationsmodelle

Um die Zeitverluste der erhobenen Knotenpunkte zu analysieren, und damit einen Vergleich zu der nach dem HBS (2015) berechneten Wartezeit durchzuführen, müssen beliebige Belastungsszenarien analysiert werden. Da während der Messzeiträume eine zufällige Belastung vorhanden war, wurden für die betrachteten Knotenpunkte jeweils Simulationsmodelle in VISSIM erstellt. Der Aufbau der Modelle orientiert sich dabei an der Geometrie und der Steuerung der realen Knotenpunkte. Die Kalibrierung erfolgte mithilfe der erhobenen Daten. Anschließend wurden geeignete Belastungsszenarien ausgewählt und simuliert. Die simulierten Daten konnten dann mit den Berechnungsergebnissen nach dem HBS (2015) verglichen werden.

Nachfolgend werden der Aufbau der Modelle beschrieben, die Schritte der Kalibrierung erläutert und die Unterschiede zwischen Messung, Simulation und HBS aufgezeigt. Prinzipiell werden dabei Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage und Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage unterschieden.

Um eine Analyse anhand von Simulationen durchführen zu können, müssen die verwendeten Simulationsmodelle kalibriert und validiert werden.

Dabei werden die für die Auswertung relevanten Modellparameter eingestellt. Ziel ist es, eine messbare Vergleichsgröße in der Simulation unter Einhaltung eines gewissen Fehlers nachzubilden.

### 4.2 Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage

#### 4.2.1 Aufbau der Modelle

Der Aufbau der Simulationsmodelle wird im Folgenden anhand der Einmündung Ostring/Haid- und Neu-Straße in Karlsruhe erläutert. Bild 4-1 zeigt einen Screenshot aus VISSIM, in dem die einzelnen Komponenten des Modells zu erkennen sind. Die Screenshots der weiteren Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage sind im Anhang dargestellt.

In Bild 4-1 ist im Hintergrund ein Luftbild des Knotenpunkts zu erkennen. Anhand dieses Luftbilds wurde der Streckenverlauf modelliert.

Die Strecken sind dunkelgrau und die Verbindungen zwischen den Strecken (also die Abbiegebezie-



Bild 4-1: Screenshot aus VISSIM zur Veranschaulichung des Modellaufbaus der Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage

hungen) in hellgrau hervorgehoben. Der Zulauf startet jeweils in einer Entfernung von circa 300 m zum Knotenpunkt. Die Nummerierung der Strecken erfolgte dabei in drei Teilen und ist durch die schwarzen Beschriftungen gekennzeichnet.

Die erste Ziffer beschreibt dabei die Lage der Strecke (1 = Zulauf, 2 = Abbiegebeziehung im Knotenpunkt und 3 = Abfluss), die zweite Ziffer den Arm der Einmündung (1-3 bei Einmündungen, 1-4 bei Kreuzungen) und die dritte Ziffer jeweils eine fortlaufende Nummer. Feste Größen für die letzte Ziffer sind im Zulauf die Ziffer 5 für einen Bereich etwa 6 m vor der Haltlinie und im Knotenpunkt für den Strom. Damit ergibt sich beispielweise aus der Streckennummer 206 die Lage „innerhalb des Knotenpunkts“ und eine Strecke für Strom 6 (Rechtseinbieger). Die Strecke 125 liegt im Zulauf (= 1) des zweiten Knotenpunktarms (= 2) direkt vor der Haltlinie (= 5). Die Streckennummern spielen eine besondere Rolle bei der Auswertung der Daten. Da VISSIM von Haus aus keine Möglichkeit bietet, manche der benötigten Größen (z. B. Zeitpunkt der Ankunft an der Warteschlange) zu identifizieren, wurden diese mithilfe der Fahrzeugprotokollierung ausgelesen. Dabei schreibt VISSIM zu jedem Simulationszeitschritt für jedes im Netz befindliche Fahrzeug bestimmte Informationen in eine Textdatei, diese sind:

- Simulationslauf,
- Simulationssekunde,
- Fahrzeugnummer,
- Routennummer,
- Streckennummer,
- Fahrstreifennummer,
- Geschwindigkeit und
- Fahrzeugtyp.

20	\$VEHICLE:SIMRUN;SIMSEC:NO;ROUTENO;LANE\LINK\
21	1;1.40;2;;121;1;52.27;100
22	1;1.50;1;;111;1;54.60;100
23	1;1.50;2;;121;1;52.27;100
24	1;1.60;1;;111;1;55.11;100
25	1;1.60;2;;121;1;52.27;100
26	1;1.60;4;;141;1;58.81;100
27	1;1.70;1;;111;1;55.57;100
28	1;1.70;2;;121;1;52.27;100
29	1;1.70;4;;141;1;58.81;100
30	1;1.80;1;;111;1;55.98;100
31	1;1.80;2;;121;1;52.27;100
32	1;1.80;4;;141;1;58.81;100
33	1;1.90;1;;111;1;56.32;100
34	1;1.90;2;;121;1;52.27;100
35	1;1.90;4;;141;1;58.81;100
36	1;2.00;1;;111;1;56.59;100
37	1;2.00;2;;121;1;52.27;100
38	1;2.00;4;;141;1;58.81;100
39	1;2.10;1;;111;1;56.79;100

Bild 4-2: Auszug aus einem Fahrzeugprotokoll

Wird ein Simulationslauf durchgeführt, werden diese Informationen in eine Textdatei ausgegeben. Bild 4-2 zeigt einen Auszug aus einem solchen Protokoll. Der Auszug zeigt, dass es sich um den ersten Simulationslauf handelt. Zu sehen sind drei Fahrzeuge zwischen Simulationssekunde 1.40 und 2.10 mit den Nummern 1, 2 und 4. Alle drei Fahrzeuge befinden sich noch im Zulauf (Strecken 111, 121 und 141) und fahren mit einer Geschwindigkeit von etwas über 50 km/h. Bei allen drei Fahrzeugen handelt es sich um Pkw (100).

Bei einer Berechnungsfrequenz von 10 Simulationsschritten pro Sekunde werden 10 Zeilen pro Sekunde und Fahrzeug geschrieben. Das führt dazu, dass die Protokolle teilweise mehrere Millionen Zeitstempel von Fahrzeugen enthalten. Um diese effizient zu verarbeiten wurden Skripte erstellt, welche die Textdatei einlesen, die Fahrzeuge einzeln aus dem Protokoll extrahieren und anschließend zu jedem Fahrzeug die notwendigen Zeitstempel ermitteln. Die Zeitstempel sollten dabei möglichst denen entsprechen, die auch aus den Videos der Messungen ermitteln wurden.

Im Einzelnen sind das für die signalisierten Knotenpunkte:

- Ankunft am Ende der Warteschlange,
- Ankunft an der Haltlinie,
- Überfahren der Haltlinie und
- Verlassen des Knotenpunkts.

Der Zeitstempel, an dem das Fahrzeug an der Warteschlange ankommt, wurde ermittelt, indem im

Fahrzeugprotokoll die Simulationssekunde gesucht wurde, bei der sich das Fahrzeug noch im Zulauf befindet (also auf einer der Strecken 1xx) und die Geschwindigkeit zum ersten Mal unter 1 km/h liegt. Dabei werden Strecken mit der Nummer 1x5 nicht berücksichtigt. Befindet sich das Fahrzeug auf einer dieser Strecken und die Geschwindigkeit fällt unter 1 km/h, so handelt es sich um den Zeitstempel, an dem das Fahrzeug an der Haltlinie ankommt. Die Länge der Strecken 1x5 wurde dabei mit circa sechs Metern so gewählt, dass sich immer nur ein Fahrzeug in VISSIM auf dieser Strecke befinden kann. Sobald das Fahrzeug in einem Zeitschritt eine Strecke mit der Nummer 2xx befährt, hat es die Haltlinie überfahren. Wird die Strecke 3xx befahren, verlässt das Fahrzeug den Knotenpunkt. Die Übergänge zwischen den Verbindern mit den Nummer 2xx und den Strecken 3xx wurden dabei so gesetzt, dass sie dem Punkt entsprechen, bei dem in den Videos der Zeitstempel „Verlassen des Knotenpunkts“ erfasst wurde. Wird ein Zeitstempel in der Zufahrt nicht registriert, weil das Fahrzeug z. B. nicht unter 1 km/h in der Zufahrt oder vor der Haltlinie fährt, wird entsprechend der nächste Zeitstempel gewählt. Das bedeutet, dass ein durchfahrendes Fahrzeug den gleichen Zeitstempel für Ankunft am Ende der Warteschlange, Ankunft an der Haltlinie und Überfahren der Haltlinie besitzt. So ist es möglich, alle durchfahrenden und nicht wartenden Fahrzeuge einfach zu identifizieren. Diese Vorgehensweise entspricht der, die auch bei der Auswertung der Videos angewendet wurde. Der genutzte Fahrstreifen wurde beim Überfahren der Haltlinie erfasst. Um die Fahrzeugtypen in der Auswertung unterscheiden zu können, wurden diese ebenfalls in das Fahrzeugprotokoll ausgegeben. Anhand der Nummer der gewählten Route, welche auch im Fahrzeugprotokoll steht, konnten die Fahrzeuge bei der Auswertung dem richtigen Strom zugeordnet werden.

Mithilfe dieser Skripte können Tabellen mit allen Informationen aller Fahrzeuge erstellt werden, die weitestgehend den Informationen entsprechen, welche aus den Videodaten erhoben wurden. Somit wurde eine größtmögliche Vergleichbarkeit der erhobenen Zeitstempel zwischen Realität und Simulation sichergestellt.

Um die Belastung der einzelnen Ströme und Strecken zu definieren, müssen Fahrzeugzuflüsse und Routen definiert werden. Da im ersten Schritt das Ziel die Kalibrierung der Modelle anhand der Messungen ist, wurde die gemessene Belastung nachgebildet. Dabei wurden drei unterschiedliche Fahr-

zeugzusammensetzungen definiert, welche der Unterscheidung im HBS (2015) entsprechen:

- Leichtverkehr (Pkw ohne/mit Anhänger, Lfw und Krad),
- Lkw ohne Anhänger und Busse und
- Lkw-Fahrzeugkombination (Lkw mit Anhänger und Sattel-Kfz).

Für diese drei Fahrzeuggruppen werden der Zufluss und die Routenwahl, die für die Abbiegevorgänge notwendig ist, in VISSIM getrennt modelliert. Zuerst werden dafür aus den Messdaten die Belastungen der einzelnen Ströme innerhalb der Spitzenstunde in 5-Minuten-Intervallen bestimmt. Dabei wurden die Zeitstempel „Ankunft am Ende der Warteschlange“ verwendet, da diese weitgehend die Nachfrage repräsentieren. Die Verkehrsstärken der 5-Minuten-Intervalle wurden gleitend zu 15-Minuten-Intervallen aggregiert. Die Spitzenstunde stellt dann die Stunde des Messzeitraums dar, in der die Belastung von vier aufeinanderfolgenden 15-Minuten-Intervallen am stärksten ist.

Strom	$q_{LV}$	$q_{LkwBus}$	$q_{LkwK}$	$q_{Ges}$
2	608	23	1	632
3	159	3	0	162
4	125	1	1	127
6	281	1	0	282
7	357	6	1	364
8	503	4	0	507
Summe	2.033	38	3	2.074

Tab. 4-1: Belastung in der Spitzenstunde für den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neu-Straße in Karlsruhe

Da der Zufluss in VISSIM pro Strecke erfolgt, wurde für jede Zufahrt eine gemeinsame Belastung für die entsprechenden Ströme bestimmt. Damit entstehen für Einmündungen mit drei Zufahrten und drei Fahrzeugzusammensetzungen mit zwölf 5-Minuten-Intervallen in der Stunde 108 Belastungswerte, für Kreuzungen entsprechend 144. Da die ersten Fahrzeuge in ein leeres Netz einfahren, bedarf es in der Simulation eines Vorlaufs. Dieser Vorlauf wurde auf 15 Minuten festgelegt und mit der Belastung der ersten 15 Minuten der Spitzenstunde abgebildet. Um Wartezeiten analysieren zu können, wurde außerdem ein Nachlauf von 15 Minuten definiert, welcher in der Belastung der letzten Viertelstunde der Spitzenstunde entspricht. Insgesamt wurde jedes Netz 90 Minuten belastet.

Um die Belastung der Zufahrt auf die entsprechenden Ströme aufzuteilen, wurden in VISSIM statische Routen modelliert. Analog zur Belastung wurden diese ebenfalls in 5-Minuten-Intervallen ermittelt und nachgebildet. Die Routen wurden nach den drei Fahrzeugzusammensetzungen getrennt modelliert. Für jeden Strom entstehen dabei drei statische Routen. Insgesamt wurden bei Einmündungen 216 und bei Kreuzungen 432 Werte ermittelt, um die Belastung der drei Fahrzeuggruppen in fünf Minuten abzubilden.

Tabelle 4-1 zeigt exemplarisch die Belastung in der Spitzenstunde für den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neu-Straße in Karlsruhe, Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3 die Zuflüsse und Routen in VISSIM für die erste halbe Stunde.

Die Fahrzeuge eines Streckenzuflusses werden in VISSIM immer am Anfang der jeweiligen Strecken eingesetzt. Da die gezählten Messwerte aus dem Zeitstempel „Ankunft am Ende der Warteschlange“ stammen, ist dabei ein minimaler zeitlicher Versatz

Zufluss	FzG	0 – 5 min	5 – 10 min	10 – 15 min	15 – 20 min	20 – 25 min	25 – 30 min
1	LV	780	960	708	720	948	528
	Lkw+Bus	48	24	60	12	12	0
	LkwK	0	0	0	0	12	0
2	LV	420	540	372	396	432	324
	Lkw+Bus	0	0	0	0	0	0
	LkwK	0	0	0	0	0	0
3	LV	888	792	900	936	924	768
	Lkw+Bus	24	12	0	24	12	12
	LkwK	0	0	0	0	0	0

Tab. 4-2: Zuflüsse in VISSIM für die erste halbe Stunde für den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neu-Straße

Strom	FzG	0 – 5 min	5 – 10 min	10 – 15 min	15 – 20 min	20 – 25 min	25 – 30 min
2	LV	612	720	528	564	804	432
	LkwBus	36	24	48	12	12	0
	LkwK	0	0	0	0	12	0
3	LV	168	240	180	156	144	96
	LkwBus	12	0	12	0	0	0
	LkwK	0	0	0	0	0	0
4	LV	132	168	60	180	36	120
	LkwBus	0	0	0	0	0	0
	LkwK	0	0	0	0	0	0
6	LV	288	372	312	216	396	204
	LkwBus	0	0	0	0	0	0
	LkwK	0	0	0	0	0	0
7	LV	396	336	420	324	372	288
	LkwBus	24	12	0	0	12	0
	LkwK	0	0	0	0	0	0
8	LV	492	456	480	612	552	480
	LkwBus	0	0	0	24	0	12
	LkwK	0	0	0	0	0	0

Tab. 4-3: Routen in VISSIM für die erste halbe Stunde für den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neu-Straße

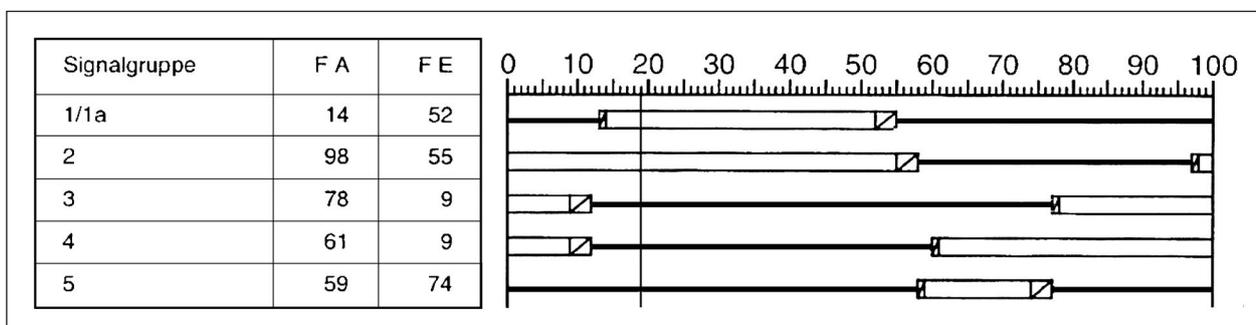


Bild 4-3: Originales Signalprogramm am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe

zu erwarten. Dieser wird in der weiteren Betrachtung vernachlässigt. Bild 4-4 zeigt die Belastungen der 5-Minuten-Intervalle des diskutierten Knotenpunkts und veranschaulicht die Belastungssituation in der Spitzenstunde.

Neben der Geometrie und der Belastung des Netzes ist es wichtig, die Lichtsignalanlage korrekt abzubilden. Im VISSIM wurde diese so nah wie möglich an der Realität modelliert. Dazu wurden die Signalgeber an den entsprechenden Stellen im Netz platziert und das Signalprogramm nachgebildet. Dieses wurde entweder von der zuständigen Behörde zur Verfügung gestellt oder anhand der Videoauszeichnung rekonstruiert.

In der Simulation wurde im Signalprogramm für jeden Strom eine eigene Signalgruppe definiert, auch wenn diese gemeinsam signalisiert werden. Dieser Schritt war notwendig, um die spätere Auswertung zu vereinheitlichen. Die Bezeichnung der Signalgruppen stimmt daher nicht überein. Das Verhalten der Fahrzeuge bleibt davon unbeeinflusst. Bild 4-3 zeigt das vom Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe zur Verfügung gestellte Signalprogramm des diskutierten Knotenpunkts Ostring/Haid-und-Neustraße und den modellierten Signalzeitenplan in VISSIM (vgl. Bild 4-5). Lag bei einem Knotenpunkt eine bedingte Freigabe vor, wurde diese durch Konfliktflächen in VISSIM abgebildet.

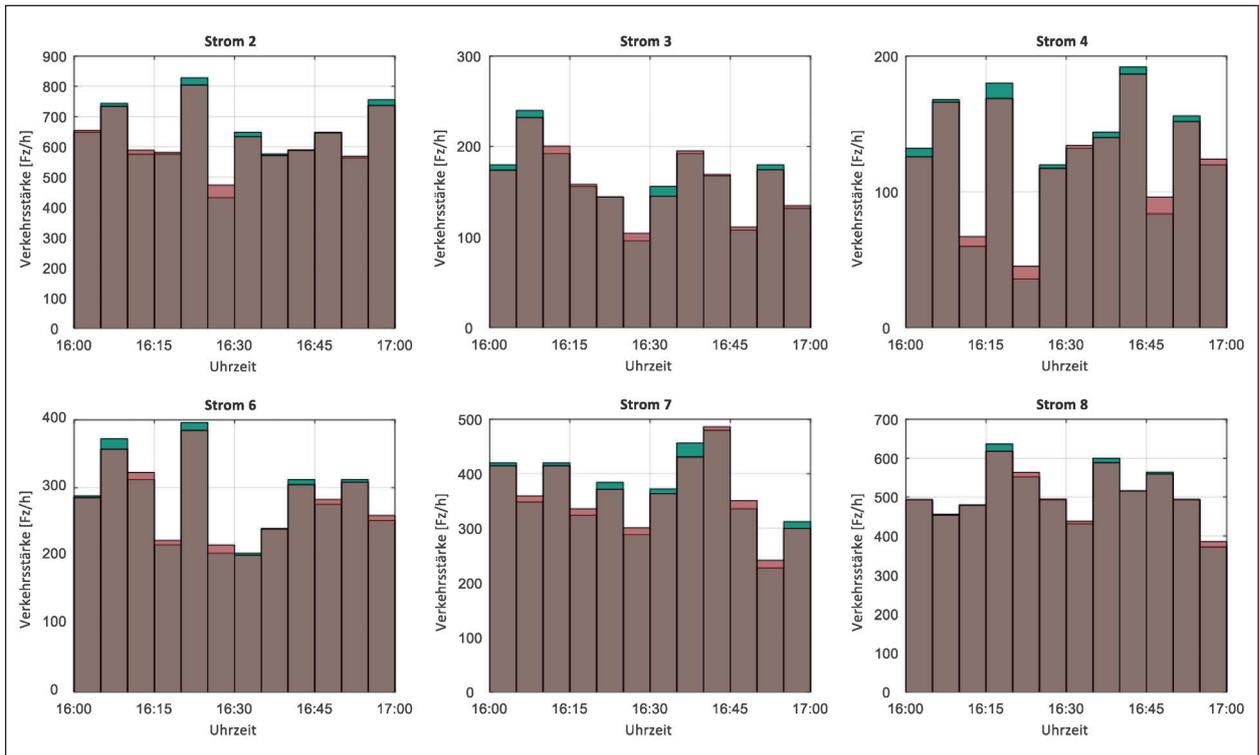


Bild 4-4: Belastung in der Spitzenstunde pro Strom am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neu-Straße in Karlsruhe in 5-Minuten-Intervallen (Grün: Messung, Rot: Simulation)

Nr.	Signalgruppe	Signalfolge	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	0	1	2	3	
2	Strom 2	[Signal icons]			14			52					13	52		1	3
4	Strom 4	[Signal icons]							59	74			58	74		1	3
6	Strom 6	[Signal icons]		9						61			60	9		1	3
7	Strom 7	[Signal icons]		9							78		77	9		1	3
8	Strom 8	[Signal icons]						55					97	55		1	3

Bild 4-5: Signalprogramm der Einmündung Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe im VISSIM-LSA-Editor

Für jeden Knotenpunkt wurde der Signalzeitenplan digital aufbereitet und den Zeiten der erhobenen Fahrzeugdaten zugeordnet. Dies wurde in der Regel anhand der Videoaufzeichnung durchgeführt, auf denen die Signalbildwechsel zu erkennen waren. Durch diesen Schritt konnte für jedes erhobene Fahrzeug nachvollzogen werden, zu welchem Zeitpunkt im Signalzeitenplan es an der Warteschlange ankommt und die Haltlinie überfährt. In VISSIM wurden zur Auswertung die Umschaltprotokolle akti-

viert. Dabei wurde jeder Signalbildwechsel in einer einfachen Textdatei protokolliert. Diese Umschaltzeitpunkte wurden ebenfalls eingelesen und anschließend auf gleiche Weise den aus dem Fahrzeugprotokoll extrahierten Fahrzeugen zugeordnet.

Für die modellieren Knotenpunkte wurde zu Beginn als Geschwindigkeitsverteilung eine der vorhandenen Verteilungen aus VISSIM verwendet. Dabei wurden die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten

der Strecken berücksichtigt. Im dargestellten Beispiel des Knotenpunkts Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe wurde die reguläre Verteilung „50 km/h“ verwendet. Diese modelliert die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in einem Bereich von 48 km/h bis 58 km/h gleichverteilt. Da in VISSIM die Geometrie der Strecke keinen Einfluss auf die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge hat, müssen zusätzlich sogenannte Langsamfahrbereiche definiert werden. In der Mitte jeder Eckausrundung innerhalb des Knotenpunkts wurde dazu ein Langsamfahrbereich mit einer Länge von zwei Metern definiert. In Bild 4-1 sind diese Bereiche in Gelb hervorgehoben. Jedem Langsamfahrbereich kann eine eigene Geschwindigkeitsverteilung zugeordnet werden. Fährt ein Fahrzeug in VISSIM auf einen solchen Bereich zu, reduziert es seine Geschwindigkeit, um zu Beginn des Bereichs die entsprechende Geschwindigkeit zu erreichen. Nach Verlassen des Langsamfahrbereichs wird dem Fahrzeug wieder seine ursprüngliche Wunschgeschwindigkeit zugeordnet und das Fahrzeug beginnt zu beschleunigen. Die für jeden Langsamfahrbereich passende Geschwindigkeitsverteilung wird im ersten Kalibrierungsschritt ermittelt. Mit diesen fertig aufgebauten Netzen wurden die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Simulationen durchgeführt werden. Da es sich bei VISSIM um eine stochastische Fahrzeugsimulation handelt, müssen mehrere Simulationsläufe durchgeführt werden, um stabile und be-

lastbare Ergebnisse zu erhalten. Grundsätzlich wurden dabei die „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ (FGSV (2006) berücksichtigt. Hier wurden in der Regel jeweils zwischen 8 und 16 Läufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen und ansonsten unverändertem Netz durchgeführt. Als Ergebnis der Simulationsläufe werden, wie beschrieben, die Fahrzeugprotokolle ausgewertet. Dabei entsteht für jeden Simulationslauf ein eigenes Protokoll.

Nachdem alle Läufe eingelesen und zu jedem Fahrzeug die entsprechenden Zeitstempel gefunden sind, wird als Ergebnis für jeden Lauf eine Tabelle für jeden Strom gespeichert, die für jedes Fahrzeug die notwendigen Zeitstempel enthält. Der Aufbau der Tabelle entspricht dabei exakt dem Aufbau der Tabellen mit den empirischen Daten. Zur Auswertung können somit die Kennwerte der Tabellen mit den Messwerten und die Kennwerte der 8 bis 16 Tabellen mit den simulierten Werten auf gleiche Weise ausgewertet werden. Zum Vergleich zwischen Empirie und Simulation wurden die Daten der verschiedenen Läufe entweder gemittelt oder gemeinsam ausgewertet.

Zur Veranschaulichung zeigen Bild 4-6 und Bild 4-7 einen Ausschnitt aus den Daten der Erhebung und einen Ausschnitt der extrahierten Zeitstempel aus dem Fahrzeugprotokoll eines Simulationslaufs.

vid.St{1, 2}															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Fz	St	FS	t_anWS	t_anHL	t_ueHL	t_ueWL	t_ueKP	Par	KI	T_GES	T_EP	T_ST	T_WS	T_KP
1	1	2	1	0.6563	0.6563	0.6563	NaN	0.6564	NaN	100	2.3600	0	0	0	2.3600
2	2	2	2	0.6563	0.6563	0.6563	NaN	0.6564	NaN	200	5.3200	0	0	0	5.3200
3	3	2	2	0.6564	0.6564	0.6564	NaN	0.6564	NaN	200	4.2800	0	0	0	4.2800
4	4	2	1	0.6564	0.6564	0.6564	NaN	0.6564	NaN	200	2.6400	0	0	0	2.6400
5	5	2	2	0.6564	0.6564	0.6564	NaN	0.6565	NaN	200	4.1600	0	0	0	4.1600
6	6	2	1	0.6564	0.6564	0.6564	NaN	0.6564	NaN	200	2.6400	0	0	0	2.6400
7	7	2	2	0.6565	0.6565	0.6565	NaN	0.6565	NaN	200	3.4000	0	0	0	3.4000

Bild 4-6: Auszug aus den erhobenen Messdaten am Knotenpunkte Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe

sim{1, 1}.St{1, 2}															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Fz	St	FS	t_anWS	t_anHL	t_ueHL	t_ueWL	t_ueKP	Par	KI	T_GES	T_EP	T_ST	T_WS	T_KP
1	1	2	1	0.6637	0.6637	0.6637	NaN	0.6637	NaN	200	2.6000	0	0	0	2.6000
2	4	2	2	0.6637	0.6637	0.6637	NaN	0.6638	NaN	200	2.6000	0	0	0	2.6000
3	3	2	1	0.6638	0.6638	0.6638	NaN	0.6638	NaN	200	3.0000	0	0	0	3.0000
4	2	2	2	0.6638	0.6638	0.6638	NaN	0.6638	NaN	400	3.0000	0	0	0	3.0000
5	5	2	1	0.6640	0.6640	0.6645	NaN	0.6646	NaN	200	54.3000	49.9000	49.9000	0	4.4000
6	6	2	2	0.6640	0.6640	0.6645	NaN	0.6646	NaN	200	48.6000	43.8000	43.8000	0	4.8000
7	7	2	2	0.6641	0.6646	0.6646	NaN	0.6646	NaN	200	44.7000	0	40.9000	40.9000	3.8000

Bild 4-7: Auszug aus dem aufbereiteten Fahrzeugprotokoll des Simulationsmodells des Knotenpunkts Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe

In allen Simulationen wurden die Fahrzeuge mit dem Fahrzeugfolgemodell „Wiedemann 99“ simuliert, da dieses deutlich mehr und präzisere Freiheitsgrade bei der Kalibrierung zulässt als das Modell „Wiedemann 74“.

#### 4.2.2 Grundlagen der Kalibrierung

Für die Kalibrierung der Modelle von Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage wurden zwei Größen herangezogen, zum einen die Durchfahrzeit der Durchfahrer und zum anderen die Zeitbedarfswerte der ersten Fahrzeuge in der Warteschlange. Die Durchfahrzeit beschreibt die Zeit, die durchfahrende Fahrzeuge benötigen, um den Bereich innerhalb des Knotenpunkts vollständig zu befahren. Sie entspricht damit der Zeit vom Überqueren der Haltlinie bis zu einem (bei der Messung definierten) Ausfahrtpunkt aus dem Knotenpunkt. In die Betrachtung gehen dabei nur Fahrzeuge ein, die nicht in einer Warteschlange oder an erster Position an einem roten Signalgeber warten mussten. Im Speziellen sind das hier Fahrzeuge, bei denen der Zeitstempel für die Ankunft an der Warteschlange dem Zeitstempel für das Überqueren der Haltlinie entspricht.

Für die Zeitbedarfswerte wurden die Zeitstempel der Fahrzeuge bei dem Überfahren der Haltlinie betrachtet. Dabei ist die Differenz dieses Zeitstempels zu dem des davor fahrenden Fahrzeuges der Zeitbedarfswert. Für das erste Fahrzeug in der Warteschlange wird die Zeit zwischen dem Signalbildwechsel von Rot-Gelb auf Grün und dem Überfahren der Haltlinie. Es wurden nur Fahrzeuge analysiert, die an der Warteschlange angekommen sind, bevor das davor fahrende Fahrzeug die Haltlinie überquert hat.

Für jeden Knotenpunkt wurde zuerst die Kalibrierung nach der Durchfahrzeit durchgeführt, da die Langsamfahrbereiche auch die Beschleunigung der in der Warteschlange stehenden Fahrzeuge beeinflussen. Durch diesen Umstand ändern sich auch die Zeitbedarfswerte der ersten Fahrzeuge, wenn eine andere Geschwindigkeitsverteilung für die direkt hinter der Haltlinie liegenden Langsamfahrbereiche gewählt wird.

Durch diese beiden variablen Größen werden die Wartezeit und die Verlustzeit eines Verkehrsstroms an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen im Wesentlichen beeinflusst (bei gleichem Signalzeitenplan). Die Durchfahrzeit ist dabei ein direkter Anteil

an der Verlustzeit. Der Zeitbedarfswert bestimmt dagegen die Sättigungsverkehrsstärken und das Abbauverhalten der Warteschlange eines Fahrstreifens. Der Zeitbedarfswert ist außerdem die wesentliche Eingangsgröße für die Wartezeitberechnung nach dem HBS (2015). Die Simulationen für die einzelnen Kalibrierungsschritte wurden mit den Belastungen und Verkehrszusammensetzungen durchgeführt, die der verglichenen Spitzenstunde entsprechen. Für einzelne Schritte wurden zwischen 8 und 16 Simulationsläufe mit unterschiedlicher Startzufallszahl durchgeführt. Zur abschließenden Prüfung aller hier beschriebenen Zwischenschritte wurden die Simulationen mit 100 Zufallszahlen wiederholt auf denen die im Weiteren dargestellten Ergebnisse basieren.

#### 4.2.3 Kalibrierung anhand der Durchfahrzeit

Da mittlere Warte- und Verlustzeiten über eine ganze Stunde betrachtet werden, ist der Einfluss der Durchfahrzeit auf diese durch den Mittelwert oder den Median beschreibbar. Da es bei der Erhebung zu einzelnen Messfehlern oder Fehlzuordnungen kommen kann, ist der Median der Durchfahrzeiten zur Beurteilung besser geeignet, da er weniger sensibel auf einzelne Ausreißer reagiert. Um allerdings sicherzustellen, dass eine korrekte Abbildung der empirischen Daten in VISSIM erfolgt, wurde zusätzlich die Verteilung der Durchfahrzeit betrachtet. Dabei wird jeder erhobene oder simulierte Wert einer Klasse zugeordnet. Die Klassenbreite wurde je nach Anzahl der erhobenen Werte auf 0,25 s oder 0,5 s festgelegt. Die Häufigkeiten geben an, wie viele Werte in jeder einzelnen Klasse vorhanden sind. Um die Daten der Empirie mit mehreren Simulationsläufen mit unterschiedlichen Zufallszahlen vergleichen zu können, wird hier die relative Häufigkeit verwendet. Die Messdaten und die Simulationsergebnisse konnten auf gleiche Weise ausgewertet werden, da die erhobenen Zeitstempel vergleichbar sind und die Daten im gleichen Format vorliegen. Durch die zur Messung sehr gut vergleichbar nachgebildete Auswertung der Simulationsergebnisse können die Werte direkt miteinander verglichen werden.

Die Zeit zum Durchfahren ist in der Simulation von zwei Parametern abhängig. Zum einen von der Länge der zu durchfahrenden Strecke und zum anderen von den dabei gefahrenen Geschwindigkeiten. Da die Modelle so aufgebaut sind, dass die Geometrie der Strecken der Realität entspricht,

bleibt als Freiheitsgrad nur die gefahrene Geschwindigkeit. Diese wird in VISSIM mithilfe von Langsamfahrbereichen eingestellt. Da die gefahrenen Geschwindigkeiten in der Realität von der Fahrstreifengeometrie und unterschiedlichen Einflussfaktoren des Fahrstreifens abhängig sind, wird jeder Fahrstreifen getrennt betrachtet. Durch verschiedene Geschwindigkeitsverteilungen, welche den Langsamfahrbereichen zugrunde liegen, ist eine fahrstreifenfeine Anpassung in VISSIM problemlos zu realisieren. Bild 4-8 zeigt die Verteilung der Durchfahrzeiten am Knotenpunkt Ostring/Haid- und-Neustraße für jeden Fahrstreifen. Die roten Säulen bilden die analysierten Werte aus der Messung ab. Für die grünen Säulen wurde eine Simulation durchgeführt, der vollständig die Standardparameter von VISSIM hinterlegt sind. Die einzelnen Langsamfahrbereiche sind im ersten Schritt noch nicht definiert. Die beiden vertikalen Linien entsprechen den Medianen.

Um die einzelnen Kalibrierungsschritte beurteilen zu können wird ein Fehlermaß benötigt. Die Verteilung der Durchfahrzeit wird anhand der prozentualen Überschneidung zwischen gemessenen und simulierten Daten nach Gleichung 4-1 bewertet.

$$\ddot{U} = 100 \cdot \sum \min(x_{sim}, x_{obs}) \quad (Gl. 4-1)$$

mit

- $\ddot{U}$  Überschneidung [%]
- $x_{sim}$  rel. Anteil einer Klasse (Simulation)
- $x_{obs}$  rel. Anteil einer Klasse (Messung)

Dafür wird die Summe aus dem jeweils kleineren Wert jeder Klasse gebildet. Die Summe aller relativen Häufigkeiten einer Verteilung ergibt immer genau Eins. Sollten die beiden Verteilungen exakt aufeinanderliegen, würde die relative Überschneidung damit auch Eins ergeben, da  $x_{sim}$  gleich  $x_{obs}$  ist. Sofern beide Verteilungen vollständig nebeneinanderliegen, wäre das Minimum der relativen Häufigkeit einer jeden Klasse jeweils null, da immer entweder  $x_{sim}$  oder  $x_{obs}$  null wäre. Die Summe wäre damit ebenfalls null und es würde sich eine Überschneidung von 0 % ergeben. Die Überschneidung  $\ddot{U}$  ist in den Diagrammen in Bild 4-8 in der linken, oberen Ecke angegeben.

Um die mittlere Durchfahrzeit zu beurteilen, wird die prozentuale Abweichung des Medianes der simulierten Werte vom Median der gemessenen Werte nach Gleichung 4-2 betrachtet.

$$A = 100 \cdot \frac{|\bar{x}_{obs} - \bar{x}_{sim}|}{\bar{x}_{obs}} \quad (Gl. 4-2)$$

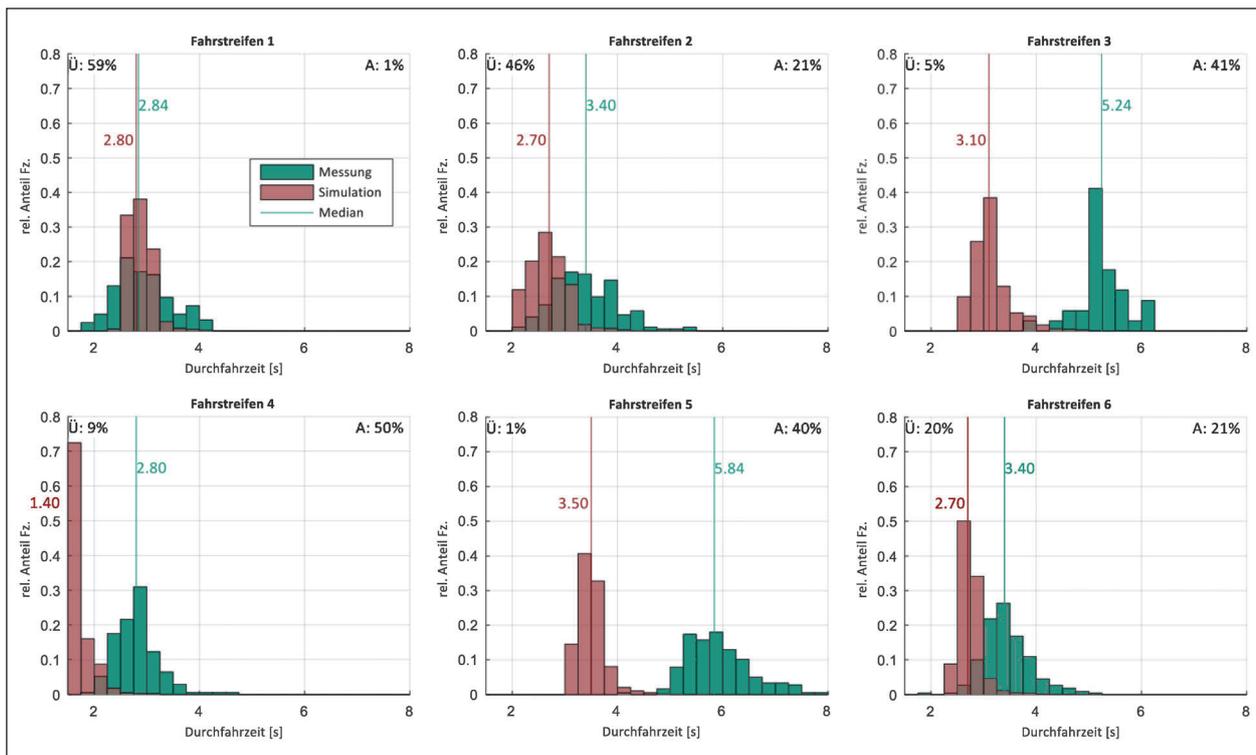


Bild 4-8: Relative Verteilung der Durchfahrzeit durch den Knotenpunkt Ostring/Haid- und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (ohne Langsamfahrbereiche, unkalibriert)

mit

A Abweichung der Mediane [%]

$\tilde{x}_{sim}$  Median der simulierten Zeiten [s]

$\tilde{x}_{obs}$  Median der gemessenen Zeiten [s]

Die bestmögliche Kalibrierung sollte also zu einer Überschneidung  $\bar{U}$  von 100 % und einer Abweichung A von 0 % führen.

Im unkalibrierten Netz ergeben sich die Durchfahrzeiten wie sie in Bild 4-8 zu sehen sind. Vor allem auf den Abbiegefahrstreifen (Nr. 3, 4 und 5) sind die gefahrenen Geschwindigkeiten in VISSIM (Rot) deutlich zu hoch, wodurch sich zu kleine Durchfahrzeiten ergeben. Da die Geometrie in VISSIM bei der Wahl der Geschwindigkeit nicht berücksichtigt wird, fahren die Fahrzeuge hier in etwa mit ihrer Wunschgeschwindigkeit durch die Kurven. Die Langsamfahrbereiche sind im unkalibrierten Netz noch nicht definiert. Betrachtet man die Zeiten für die Fahrstreifen der geradeausfahrenden Ströme (Fahrstreifen Nr. 1, 2 und 6), ist eine deutlich geringere Abweichung erkennbar, da die Fahrzeuge in der Realität Ihre Geschwindigkeit weniger verringern. In mehreren Schritten wurden dann die Geschwindigkeitsverteilungen für jeden Langsamfahrbereich angepasst, um eine möglichst geringe Abweichung

der Mediane bei einer guten Überschneidung der Verteilungen zu erreichen. Die Geschwindigkeitsverteilungen wurden dabei weiterhin gleichverteilt modelliert. Beispielweise wurde für Fahrstreifen 5 statt der Verteilung von 48 km/h bis 58 km/h im unkalibrierten Zustand eine Verteilung von 20 km/h bis 28 km/h gewählt. Dadurch konnte eine Überschneidung von 85 % und eine Abweichung der Mediane von 1 % erreicht werden. Für jeden Fahrstreifen wurde die Verteilung getrennt gewählt. Das Ergebnis dieses Kalibrierungsschritts ist in Bild 4-9 dargestellt. Die Abweichung der Mediane liegt für jeden Fahrstreifen unter 5 %, wobei gleichzeitig eine gute Überschneidung erreicht wird. Würde die Form der Geschwindigkeitsverteilung noch weiter angepasst, indem keine Gleichverteilung angenommen wird, könnte die Überschneidung vermutlich noch weiter verbessert werden. Allerdings ist davon auszugehen, dass dadurch die mittleren Warte- und Verlustzeiten nicht besser abgebildet werden.

Zusätzlich zur Betrachtung der einzelnen Fahrstreifen wurde die Durchfahrzeit auch für den gesamten Knotenpunkt betrachtet. Diese Betrachtung lässt eine Beurteilung der Kalibrierungsgüte im Hinblick auf die Durchfahrzeit zu. Bild 4-10 veranschaulicht die Durchfahrzeit über den gesamten Knotenpunkt vor der Kalibrierung. Dabei wurden die Daten der

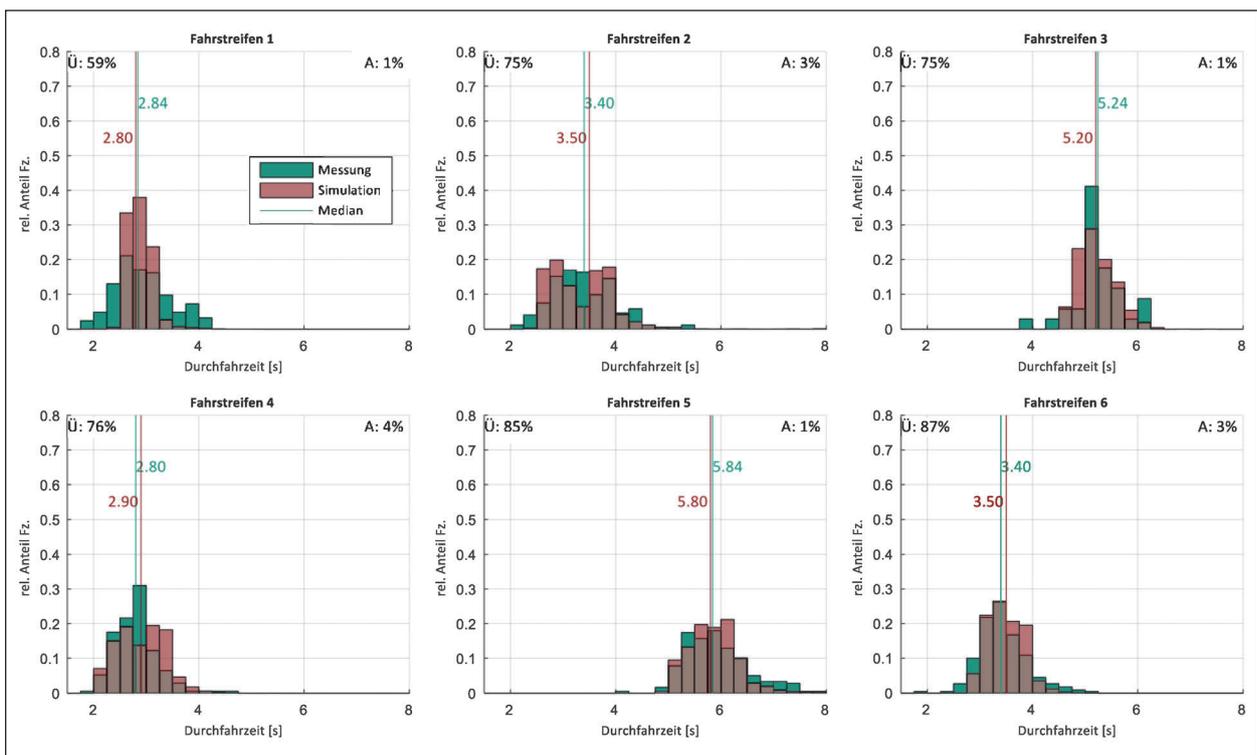


Bild 4-9: Relative Verteilung der Durchfahrzeit durch den Knotenpunkt Ostring/Haid- und Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (kalibrierte Langsamfahrbereiche)

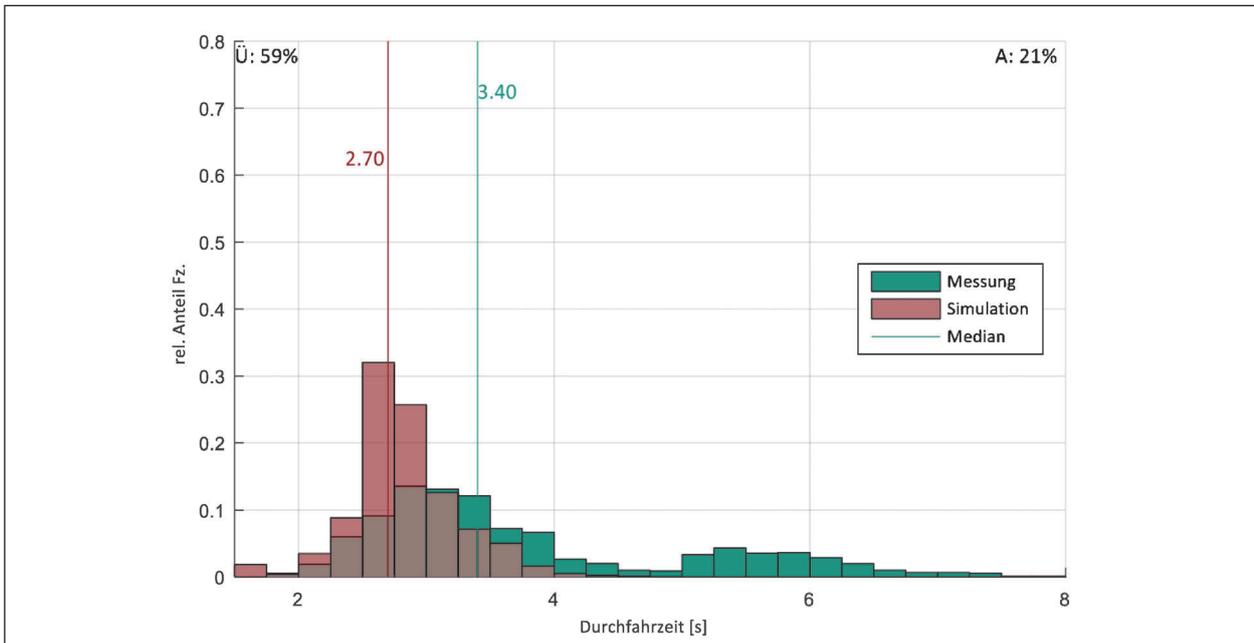


Bild 4-10: Relative Verteilung der Durchfahrzeit durch den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe (ohne Langsamfahrbereiche, unkalibriert)

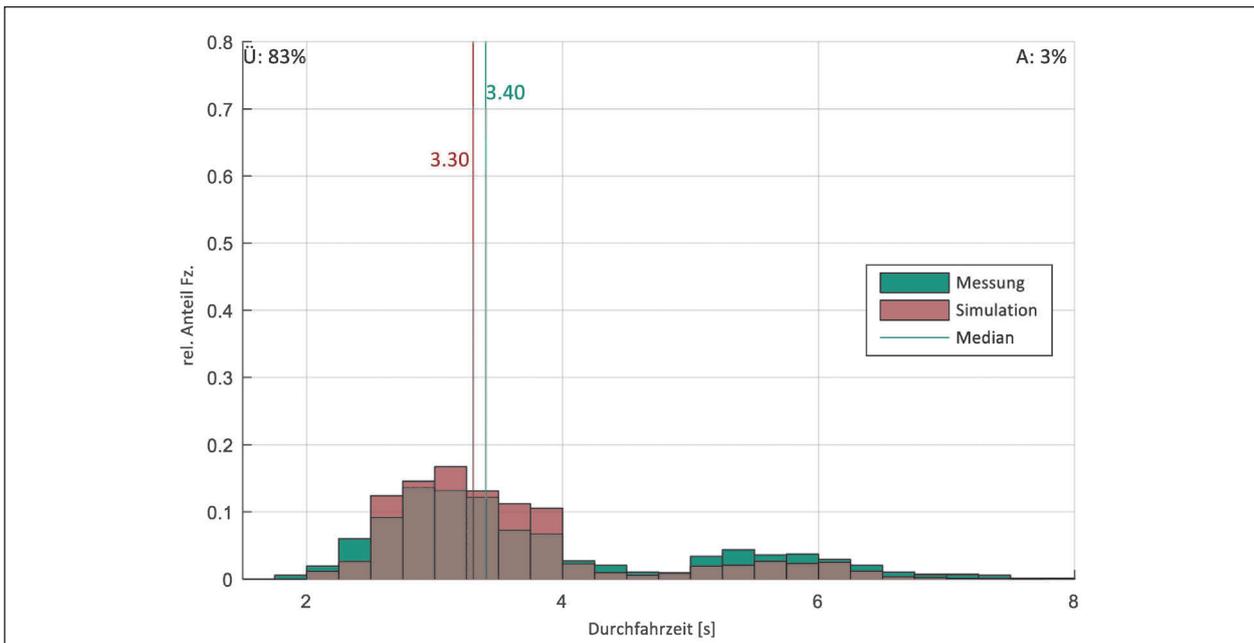


Bild 4-11: Relative Verteilung der Durchfahrzeit durch den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe (kalibrierte Langsamfahrbereiche)

einzelnen Fahrstreifen gemeinsam visualisiert. Die Interpretation folgt der der Einzelfahrstreifen. Nachdem die Kalibrierung durchgeführt wurde, liegen die Gesamtabweichung bei etwa 3 % und die Überschneidung bei über 80 % (vgl. Bild 4-11). Die Durchfahrzeit ist damit gut abgebildet.

#### 4.2.4 Kalibrierung anhand der Zeitbedarfswerte

Der Zeitbedarfswert ist neben der Verkehrsstärke die wesentliche Eingangsgröße im Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage des HBS (2015). Zum einen ist die Zeit, in der sich die Warteschlange abbaut, vom Zeitbedarfswert abhängig. Daraus folgt zum anderen die Dauer, die die Warteschlange existiert und somit auch die Rückstaulänge und die mittlere

Wartezeit. Soll die Wartezeit mit einer Simulation korrekt abgebildet werden, ist also eine realitätsnahe Modellierung der Zeitbedarfswerte notwendig. Um eine einheitliche Bewertung der verschiedenen Knotenpunkte und deren Fahrstreifen vornehmen zu können, wurden dazu die Zeitbedarfswerte der ersten sechs Fahrzeuge in jeder Warteschlange analysiert. Dabei wurden nur die Fahrzeuge in der Spitzenstunde ausgewertet. Bild 4-12 zeigt die Zeitbedarfswerte abhängig von der Position auf jedem Fahrstreifen der Einmündung Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe. Dazu wurde aus den empirischen und den simulierten Daten für jedes Fahrzeug bestimmt, in welcher Freigabezeit es die Haltlinie überfahren hat. Anschließend konnte für jedes Fahrzeug ermittelt werden, an welcher Position es sich in der Warteschlange befunden hat. Diese Position ist allerdings nur gültig, wenn das Fahrzeug bereits an der Warteschlange ankam, bevor die Freigabezeit begann oder bevor das davor fahrende Fahrzeug die Haltlinie überfahren hat. Alle anderen Fahrzeuge sind durchfahrende Fahrzeuge, die in die Betrachtung der Zeitbedarfswerte nicht eingehen. Ähnlich wie bei den Durchfahrzeiten kommt es dabei hauptsächlich auf den mittleren Zeitbedarfswert an, da dieser ebenfalls im HBS (2015) berechnet wird. Der mittlere Zeitbedarfswert ist dabei nicht abhängig von der Position der Fahrzeuge, sondern

repräsentiert die Fahrzeuge aller Positionen in der Spitzenstunde.

Die beiden Mittelwerte aller erfassten Fahrzeuge werden durch die horizontalen Linien abgebildet. Die Abweichung der simulierten Daten von den gemessenen Werten wird in diesem Fall durch die prozentuale, mittlere quadratische Abweichung (RMSPE) beschrieben:

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{x_n^{\text{sim}} - x_n^{\text{obs}}}{x_n^{\text{obs}}} \right)^2} \quad (\text{Gl. 4-3})$$

mit

x Auswertegröße

sim Simulationswerte

obs beobachtete/berechnete Daten

In VISSIM lassen sich die Zeitbedarfswerte im Wesentlichen durch drei Faktoren beeinflussen. Als erstes durch Begrenzung der Geschwindigkeiten direkt hinter dem Messquerschnitt, also der Haltlinie. In den modellierten Netzen wird die Geschwindigkeit durch die Langsamfahrbereiche innerhalb des Knotenpunkts begrenzt. Da diese im ersten Kalibrierungsschritt bereits eingestellt sind, sollten die Langsamfahrbereiche nicht weiter parametrisiert

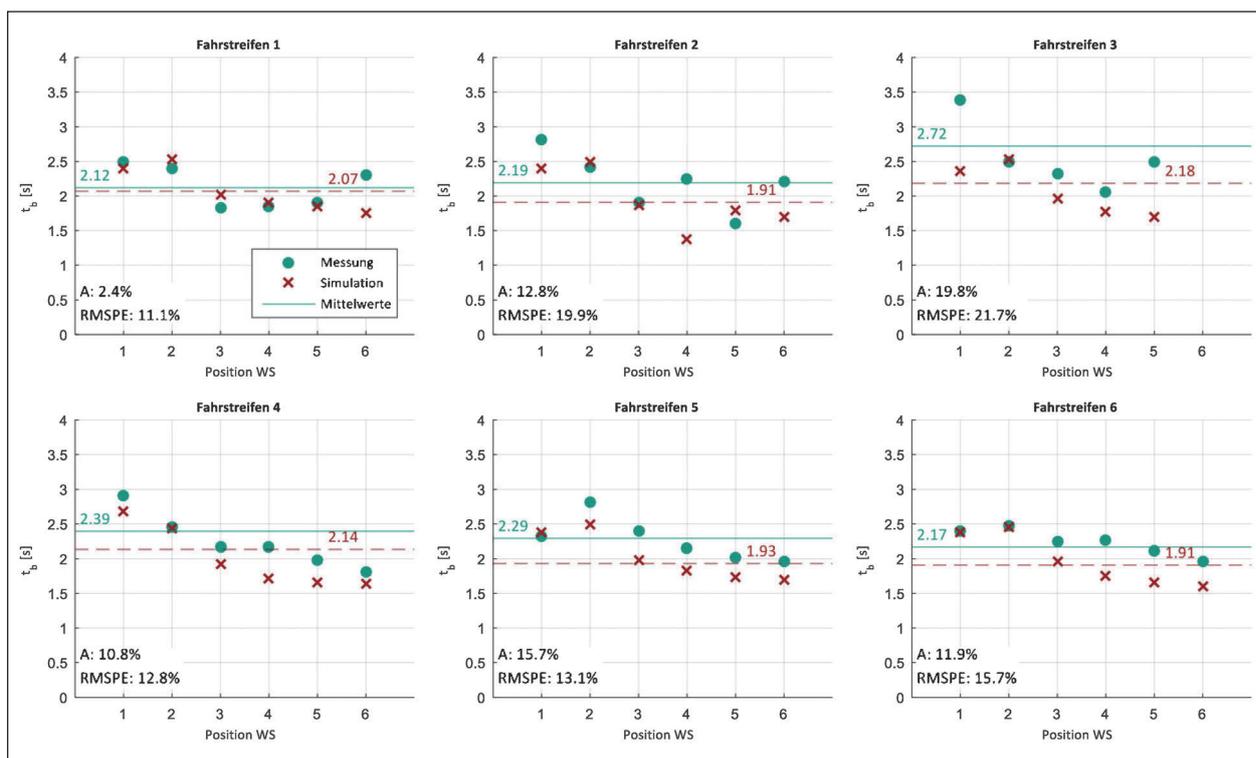


Bild 4-12: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (ohne Langsamfahrbereiche, unkalibriert)

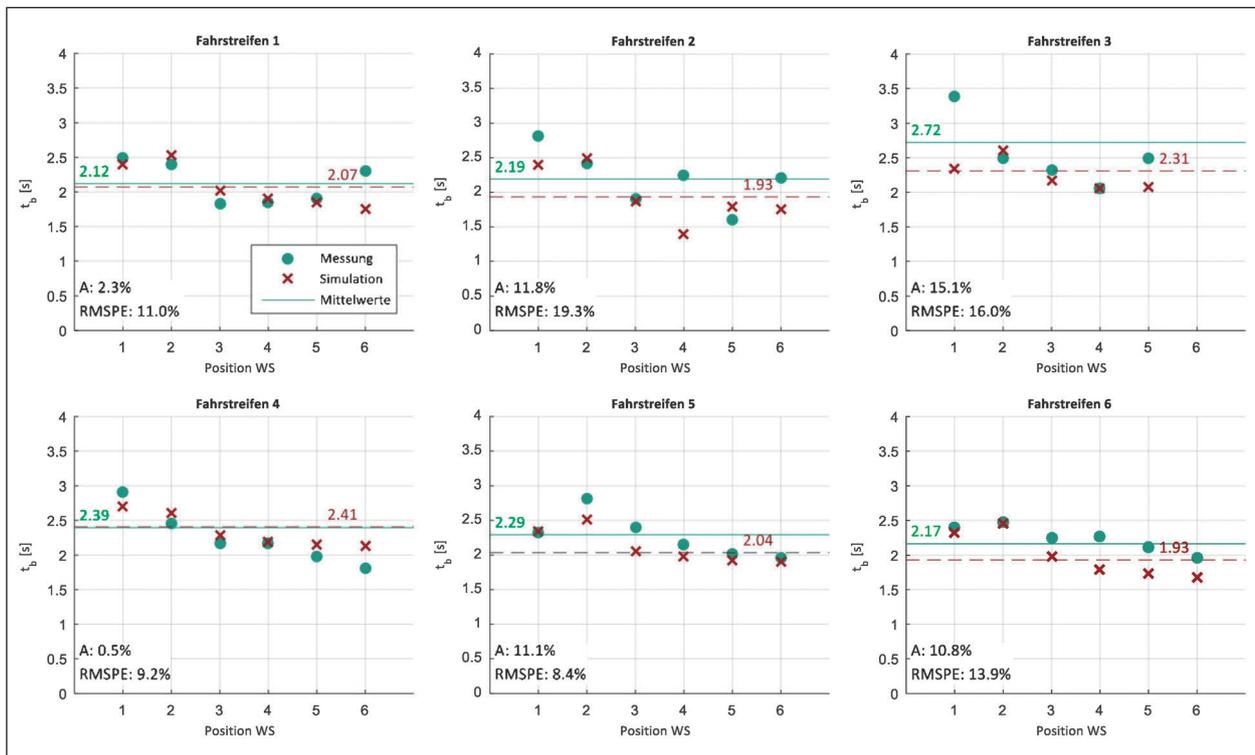


Bild 4-13: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (kalibrierte Langsamfahrbereiche)

werden. Bild 4-13 zeigt die Zeitbedarfswerte für jeden Fahrstreifen mit den kalibrierten Langsamfahrbereichen. Im Vergleich zum vollständig unkalibrierten Netz (Bild 4-12) ist gut zu erkennen, dass es bei den Fahrstreifen, bei denen die Durchfahrzeiten deutlich erhöht werden mussten, zu einem deutlichen Anstieg der Zeitbedarfswerte kommt (Fahrstreifen 2, 3 und 5). Dadurch nähern sich die Zeitbedarfswerte in der Simulation denen der Realität an.

Die beiden anderen Faktoren, die die Zeitbedarfswerte der Fahrzeuge an der Lichtsignalanlage in der Simulation beeinflussen, sind Parameter des verwendeten Fahrzeugfolgeverhaltens nach Wiedemann '99. Das sind der Stillstandabstand (CC0) und der Folgeabstand (CC1). Dabei entspricht CC0 dem durchschnittlichen Wunschabstand zwischen zwei Fahrzeugen in Metern, wenn diese zum Stehen kommen, sich also in der Warteschlange vor dem Signalgeber aufbauen. Der Folgeabstand CC1 beschreibt die Zeit in Sekunden, die ein Fahrer bei einer bestimmten Geschwindigkeit beibehalten möchte. Der Sicherheitsabstand  $dx_{safe}$ , den die Fahrzeuge in VISSIM halten, wird wie folgt berechnet:

$$dx_{safe} = CC0 + CC1 \cdot v \quad (\text{Gl. 4-4})$$

mit

CC0 Stillstandabstand [m]

CC1 Folgeabstand [s]

$v$  Geschwindigkeit [m/s]

Dieser Sicherheitsabstand entspricht näherungsweise dem Zeitbedarfswert der Fahrzeuge. Mit steigender Geschwindigkeit wird der räumliche Abstand bei gleichbleibendem Zeitabstand größer. Der Einfluss des Stillstandabstands wird also umso geringer, je weiter die Fahrzeuge beschleunigt haben. Sofern ein Fahrzeug weiter von der Haltlinie entfernt steht, ist dessen Geschwindigkeit an der Haltlinie höher. Wird der Parameter CC1 erhöht, beeinflusst er also im Wesentlichen die Fahrzeuge, die näher an der Haltlinie stehen. Fahrzeuge an weiter entfernten Positionen in der Warteschlange werden immer geringer durch CC1 beeinflusst. Der Folgeabstand wird dagegen bei höheren Positionen immer einflussreicher auf den gehaltenen Sicherheitsabstand und damit auf den Zeitbedarf. An den haltliniennahen Positionen ist der Einfluss von CC1 an der Haltlinie dagegen geringer. Betrachtet man die Zeitbedarfswerte im unkalibrierten (Bild 4-12) und im nach Durchfahrzeiten kalibrierten Netz (Bild 4-13) so ist zu erkennen, dass die Abweichung mit steigender Position in der Warteschlange größer wird. Das lässt darauf schließen, dass insbesonde-

re der Folgeabstand CC1 zu gering gewählt ist und erhöht werden muss.

Eine Besonderheit beim Stillstandabstand bilden die Fahrzeuge an erster Position. Da hier kein Vorderfahrzeug vorhanden ist, sondern diese direkt auf den Signalbildwechsel reagieren können, ist in VISSIM eine Möglichkeit gegeben, eine vom regulären Stillstandabstand CC0 unabhängige Größe vorzugeben. Dieser „Stillstandabstand zu statischen Hindernissen“ beeinflusst dabei alle Fahrzeuge, die nicht aufgrund eines anderen Fahrzeugs zum Stehen kommen, sondern beispielsweise an einem roten Lichtsignalgeber anhalten. Eine weitere Besonderheit der ersten Fahrzeuge betrifft das Reaktionsverhalten. Dazu gibt es in VISSIM die Möglichkeit, einen rot-gelben Signalgeber als „Grün“ oder als „Rot“ zu interpretieren. In der Standardeinstellung ist vorgegeben, dass die Fahrzeuge bereits beim Signalbildwechsel von Rot nach Rot-Gelb damit beginnen anzufahren. Wie sich in der Nacherhebung gezeigt hat, ist der Zeitbedarfswert für das erste Fahrzeug in der Simulation mit dieser Einstellung deutlich zu gering. Diese Tatsache spiegelt sich so auch in Simulationen zur Kalibrierung wieder. Deshalb wurde in jedem Netz von vornherein das Verhalten „warten (wie bei Rot)“ für das Signalbild Rot-Gelb eingestellt.

Insgesamt gliedert sich die Kalibrierung der Zeitbedarfswerte in zwei Teilschritte. Zuerst wurde der „Stillstandabstand zu statischen Hindernissen“ so eingestellt, dass die Fahrzeuge an erster Position in der Simulation ähnlich viel Zeit benötigen um die Haltelinie zu überfahren, wie die Fahrzeuge in den Messungen. Anschließend wurde die Kombination der Parameter CC0 und CC1 experimentell ermittelt, bei der die Abweichung der mittleren Zeitbedarfswerte aller Fahrzeuge und der RMSPE der Zeitbedarfswerte der einzelnen Positionen möglichst gering sind. Bei der Kalibrierung des Fahrverhaltens wurde davon ausgegangen, dass sich das Verhalten von Kfz-Führern zwar regional und auch zeitlich im Laufe des Tages unterscheiden kann, aber lokal an einem Knotenpunkt weitgehend unabhängig von der Fahrbeziehung und den genutzten Fahrstreifen ist und sich innerhalb der betrachteten Stunde nicht verändert. Deshalb wird während der Kalibrierung nicht mehr zwischen den unterschiedlichen Fahrstreifen unterschieden, sondern der Knotenpunkt im Gesamten betrachtet. Bild 4-14 zeigt den nur nach Durchfahrzeit kalibrierten Zustand. Dafür wurden alle Fahrstreifen gemeinsam analysiert, sodass hoch belastete Fahrstreifen stärker eingehen, als wenig belastete. Der mittlere Zeit-

bedarfswert (horizontale Linien) wurde wieder aus allen Fahrzeugpositionen berechnet.

Insgesamt fahren die Fahrzeuge in der Simulation zu schnell hintereinander über die Haltelinie (2,0 s in der Simulation zu 2,25 s während der Messung). Dabei fahren die Fahrzeuge an erster Position zu früh nach dem Signalgeberwechsel über die Haltelinie und die Fahrzeuge an vierter bis sechster Position folgen ihren Vorderfahrzeugen in zu geringem Abstand. Der Zeitbedarfswert für Fahrzeuge an zweiter und dritter Position entspricht dem der Messung. Durch eine Anpassung des Stillstandabstandes zu statischen Hindernissen auf 1,2 m kann das Überfahren der

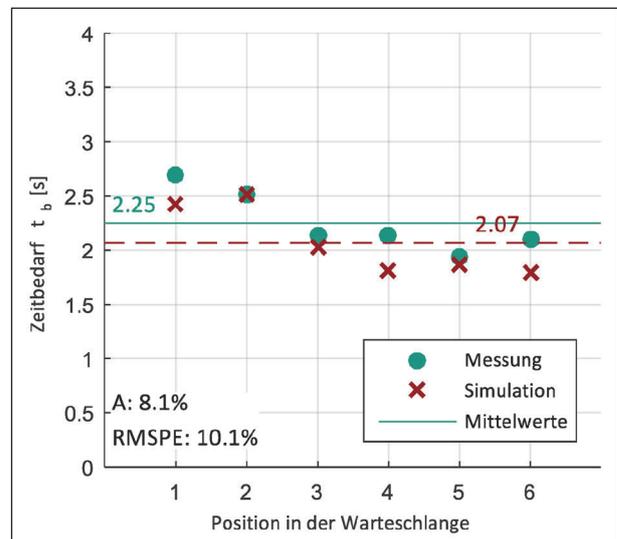


Bild 4-14: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe (kalibrierte Langsamfahrbereiche)

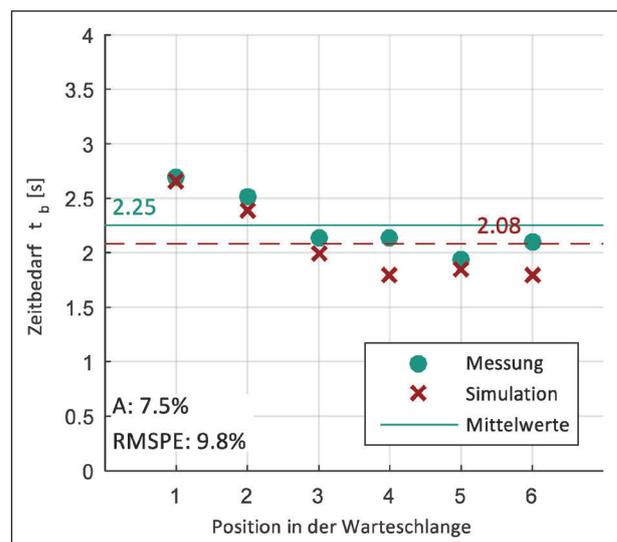


Bild 4-15: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe (kalibrierter „Stillstandabstand zu statischen Hindernissen“)

Fahrzeuge erster Position ausreichend verzögert werden, damit die mittleren Zeitbedarfswerte an erster Position der Realität entsprechen (Bild 4-15).

Es ist gut zu erkennen, dass sowohl die Zeitbedarfswerte von Fahrzeugen an zweiter und dritter Position sowieso an vierter bis sechster Position etwas zu niedrig sind. Auch der Mittelwert weicht mit über 7 % zu stark ab. Das führt zu der Schlussfolgerung, dass sowohl CC0 wie auch CC1 erhöht werden sollten. Da beide Parameter einen unterschiedlichen Einfluss auf die Zeitbedarfswerte der verschiedenen Positionen haben, wurde die optimale Kombination der Parameter experimentell ermittelt. Dabei wurden ausgehend von den Standardparametern ( $CC0 = 1,5$  und  $CC1 = 0,9$ ) in Schrittweiten von 0,1 alle Kombinationen der Parameter simuliert. Das obere Ende markiert dabei 2,5 für CC0 und 1,5 für CC1. Für jede Kombination konnte nach der Simulation die vollständige Auswertung der Fahrzeugprotokolle durchgeführt werden, um anschließend die Zeitbedarfswerte zu bestimmen. Dabei ergibt sich jeweils ein Wert für die Abweichung des Mittelwerts und für den RMSPE. Bild 4-16 und Bild 4-17 zeigen diese Fehlermaße für alle getesteten Parameterkombinationen. Dabei wird jede Kombination durch einen Punkt repräsentiert. Der jeweilige Wert der Abweichung und des RMSPE wird durch die Farbe visualisiert. Dabei zeigt die Farbskala neben der Grafik die verschiedenen Farbabstufungen an. Um eine möglichst geringe Abweichung des Mittelwerts zu erreichen, müsste ein Parametersatz gewählt werden, der im dunkelblauen

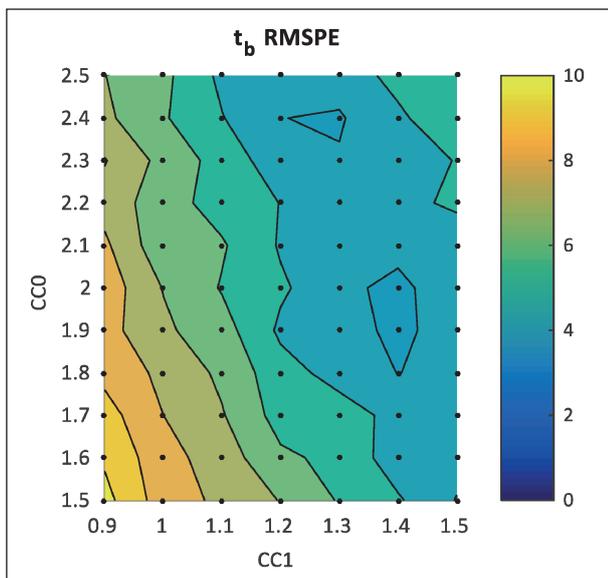


Bild 4-16: RMSPE der Zeitbedarfswerte in Abhängigkeit von CC0 und CC1 am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe

Bereich liegt. Dabei wäre eine Abweichung von nahe null realisierbar. Allerdings würde der RMSPE in diesem Fall immer über 5 % liegen. Ein möglichst geringer RMSPE (4,5 %) wäre bei einem Stillstandabstand von 2,0 und einem Folgeabstand von 1,4 erreicht. Da der Mittelwert bei dieser Kombination 2,7 % kaum von den Messwerten abweicht, wurde diese Kombination gewählt.

Vergleicht man nun Bild 4-15 und Bild 4-18, ist gut zu erkennen, dass sowohl der Mittelwert, als auch die Einzelwerte kaum von den Messwerten abweichen. Betrachtet man die Zeitbedarfswerte der einzelnen Fahrstreifen (Bild 4-19), so kann man auch

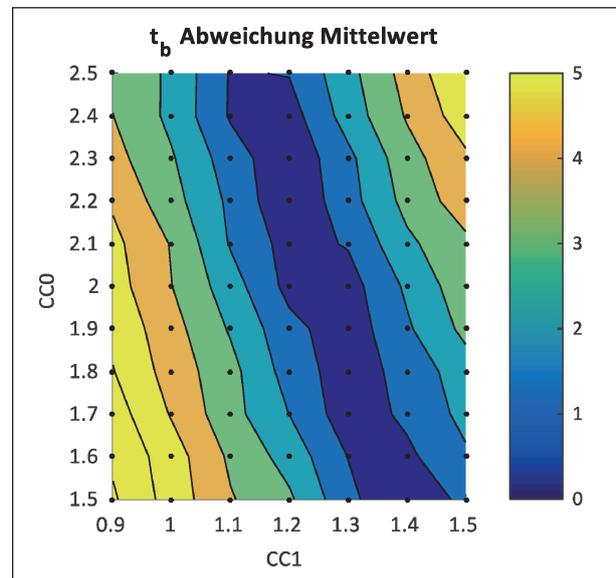


Bild 4-17: Abweichung des mittleren Zeitbedarfs in Abhängigkeit von CC0 und CC1 am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe

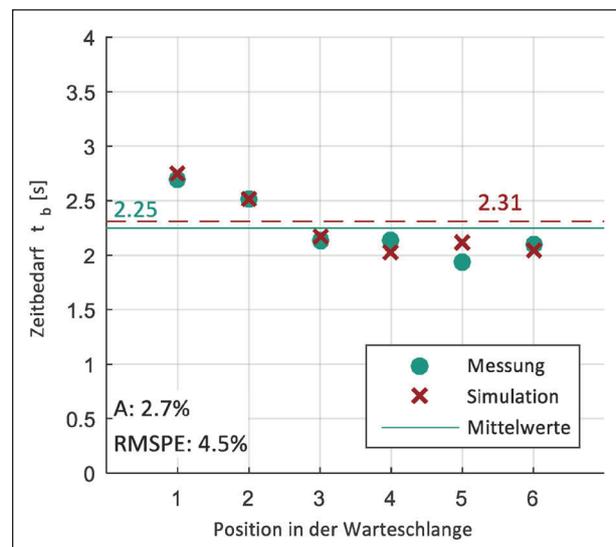


Bild 4-18: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe (kalibriert)

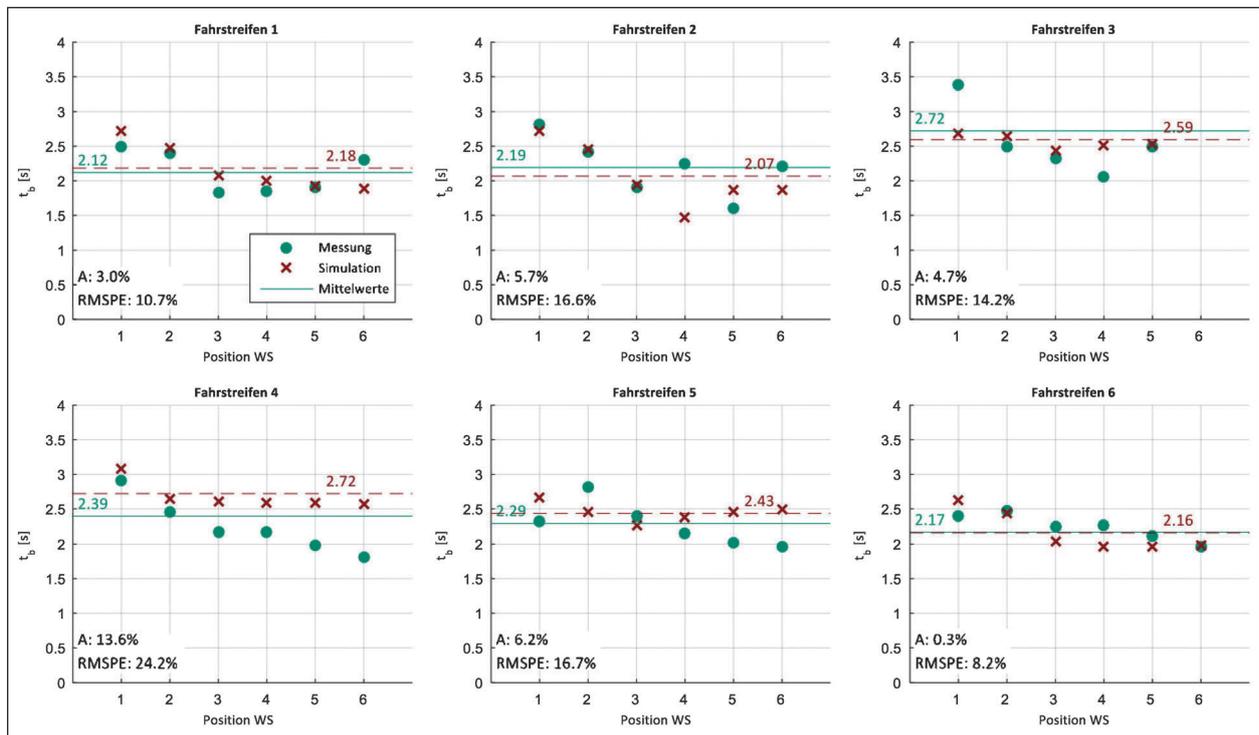


Bild 4-19: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (kalibriert)

von einer prinzipiell guten Abbildung sprechen. Da das Fahrverhalten in VISSIM für die gesamte Einmündung identisch ist, ergeben sich hier größere Abweichungen. Mit einer fahrstreifenfeinen Parametrisierung des Fahrverhaltens könnten hier vermutlich noch bessere Ergebnisse erzielt werden. Allerdings ist es fragwürdig, ob das Fahrverhalten in der Realität tatsächlich bei verschiedenen Fahrstreifen unterschiedlich ist, oder ob die unterschiedlichen Zeitbedarfswerte nicht von äußeren, nicht in der Simulation abbildbaren Faktoren abhängen. Unter Umständen könnte auch eine genauere Abbildung einzelner Fahrstreifen realisiert werden, indem eine erneute Anpassung der Geschwindigkeitsverteilungen für die Langsamfahrbereiche durchgeführt wird. Bild 4-20 verdeutlicht allerdings, dass sich die Anpassung des Fahrverhaltens nur minimal auf die Durchfahrzeiten ausgewirkt hat.

Da es u. a. Ziel ist, die Wartezeiten an Knotenpunkten zu analysieren, sollte diese mit der Simulation korrekt abgebildet werden. Um dies zu überprüfen, wurde analog zur Durchfahrzeit die Wartezeit zwischen Realität und kalibrierter Simulation anhand der Verteilung überprüft. Dieser Vergleich ist in Bild 4-21 für den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße zu sehen. Betrachtet man die ersten drei Fahrstreifen, fällt auf, dass die Zeit, welche die Fahrzeuge in der Warteschlange verbringen, der Realität entsprechend abgebildet werden.

Im Gegensatz dazu wird bei Fahrstreifen 5 die Form der Verteilung nicht richtig abgebildet. Während des Messzeitraums haben mehr Fahrzeuge sehr lange und mehr Fahrzeuge sehr viel weniger Zeit gewartet. Ebenfalls ist die Anzahl der Fahrzeuge, die in der Warteschlange stehen mussten, deutlich geringer als in der Simulation.

Außerdem ist sowohl bei Fahrstreifen 4 wie auch bei Fahrstreifen 6 die mittlere Wartezeit laut der Simulation höher als es in der Realität der Fall war. Nach eingehender Analyse der Messdaten und Rücksprache mit dem für den Knotenpunkt zuständigen Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe konnte festgestellt werden, dass die Fahrstreifen 4, 5 und 6 von einer Koordinierung beeinflusst werden. Sowohl die Rechtsbieger, als auch die aus Nordosten kommenden Geradeausfahrer kommen von den im Zulauf liegenden Lichtsignalanlagen gepulkt während oder zu Beginn der Freigabezeit an. Die Linksabbieger dagegen kommen teilweise zu Beginn der Freigabezeit an (parallel zu den Geradeausfahrern), aber auch kurz nach Beginn der Sperrzeit. Dadurch entstehen viele hohe und viele niedrige Wartezeiten. Da solche Effekte in die weiteren Analysen der Berechnungsverfahren nicht einfließen dürfen, in der Realität aber immer eine Pulkung auftritt, verdeutlicht das die Notwendigkeit für den Einsatz von Simulationsmodellen.

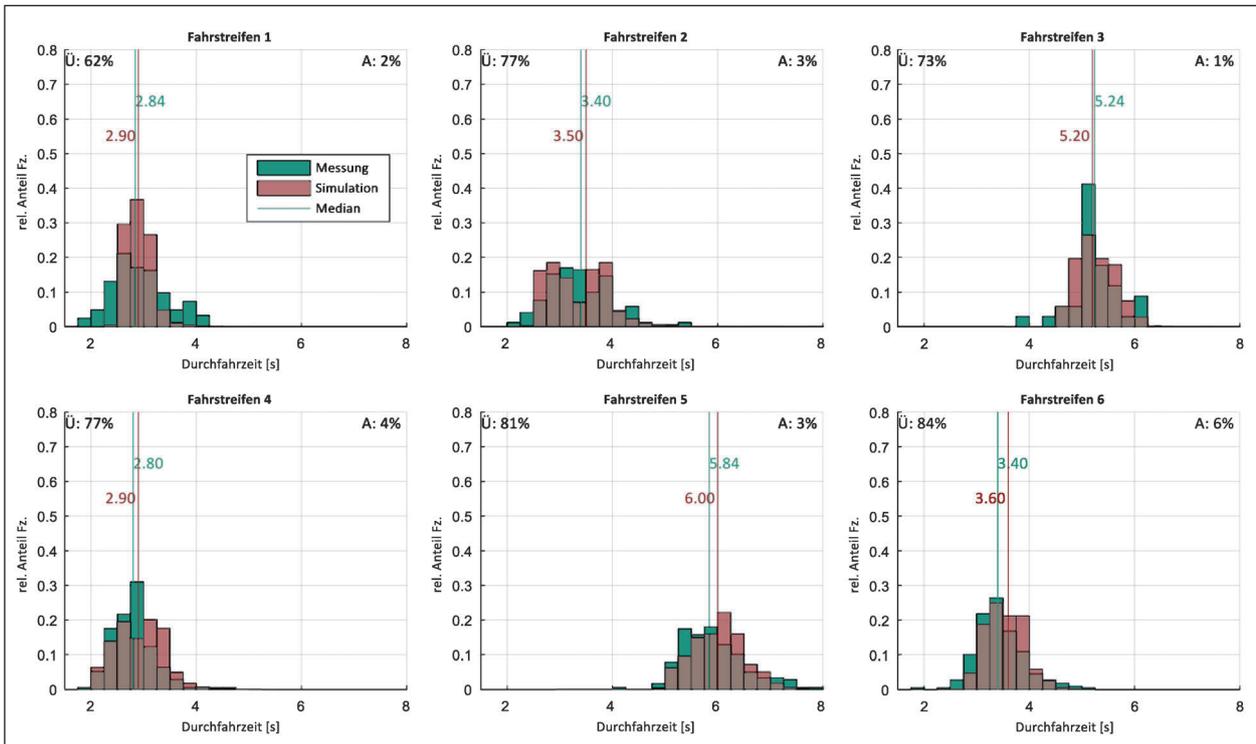


Bild 4-20: Relative Verteilung der Durchfahrzeit durch den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (kalibriert)

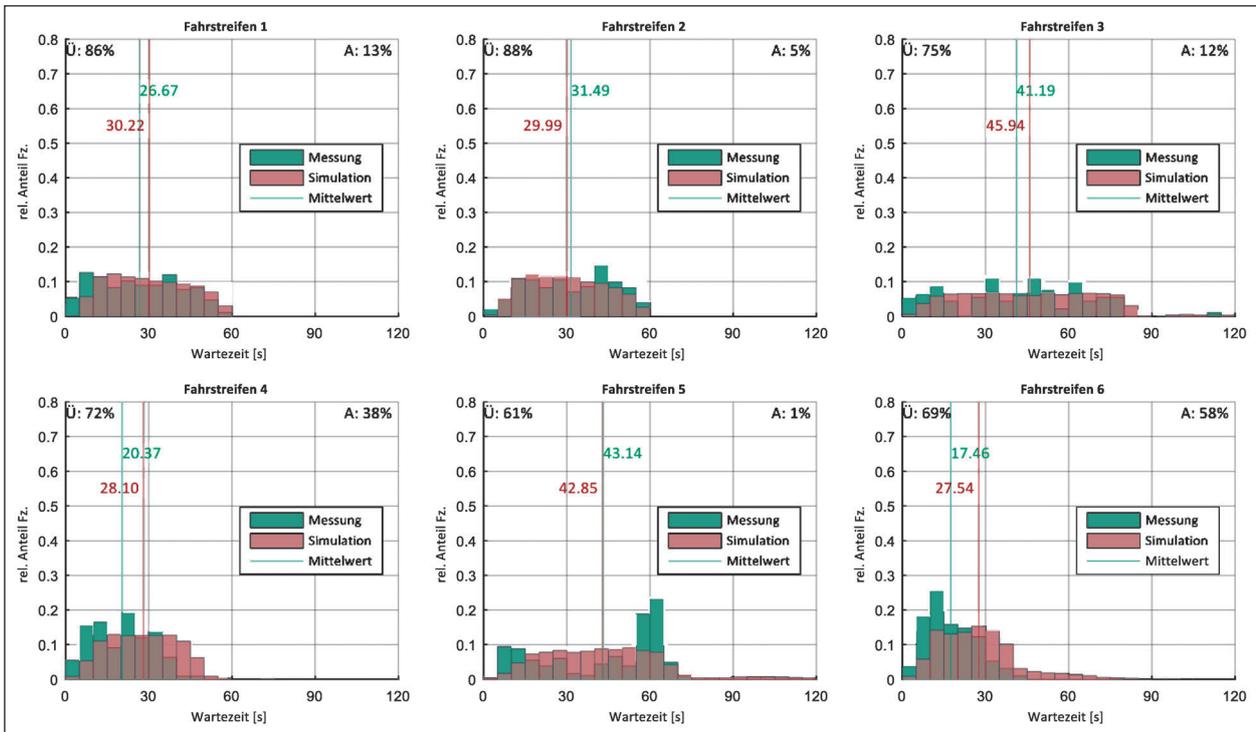


Bild 4-21: Relative Verteilung der Wartezeit (Standzeit in der Warteschlange + Durchfahrzeit) am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (kalibriert)

## 4.3 Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage

### 4.3.1 Aufbau der Modelle

Die Simulationsmodelle der Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage wurden analog zu den Modellen der Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage aufgebaut. Ebenso werden die Zeitstempel weitgehend gleich erfasst. Die Beschreibung der Routen und Zuflüsse aus Kapitel 4.2.1 trifft hier auch zu. Zusätzlich wurde eine weitere Eigenschaft der Fahrzeuge in das Fahrzeugprotokoll übernommen: die bisher zurückgelegte Wegstrecke. Aus dieser wurde die Entfernung von der Haltlinie ermittelt, bei der das Fahrzeug das Warteschlangeneende erreicht. Damit kann einfach ermittelt werden, wie lang die Warteschlange zu dem Zeitpunkt war, an dem ein Fahrzeug angekommen ist.

Grundlegende Unterschiede zwischen den Modellen mit und ohne Lichtsignalanlage bestehen natürlich auch in der Art der Steuerung. Statt den Signalgebern werden bei den Modellen Konfliktflächen definiert, um die vorfahrtrechtliche Situation nachzubilden. Bild 4-22 zeigt als Beispiel den Knotenpunkt Winterbergstraße/Dobritzer-Straße in Dresden. Die Konfliktflächen sind als rot-grüne Flächen erkennbar.

### 4.3.2 Kalibrierung an Messwerten

Ähnlich wie bei den Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage war vorgesehen, die Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage anhand der Messdaten der Realität zu kalibrieren. Als geeignete Kennwerte wurden dabei die Grenz- und Folgezeitlücken identifiziert. Sofern die Fahrzeuge in der Simulation gleichgroße Lücken in den bevorrechtigten Strömen annehmen oder ablehnen, sollte sich die Warteschlange ähnlich stark ausbilden und damit die gleichen Wartezeiten verursachen. Bei dieser Annahme ist es ebenfalls wichtig, das Angebot an Zeitlücken für die Nebenströme, verursacht durch die Abstände der Fahrzeuge im Hauptstrom, korrekt abzubilden. Daher sollte im ersten Schritt die Zeitlückenverteilung der unbehinderten Ströme in VISSIM kalibriert werden, um anschließend die Parametersätze zu definieren, die zu gleichen Grenz- und Folgezeitlücken führen.

Da an den Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage insgesamt nur einige Stunden an Messdaten erhoben wurden, fehlt allerdings die statistisch notwen-



Bild 4-22: Screenshot aus VISSIM zur Veranschaulichung des Modellaufbaus der Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage

dige Stichprobengröße, um aussagekräftige und haltbare Folgezeitlücken zu bestimmen. Dazu sollte im Nebenstrom so viel Nachfrage herrschen, dass diese nicht mehr vollständig abgewickelt werden kann. Durch die dann entstehenden Warteschlangen könnten ausreichend viele genutzte und ungenutzte Zeitlücken von Folgefahrzeugen beobachtet werden. Es müssten also Knotenpunkte erhoben werden, an denen der Nebenstrom annähernd übersättigt ist. Das hätte wiederum zur Folge, dass sehr hohe Wartezeiten entstehen. Der Knotenpunkt wäre vermutlich mit einer Lichtsignalanlage ausgestattet.

Selbst wenn ein solcher Knotenpunkt ausreichend lange erhoben werden könnte, wird immer noch nur ein einzelner Belastungsfall erhoben. Im Gegensatz zu den Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage ist die Belastung am Knotenpunkt allerdings zweidimensional variabel. Jede Belastung eines Nebenstroms lässt sich mit jeder Belastung des ihm übergeordneten Stroms kombinieren. Der Einfluss der Hauptstrombelastung auf die Grenz- und Folgezeitlücken, ebenso wie auf die Wartezeiten, ist empirisch nicht bestimmbar.

Eine weitere Möglichkeit, die Knotenpunkte anhand der Messdaten zu kalibrieren, besteht darin, dafür die zu betrachtende Zielgröße heranzuziehen. In diesem Fall wäre das die Wartezeit. Diese kann aus den Messdaten bestimmt werden und ebenso in der Simulation (vgl. Kapitel 4.2.2). Hier entstehen allerdings zwei Probleme: Zum einen wurde auch hier nur eine zufällige Belastungskombination erhoben; es ist wieder fragwürdig, ob eine Abhängigkeit der Wartezeit von der Belastungskombination besteht, die nicht durch die Simulation erfassbar wäre. Zum anderen fehlen auch Erkenntnisse darüber, welche Faktoren in der Realität die Wartezeit verursacht haben.

Ebenso verhält es sich dann in der Simulation. Die Wartezeit der Fahrzeuge in der Simulation lässt sich durch viele Parameter beeinflussen. Allerdings ist nicht analysierbar, ob ein Parametersatz die realen Einflussfaktoren korrekt abbilden würde. Da zur weiteren Analyse wieder verschiedene Belastungsszenarien simuliert werden sollen, ist nicht sichergestellt, dass diese simulierten Modelle Wartezeiten korrekt abbilden.

Es ist also notwendig, Kenntnis über die Einflussfaktoren und die Wartezeit in jeder Belastungssituation zu erlangen. Dabei sollte für jede Belastungskombination die Grenz- und Folgezeitlücken aller Nebenströme und die Zeitlückenverteilung aller Hauptströme bekannt sein, um die Simulation vollständig kalibrieren zu können. Im Rahmen dieser Untersuchung ist es aber nicht möglich, diesen Umfang an empirischen Messdaten zu erheben. Es ist außerdem fraglich, ob es überhaupt möglich ist, in Deutschland entsprechende Knotenpunkte zu finden, an denen ausreichend viele Belastungskombinationen vorzufinden sind. Daher ist es nur möglich eine valide Simulation zur weiteren Analyse der Wartezeiten aufzubauen, indem theoretische Überlegungen als Kalibrierungsgrößen dienen. Das HBS (2015) gibt theoretische Ansätze vor, die der weiteren Kalibrierung dienen können.

### 4.3.3 Kalibrierung nach HBS-Kenngrößen

Der grundlegende Prozess bei der Kalibrierung eines nicht signalisierten Knotenpunkts ist die Einstellung der Kapazität eines nachgeordneten Stroms bei gegebener Verkehrsstärke und Zeitlückenverteilung im vorfahrtsberechtigten Strom. Dieser Zusammenhang wird im HBS (2015) durch die Grundkapazität  $G$  gegeben. In einem ersten Schritt wurde deshalb versucht, die im HBS (2015) gegebene Kurve der Grundkapazität durch Ergebnisse aus der Simulation nachzubilden. Dafür wurde ein einfaches Laborbeispiel aufgebaut, in dem bei variierten Hauptstrombelastungen jeweils der Abfluss eines übersättigten Nebenstroms gemessen wurde. Die Ergebnisse dieser Kalibrierung werden im folgenden Abschnitt dargestellt. Dabei wurde eine gute Reproduktion der Grundkapazität des HBS (2015) erreicht.

Allerdings ergab eine vertiefte Betrachtung der Annahmen für diesen Prozess, dass die Zeitlückenverteilung, die den Ansätzen des HBS (2015) zugrunde liegt, nicht mit der in der Realität anzutreffenden hinreichend gut übereinstimmt. Im HBS (2015) wird nicht berücksichtigt, dass Zeitlücken auf einem Fahrstreifen eine bestimmte Mindestzeitlücke nicht unterschreiten. Dadurch ändert sich die gesamte Form der Zeitlückenverteilung. Bild 4-23 veranschaulicht diese Tatsache. Für fünf ausgewählte Hauptströme unterschiedlicher Knotenpunkte wurde in Grün die Summenhäufigkeit der aufge-

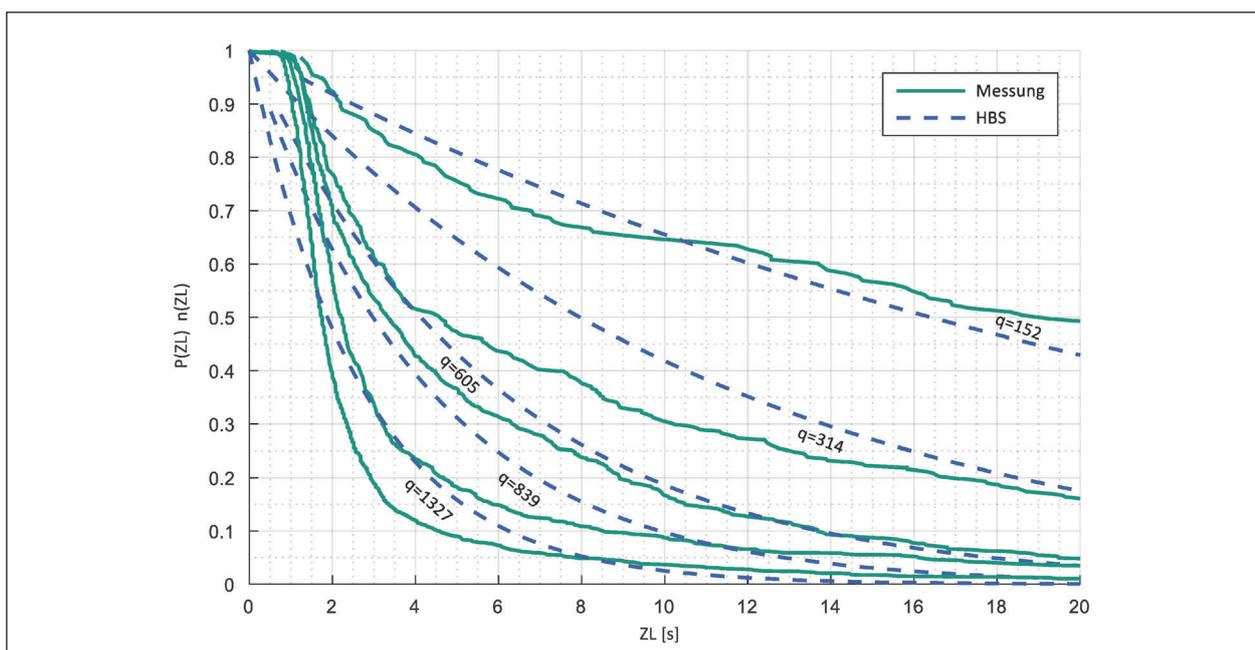


Bild 4-23: Gemessene Zeitlückenverteilungen in fünf Hauptströmen verschiedener Knotenpunkte im Vergleich zur theoretischen Annahme des HBS

tretenen Zeitlücken während der Messung aufgetragen. Die fünf Kurven repräsentieren fünf verschiedene Hauptstrombelastungen (siehe Beschriftungen). Daneben wurde in Blau die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer gewissen Zeitlücke bei eben dieser Hauptstrombelastung nach dem HBS (2015) berechnet.

Die Kalibrierung anhand der Kurve der Grundkapazität des HBS (2015) stellt sicher, dass die Wartezeiten bei hoher Auslastung, die durch das Zusammenspiel von Zufluss- und Abflussrate im Sinn eines Wartesystems entstehen, richtig wiedergegeben werden.

$$P(z) = e^{-\frac{q_p}{3600}z} \quad (\text{Gl. 4-5})$$

mit

$z$  Zeitlücke [s]

$q_p$  Verkehrsstärke [Fz/h]

Die Wartezeiten bei geringer Auslastung dagegen hängen auch von der Form der Zeitlückenverteilung ab, wie das folgende Gedankenexperiment zeigt: Angenommen wird im Hauptstrom eine mittlere Zeitlücke von 4 s und im Nebenstrom eine Auslastung von 50 %. Bei negativ exponentieller Zeitlückenverteilung ergibt sich dann sicher eine andere Wartezeit im Nebenstrom als in dem Fall eines stark gepulsten Hauptstroms, bei dem längere Zeit Fahrzeuge mit Mindestzeitlücke ankommen und dann eine große Zeitlücke auftritt, sodass im Mittel wieder 4 s erreicht werden.

Dies ist im Wesentlichen der Tatsache geschuldet, dass ein erstes Fahrzeug eine Grenzzeitlücke benötigt, um in den Hauptstrom einzufahren. Ein folgendes Fahrzeug benötigt zusätzlich dazu allerdings eine Folgezeitlücke, die deutlich kleiner als die Grenzzeitlücke ist. So könnten in die einzelne große Zeitlücke des gepulsten Hauptstroms deutlich mehr Fahrzeuge einfahren, als in exponentiell verteilte Zeitlücken. Deshalb ist es wichtig, dass die Form der Zeitlückenverteilung im Hauptstrom in der Simulation gut reproduziert wird.

Deshalb wurde in einer zweiten Kalibrierung zunächst die Form der Zeitlückenverteilung in der Simulation an die Ansätze des HBS (2015) angenähert. Da eine Mindestzeitlücke zwischen den Fahrzeugen aber nicht vermieden werden kann, wurde die Zeitlückenverteilung so eingestellt, dass oberhalb von  $t_g - 0,5 \cdot t_f$  (vgl. Berechnung der Grundkapazität nach HBS (2015)) eine möglichst gute Über-

einstimmung erzielt wurde. Für die Akzeptanz von Zeitlücken ist nur dieser Bereich relevant.

Das Vorgehen und die Ergebnisse dieser beiden Kalibrierungsvarianten werden im Folgenden dargestellt.

#### 4.3.4 Kalibrierung anhand der Grundkapazität G

Als möglichst simples Laborbeispiel wurde eine einfache Einmündung an einer einstreifigen Vorfahrtsstraße modelliert. Der Fahrzeugzufluss besteht hierbei aus 100 % Pkw mit der in VISSIM standardmäßig implementierten Wunschgeschwindigkeitsverteilung 50 km/h. Die Vorfahrtregelung ist über die Verwendung der Konfliktfläche abgebildet.

Die Steuerung der einzelnen Simulationsläufe inklusive der Definition der Fahrzeugzuflüsse und des Zugriffs auf die verschiedenen Auswertungsergebnisse in VISSIM sowie ihrer ersten Weiterverarbeitung, erfolgte auch hier über entsprechende in Python implementierte Skripte.

Um eine mit der Grundkapazitätskurve vergleichbare Kurve zu generieren, wurde der Zufluss des Nebenstroms auf einen oberhalb der zu erwartenden Kapazität bei freier Fahrt liegenden Wert von 1.400 Kfz/h fixiert, d. h. es existiert quasi keine Belastung im übergeordneten Hauptstrom (es wurden hier 10 Kfz/h angesetzt). Die Belastung des Hauptstroms wurde dann in einzelnen Simulationsläufen über die Dauer einer Stunde (inklusive 5 Minuten Vorlauf und 10 Minuten Nachlauf) von 10 Kfz/h über 100 Kfz/h in Schritten von 10 Kfz/h bis zu einer Höhe von 1.800 Kfz/h immer weiter erhöht. Die Erfassung der Anzahl der durch- bzw. eingefahrenen Fahrzeuge erfolgte über die Auswertung von Reise- bzw. Verlustzeitmessungen.

Die Kurven der Grundkapazität zeichnen sich jeweils, rein optisch betrachtet, vereinfacht durch drei Eigenschaften aus – den Schnittpunkt mit der x-Achse, also die (theoretische) Sättigungsverkehrsstärke im Hauptstrom, die Sättigungsverkehrsstärke des Nebenstroms ohne Belastung im Hauptstrom als Schnittpunkt mit der y-Achse und die Krümmung der dazwischen verlaufenden Kurve. Für die Einstellung dieser Kennwerte mussten in VISSIM die entsprechenden Stellgrößen identifiziert und verändert werden. Dieser Prozess wird im Folgenden, unterstützt durch die Abbildung der Ergebnisse in Diagrammen, gemeinsam mit der

Grundkapazitätskurve des Rechtseinbiegers einer Einmündung (siehe Gleichung 4-6), erläutert.

Tabelle 4-4 zeigt die Abweichungen der Kurven zueinander in Form des RMSPE (root mean square percentage error, vgl. Gleichung 4-3). Hierbei sind drei verschiedene Werte angegeben: einmal der RMSPE für die vollständige Kurve, einmal bis zu einem Wert von 1.600 Kfz/h für den Hauptstrom und schließlich bis zu einem Wert von 1.200 Kfz/h. Der Grund hierfür liegt in der Form des im HBS (2015) angegebenen Diagramms für die Grundkapazität, das die Kurven nicht vollständig, sondern nur bis zu einer Höhe von 1.600 Kfz/h im Hauptstrom zeigt. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die rein mathematische Formulierung dazu führt, dass der Verlauf der Kurve im Bereich höherer Hauptstrombelastungen (ab etwa 1.200 Kfz/h) stärker von den in der Realität vorkommenden Gegebenheiten abweichen dürfte als die Bereiche niedrigerer Hauptstrombelastungen, deren Vorkommen außerdem eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit aufweisen sollte.

$$G_{PE} = \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-\frac{q_P}{3600}(t_g - \frac{t_f}{2})} \quad (Gl. 4-6)$$

mit

- $G_{PE}$  Grundkapazität Nebenstrom [Pkw-E/h]
- $q_P$  Verkehrsstärke maßg. Hauptströme [Fz/h]
- $t_g$  5,9 s (Grenzzeitlücke)
- $t_f$  3,0 s (Folgezeitlücke)

Verwendet man die VISSIM-Grundeinstellungen und wählt lediglich das Wiedemann-99-Modell für das Fahrverhalten innerorts aus (Einstellung A), ergibt sich aus den Messwerten eine Kurve, die mit der Grundkapazität wenig gemein hat und deren RMSPE 143 % beträgt.

Eine Variation des Parameters CC1 für den zeitlichen Abstand zwischen Fahrzeugen erfolgte in mehreren Schritten, um eine Streckenkapazität von rund 1.800 Kfz/h einzustellen bzw. den interpolierten Punkt der Kurve im Diagramm bei einem  $q_P$  von 1.800 Kfz/h zu treffen. Bild 4-24 zeigt die sich daraus ergebende Kurve bei einem als ideal ermittelten CC1 von 1,2 s (RMSPE: 85 %) und zum Vergleich das Ergebnis mit einem Wert von 1,3 s.

Mit der Einstellung eines passenden CC1 konnten die Kurven im Bereich starker Hauptstrombelastung aneinander angenähert werden (siehe Bild 4-25).

Der nächste Schritt war die Identifikation der Stellgrößen zur Veränderung der Kapazität des Nebenstroms, also der Folgezeitlücke. Da die Vorfahrtregelung über eine Konfliktfläche modelliert wurde, wurde der Einfluss dieser Parameter untersucht. Dabei ergab sich die Einstellung der Sichtbarkeit für die Strecke des einbiegenden Stroms, als maßgeblich für die Anzahl der Fahrzeuge aus dem Nebenstrom, die ohne Belastung des Hauptstroms maximal einfahren können. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei einer geringen Sichtbarkeit der Vor-

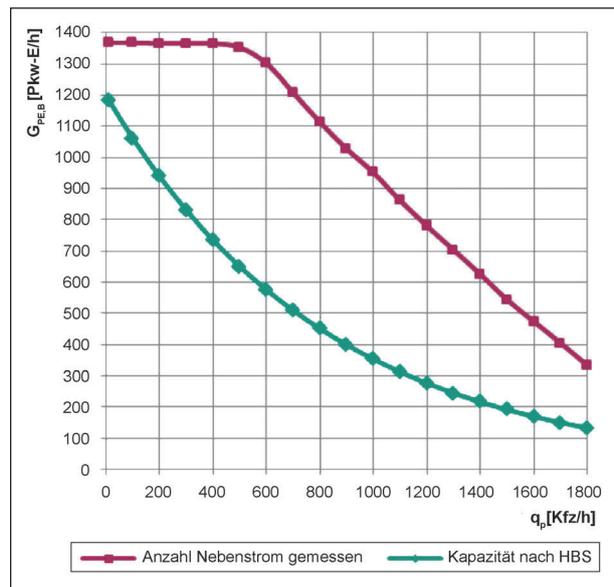


Bild 4-24: Einstellung A: VISSIM-Ergebnisse ohne Kalibrierung im Vergleich zur nach HBS (2015) berechneten Grundkapazität für den rechts einbiegenden Strom 6 an einer Einmündung innerorts

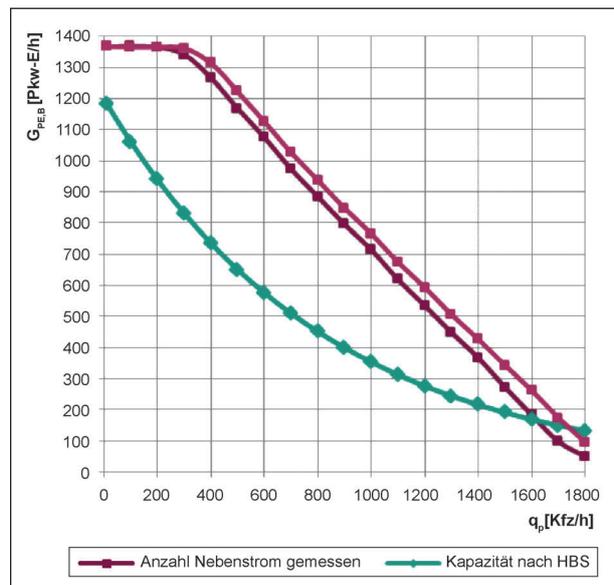


Bild 4-25: Einstellung B: Zeitlicher Abstand CC1 des W99-Fahrverhaltens auf 1,2 s gesetzt (zum Vergleich: 1,3 s dunklere Kurve)

fahrtstraße die Fahrzeuge im Nebenstrom einen Halt antizipieren, da sie erst kurz vor oder direkt an der Einmündung bzw. Kreuzung erkennen können, ob sich auf der übergeordneten Strecke Fahrzeuge nähern, und daher rechtzeitig abbremsten. Damit verringert sich die Kapazität der aus dem Nebenstrom in den Hauptstrom einfahrenden Fahrzeuge umso stärker, je kleiner der Wert für die Sichtbarkeit der Vorfahrtstraße eingestellt ist.

In Bild 4-26 sind die angepassten „Enden“ der Kurve gut zu erkennen. Dabei verringerte sich der RMSPE auf 48 %

Die Anpassung der noch fehlenden Krümmung der Kurve, gleichbedeutend mit der Größe der Grenzzeitlücke, war weniger eindeutig zu identifizieren. Eine Einstellung der Grenzzeitlücke ist in VISSIM nicht explizit vorgesehen, jedoch haben hierauf die konfliktflächenspezifischen Parameter „Lücke vorn“ und „Lücke hinten“ bzw. „Faktor Sicherheitsabstand“ einen Einfluss. Die „Lücke vorn“ wirkt sich darauf aus, wie schnell ein Fahrzeug nach einem Fahrzeug des bevorrechtigten Stroms die Konfliktfläche befährt. Der Standardwert liegt hier bei 0,5 s und bewirkt ein plausibles, zügiges Einfahren. Die „Lücke hinten“ im Fall eines kreuzenden Stromes bzw. der „Faktor Sicherheitsabstand“ beeinflussen, wie gering die „Restlücke“ nach dem Einfahren bzw. Überfahren eines Fahrzeugs aus dem Nebenstrom zum nach ihm folgenden Fahrzeug im Hauptstrom noch sein darf, damit das Nebenstromfahrzeug bereit ist, eine vorhandene Lücke zu akzeptieren.

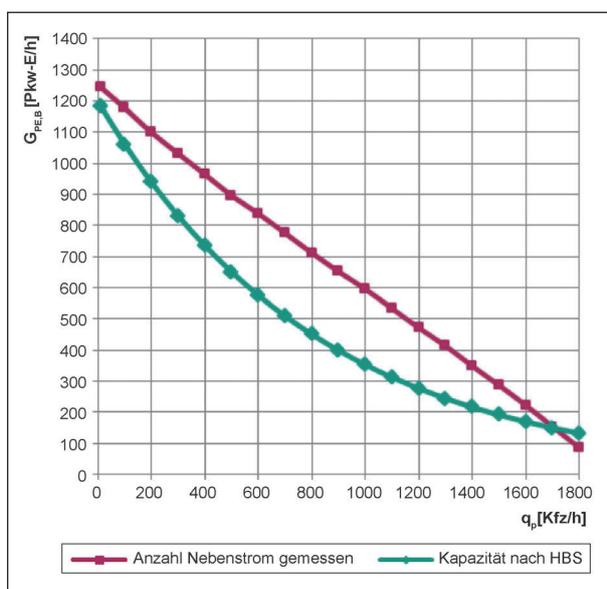


Bild 4-26: Einstellung C: zusätzlich den Parameter „Sichtbarkeit der Strecke“ für die Vorfahrtstraße auf 6 m angepasst

Es zeigte sich im konkreten Fall des hier modellierten Rechtseinbiegerstroms ein direkter Zusammenhang, indem sich der Wert der Grenzzeitlücke von 5,9 s, geteilt durch den Parameter für den zeitlichen Abstand der Fahrzeuge, CC1, von 1,2 s mit 4,9 als ideale Einstellung des „Faktors Sicherheitsabstand“ der Konfliktfläche herausstellte. Im Zuge dieser Einstellung wurden außerdem die Vorlaufstrecken des Haupt- und Nebenstroms besser aufeinander abgestimmt, was sich ebenfalls positiv auf den (Krümmungs-)Verlauf der Kurve auswirkte. Das Diagramm in Bild 4-27 zeigt beide Ergebnisse, wobei die dunklere Kurve den Fall ohne Anpassung des Vorlaufs darstellt. Die Abweichungen betragen für die Gesamtkurve nun 25 % bzw. 30 % und im Bereich bis zu 1.200 Kfz/h im Hauptstrom sogar nur noch 7 % bzw. 5 %.

Der letzte Schritt der Kalibrierung zielte auf die Zeitlückenverteilung im Hauptstrom ab, die noch zu wenig größere Lücken aufzuweisen schien. Um deren Anzahl etwas zu vergrößern, wurde die Bandbreite der Wunschgeschwindigkeitsverteilung geringfügig nach unten vergrößert, um eine kleine Anzahl langsamere Fahrzeuge zu modellieren. Die Wunschgeschwindigkeitsverteilung „50 km/h“ wurde demnach von 48 km/h bis 58 km/h auf 45 km/h bis 58 km/h geändert.

Diese Anpassung erzielte genau den gewünschten Effekt und verringerte die Abweichung der Kurven zueinander auf einen RMSPE von nur noch 3 % im

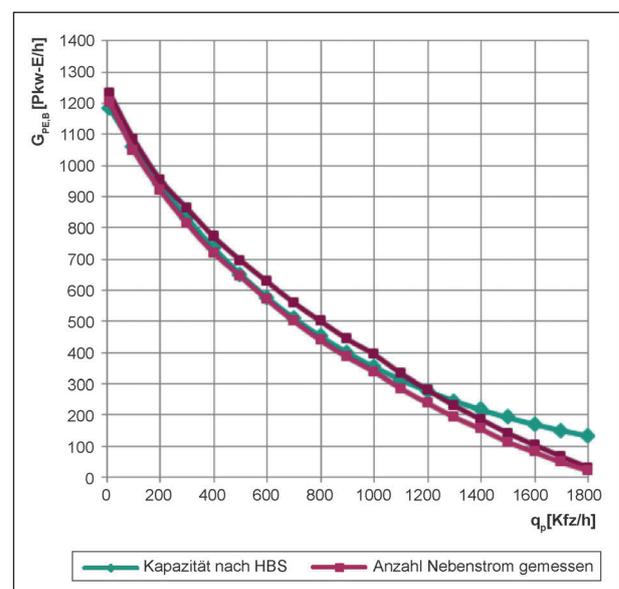


Bild 4-27: Einstellung D: nächste Anpassung: Faktor Sicherheitsabstand der Konfliktfläche und Abstimmung der Vorlaufstrecken

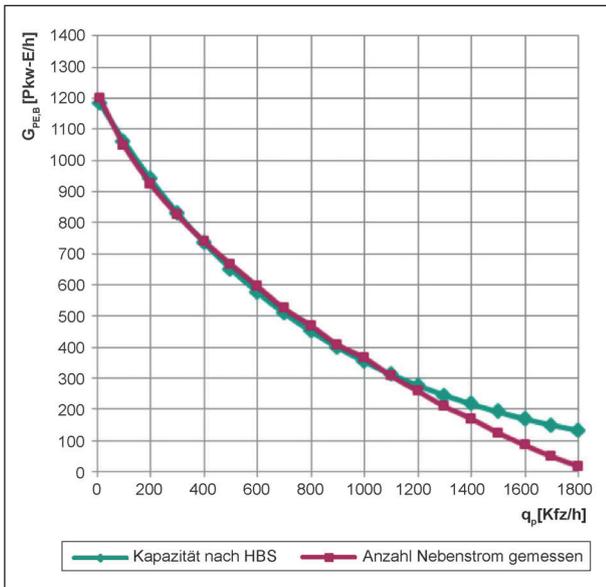


Bild 4-28: Einstellung E: letzter Anpassungsschritt – leichte Erhöhung der Bandbreite der Wunschgeschwindigkeitsverteilung von 48 km/h bis 58 km/h auf 45 km/h bis 58 km/h

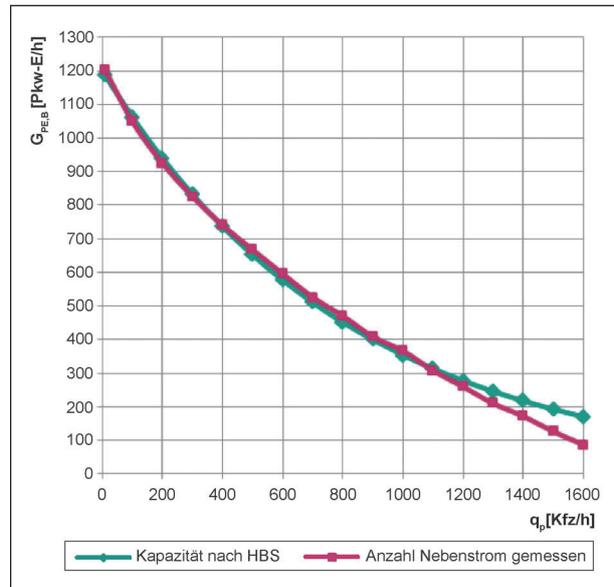


Bild 4-29: Ergebnis der Kalibrierung in der dem HBS (2015) entsprechenden Darstellung bis zu einer Hauptstrombelastung von 1.600 Kfz/h

als relevant betrachteten Hauptstrombelastungsbereich bis 1.200 Kfz/h.

Bild 4-28 und Bild 4-29 zeigen das Ergebnis der Kalibrierung, einmal in derselben Skalierung wie die Dokumentation der vorangegangenen Schritte und einmal mit den Achsenbegrenzungen, wie sie der Abbildung im HBS (2015) entsprechen. Tabelle 4-4 zeigt, wie bereits erwähnt, die mittleren Abweichungen der gezeigten Kalibrierungsschritte im Überblick.

Wie bereits erläutert, sollte zur korrekten Abbildung der Wartezeiten nicht nur die Kapazität des Nebenstroms eingestellt werden. Das Angebot an Zeitlücken des Hauptstroms an den Nebenstrom dürfte die Wartezeiten im Nebenstrom beeinflussen. Bild 4-30 zeigt die relative Häufigkeit an Zeitlücken im bisher beschriebenen Netz (Rot) im Vergleich mit den laut HBS (2015) theoretisch vorhandenen Zeitlücken (Blau).

Bei einem Folgeabstand von  $CC1 = 1,3 \text{ s}$  ergibt sich eine Zeitlückenverteilung im Hauptstrom, die den, durch Messungen bestimmten, Verhältnissen in der Realität nahekommt. Das HBS (2015) geht jedoch, auf Basis der den Berechnungen für vorfahrtsregelte Knotenpunkte zugrunde liegenden theoretischen Rahmenbedingungen, von einer klassischen negativen Exponentialverteilung der Form  $p(z) = e^{-\frac{q_p}{3600}z}$  aus. Die Funktion beinhaltet in ihrer reinen Form allerdings keine Mindestzeitlücke, die

Einstellung	RMSPE		
	gesamt	bei Hauptstrombelastung bis	
		1.600 Kfz/h	1.200 Kfz/h
A: $CC1 = 0,9 \text{ s}$	143 %	141 %	124 %
B: $CC1 = 1,2 \text{ s}$	85 %	89 %	90 %
C: wie B und KF: Sichtbarkeit 6 m	48 %	50 %	48 %
D: wie C und KF: Faktor Sicherheitsabstand	25 %	14 %	7 %
E: wie D und Vorlauf angepasst	30 %	19 %	5 %
F: wie E und Wunschgeschw.-Verteilung	29 %	16 %	3 %

Tab. 4-4: Abweichungen der Grundkapazitätskurven im Kalibrierungsprozess von der nach HBS (2015) berechneten Kurve der Grundkapazität für einen rechtseibiegenden Nebenstrom an einer Einmündung innerorts

Fahrzeuge in der Realität jedoch immer einhalten, sodass, wie in Bild 4-30 gut zu erkennen, die Kurven der Zeitlückenverteilung auf Basis der Simulationsergebnisse, im Bereich kleinerer bis mittlerer Zeitlücken sehr deutlich unterhalb der zugehörigen negativen Exponentialverteilung liegen. Insbesondere unterscheiden sich die Kurven im relevanten Teil von  $t_g - 0,5 \cdot t_f$ .

Eine Verringerung des Folgeabstands  $CC1$  wirkt sich positiv auf die Lage der Kurven zueinander aus. Wie in Bild 4-31 dargestellt, verkleinert sich da-

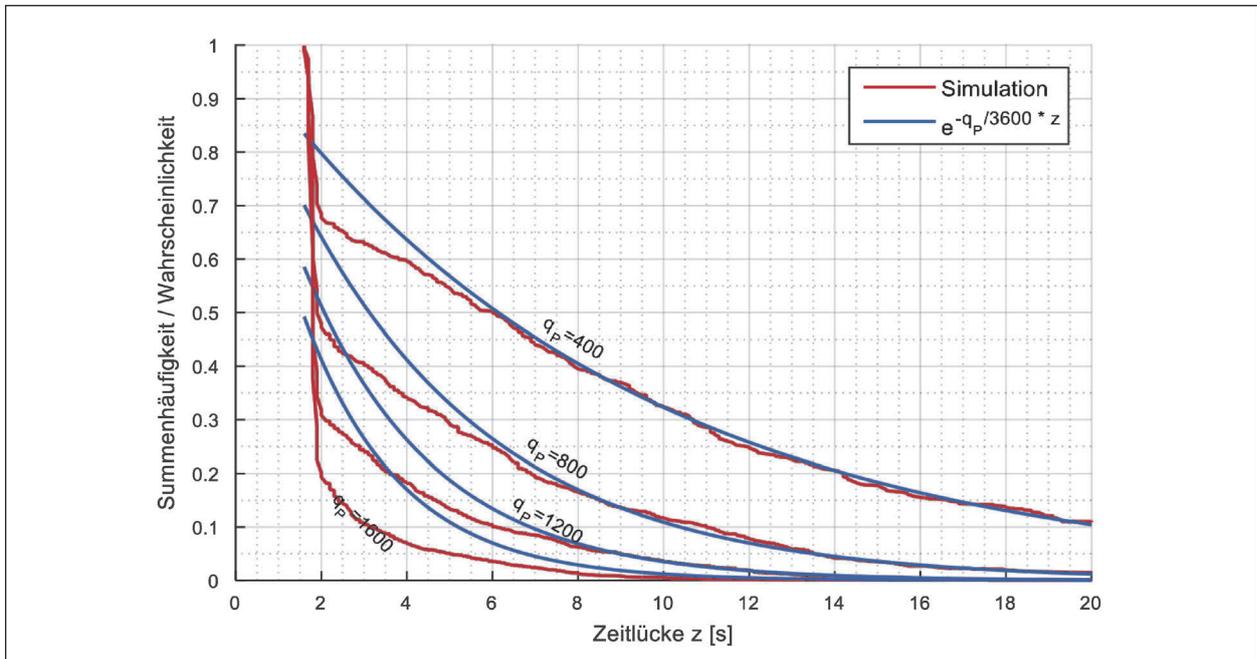


Bild 4-30: :Zeitlückenverteilung bei verschiedenen Verkehrsstärken in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (CC1 = 1,3 s)

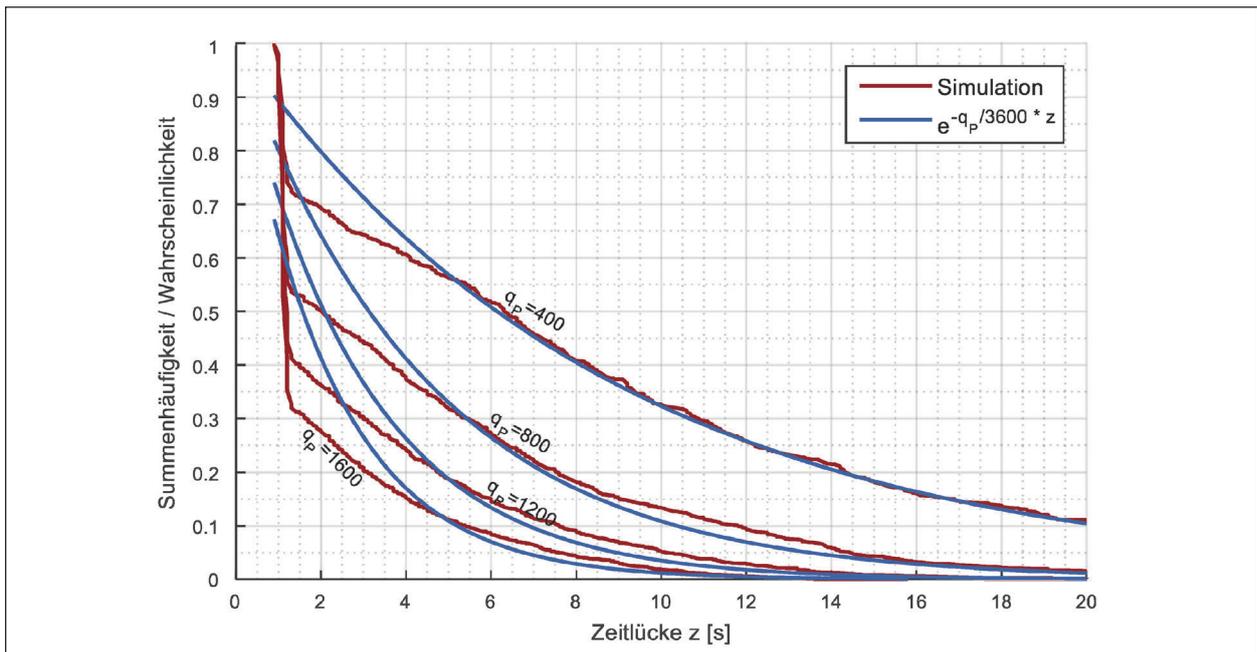


Bild 4-31: :Zeitlückenverteilung bei verschiedenen Verkehrsstärken in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (CC1 = 0,6 s)

bei der Abstand im Bereich kleinerer bis mittlerer Zeitlücken sichtbar und auch die Mindestzeitlücke wird kürzer. In Bild 4-31 ist außerdem in der untersten Kurve aus Simulationswerten ein Knick zu erkennen, der auf eine starke Pulkung der Fahrzeuge durch unterschiedliche Wunschgeschwindigkeiten schließen lässt. Deshalb wurde die in VISSIM voreingestellte Standardwunschgeschwindigkeit für das Profil „50 km/h“ mit einer Bandbreite von

48 km/h bis 58 km/h auf eine „Verteilung“ von 50 km/h bis 50,01 km/h geändert, um durch eine Harmonisierung auf eine quasi einheitliche Geschwindigkeit die Bildung von Fahrzeugpuls zu vermeiden (siehe Bild 4-32).

Die im Vergleich (zu) große Mindestzeitlücke zwischen den Fahrzeugen wird davon allerdings nicht beeinflusst, sondern muss zusätzlich berücksichtigt

werden. Da die Fahrzeuge in VISSIM bereits mit einem Mindestabstand in das Simulationsnetz eingesetzt werden und sich dieser durch die nun homogenisierten Geschwindigkeiten nicht von selbst verringert, ist hierfür eine Veränderung einzelner Werte nicht ausreichend. Deswegen ist eine zweite kurze Strecke mit einem zweiten Fahrzeugzufluss am Anfang der ersten Strecke mit dem Zufluss für den entsprechenden Strom zu modellieren, sodass dort

sehr kurze Zeitlücken zwischen Fahrzeugen entstehen, die im Verlauf nur noch vom Folgeabstand beeinflusst werden. Diese Lösung führt zu den Ergebnissen in Bild 4-33, in dem sich die Kurven aus den Simulationsergebnissen auch im Bereich kleinerer Zeitlücken deutlich besser an die reine negative Exponentialverteilung annähern. Verwendet man die hinsichtlich der bestpassenden Zeitlückenverteilung ermittelten Einstellungen für die Wunschge-

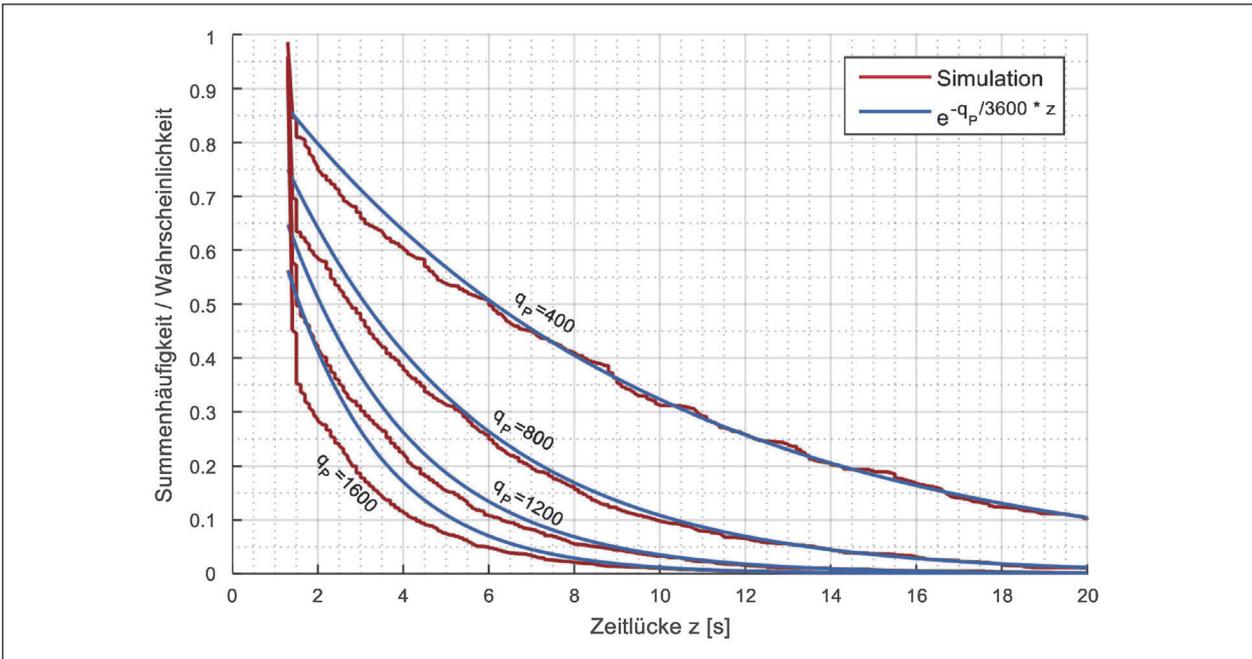


Bild 4-32: :Zeitlückenverteilung bei verschiedenen Verkehrsstärken in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (CC1 = 0,6 s, ohne Verteilung der Geschwindigkeit)

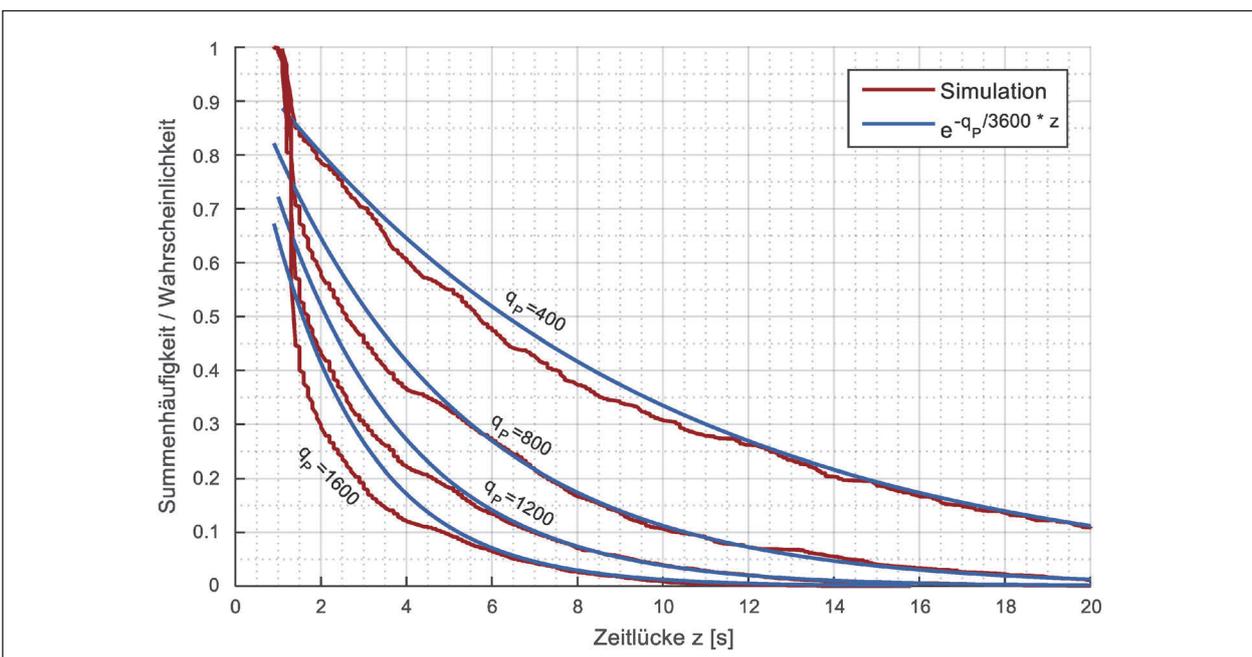


Bild 4-33: :Zeitlückenverteilung bei verschiedenen Verkehrsstärken in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (CC1 = 0,6 s, ohne Verteilung der Geschwindigkeit, zwei sich ergänzende Zuflüsse)

schwindigkeitsverteilung und den Fahrzeugfolgeabstand in dem in VISSIM als default hinterlegten Simulationssetup zur Bestimmung der sich aus der Simulation ergebenden Grundkapazitätskurve, so zeigen sich die in Bild 4-34 dargestellten Kurven für den rechtseinbiegenden sowie den linksabbiegenden Strom einer Einmündung. Zur Anpassung der Grundkapazität der Ströme wurde gleichermaßen vorgegangen wie im vorherigen Abschnitt beschrieben. Aufgrund des geringeren Folgeabstandes CC1 und der veränderten Geschwindigkeitsverteilung muss ein neuer Wert für die Sichtbarkeit des Nebenstroms ermittelt werden.

Wie sich eine Veränderung dieses Wertes im Zusammenhang mit verschiedenen Folgeabständen CC1 auswirkt, zeigt das Diagramm in Bild 4-35. Dabei ist zu erkennen, dass im Falle eines Folgeabstands CC1 = 0,6 s ein Wert von 3,6 zu der gewünschten Nebenstromkapazität von 1.200 Kfz/h führt. Die sich mit diesen Einstellungen ergebenden Grundkapazitätskurven finden sich in Bild 4-36. Die Schnittpunkte der Kurven mit der y-Achse stimmen dabei gut überein, auch nähern sich die Kurven im Bereich hoher Hauptstrombelastungen gut aneinander an, jedoch ist die Krümmung der Kurven aus der Simulation hier noch deutlich zu gering im Vergleich zu den Kurven aus dem HBS (2015).

Die Krümmung wird, wie weiter oben bereits beschrieben, durch den „Faktor Sicherheitsabstand“ der Konfliktfläche im Falle eines einbiegenden Stromes als Repräsentation der Grenzzeitlücke, beeinflusst. Im Falle eines kreuzenden Stromes erfolgt die Einstellung analog über den Parameter „Lücke

hinten“. Die Berechnung dieser Werte lautet hierbei vereinfacht

$$\text{Lücke}_{\text{hinten}} = t_g - \frac{t_f}{2} - t_{\text{queren}} \quad (\text{Gl. 4-7})$$

$$\text{Faktor}_{\text{SA}} = \frac{t_g - \frac{t_f}{2} - t_{\text{queren}}}{\text{CC1}} \quad (\text{Gl. 4-8})$$

mit

$t_g$  Grenzzeitlücke [s]

$t_f$  Folgezeitlücke [s]

$t_{\text{queren}}$  Zeit zum Überqueren der Konfliktfläche [s]

CC1 Folgeabstand [s]

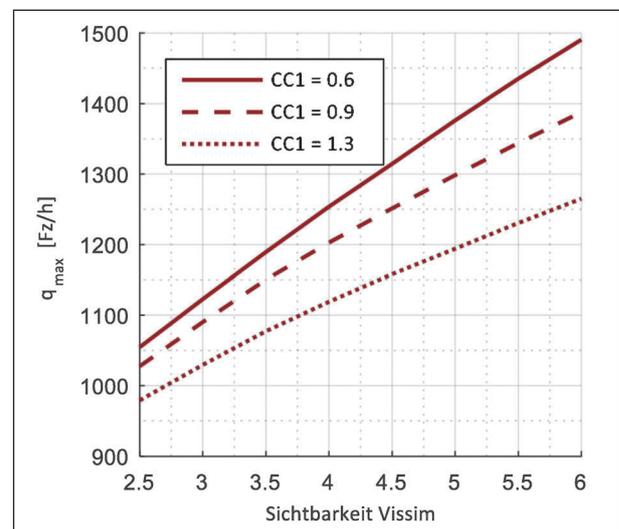


Bild 4-35: Abhängigkeit der maximalen Kapazität eines Nebenstroms von der Einstellung „Sichtbarkeit der Strecke“ in VISSIM

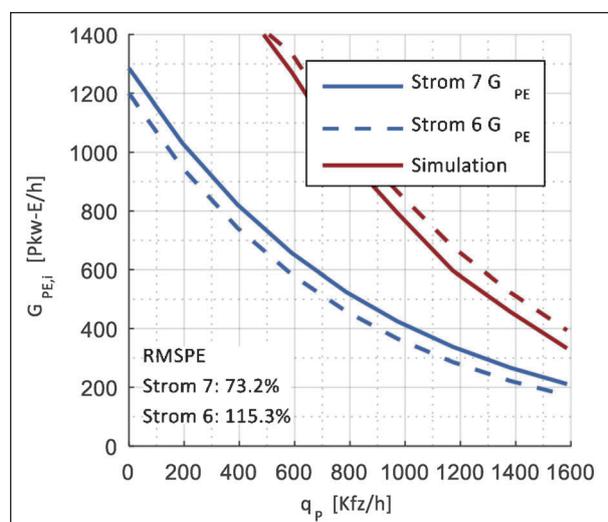


Bild 4-34: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Konfliktfläche mit Standardparametern; Strom 6 und 7 zu Strom 2)

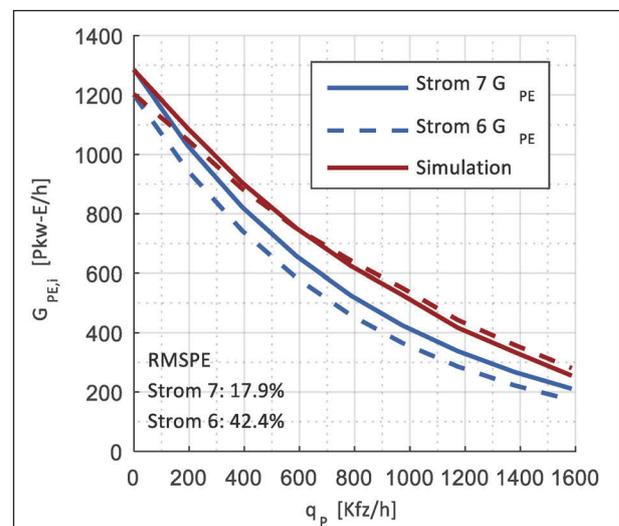


Bild 4-36: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Einstellung der „Sichtbarkeit“ der Konfliktfläche)

Der Wert  $t_{queren}$  steht hierbei für die Zeit, die ein Fahrzeug zum Überfahren der Konfliktfläche benötigt. Diese Zeit wurde experimentell ermittelt. Den Verlauf der Entwicklung der Ergebnisse in Abhängigkeit verschiedener Werte für diesen Parameter zeigen die Diagramme in Bild 4-37 bis Bild 4-40. Dabei wurde weiter davon ausgegangen, dass ein Wert von 0,5 s für den Parameter „Lücke vorne“ zu einem passenden, schnellen Einfahren in die Zeitlücke führt. Bild 4-40 zeigt das Ergebnis für den so ermittelten optimalen Wert für  $t_{queren}$ . Da in VISSIM beim Einfahren und beim Kreuzen eines übergeordneten Stroms nur in einem Fall die Fahrzeuglänge berücksichtigt wird, ergeben sich Unterschiede in der Zeit zum Überfahren der Konfliktfläche. Für den Fall des Einfahrens ergibt sich ein Faktor für den Sicherheitsabstand mit

$\frac{(t_g - 0,5 \cdot t_f - 2,5 s)}{CC1}$  und für den Fall des Überfahrens der Konfliktfläche ein Wert für „Lücke hinten“ aus  $t_g - 0,5 \cdot t_f - 2,9 s$ . Bild 4-41 bis Bild 4-44 zeigen darüber hinaus die Grundkapazitäten der einzelnen Nebenströme der Einmündung mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Hauptstrombelastung, um die Ergebnisse zu validieren. Dabei wurden jeweils die für den Nebenstrom vorgesehenen Grenz- und Folgezeitlücken gemäß HBS (2015) verwendet. Nach diesen Schritten kann festgestellt werden, dass nun ein gut kalibriertes Simulationsmodell vorliegt, das sowohl die Zeitlückenverteilung im Hauptstrom als auch die Kapazität der Nebenströme dem HBS (2015) entsprechend abbilden kann.

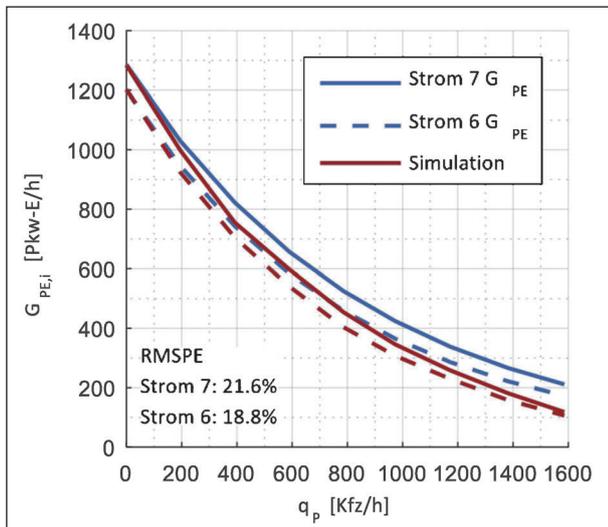


Bild 4-37: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (mit  $t_{queren} = 2,0 s$ )

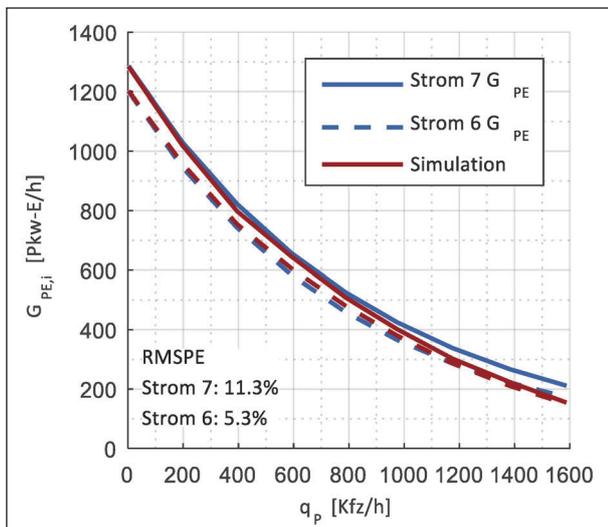


Bild 4-38: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (mit  $t_{queren} = 2,5 s$ )

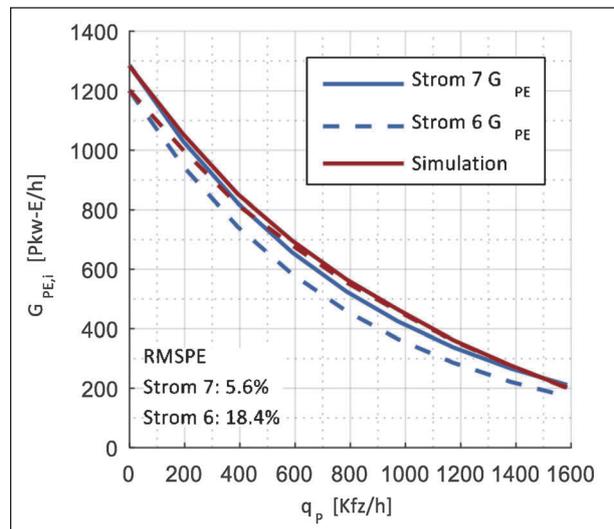


Bild 4-39: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (mit  $t_{queren} = 3,0 s$ )

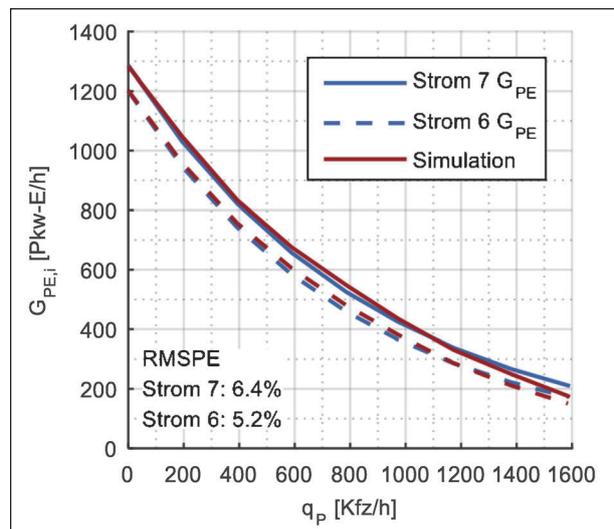


Bild 4-40: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (mit dem als optimal ermitteltem Wert für  $t_{queren} = 2,5 s$  bzw.  $2,9 s$ )

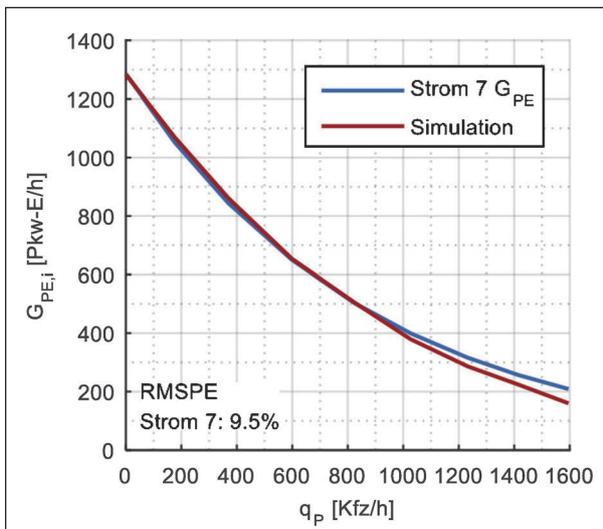


Bild 4-41: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Str. 7 zu 3)

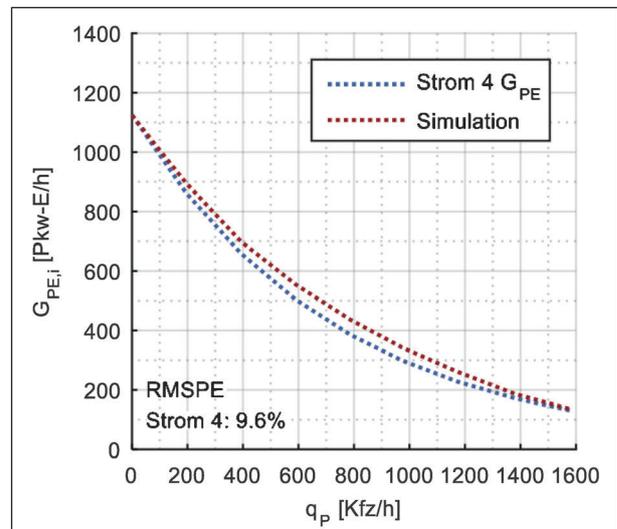


Bild 4-43: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Strom 4 zu Strom 2 und 8)

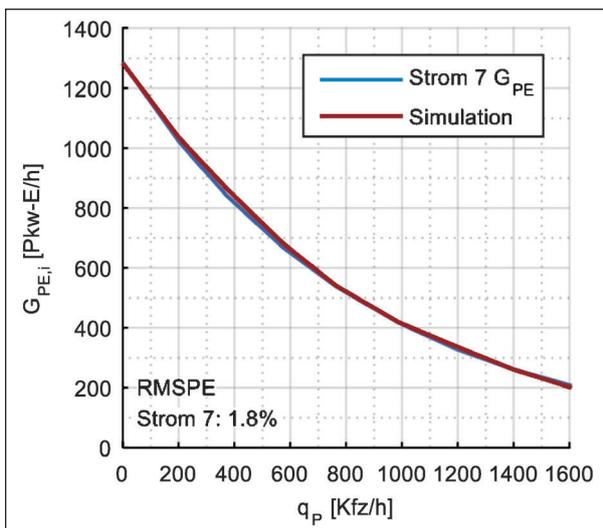


Bild 4-42: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Str. 7 zu 2 und 3)

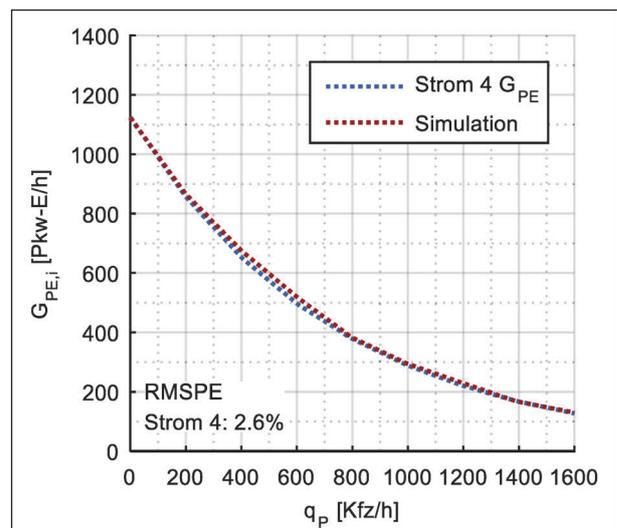


Bild 4-44: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Strom 4 zu Strom 2 und 8)

## 5 Analyse der Zeitverluste an Knotenpunkten

### 5.1 Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage

Da für die Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage vier kalibrierte Simulationsmodelle vorliegen, welche die empirisch betrachteten Knotenpunkte im Hinblick auf die Zeitbedarfswerte und die Durchfahrzeiten gut abbilden, soll anhand dieser Simulationsmodelle eine systematische Untersuchung des Verfahrens zur Bewertung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage durchgeführt werden. Dabei spielt insbesondere die Betrachtung der Wartezeit als Bewertungsgröße im Verfahren eine

Rolle, welche aus den Daten der Simulation und nach dem Verfahren des HBS (2015) ermittelt wird.

#### 5.1.1 Definition der Lastfälle

In das Verfahren zur Bewertung von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage gehen im Wesentlichen drei Größen in die Berechnung ein. Erstens die geometrischen Merkmale des Fahrstreifens, aus welchen sich die Sättigungsverkehrsstärke ergibt, zweitens das Signalprogramm, anhand dessen die Kapazität eines Fahrstreifens bestimmt wird und drittens die Verkehrsstärke der einzelnen Ströme und daraus der Fahrstreifen. Dabei spielt die Verkehrszusammensetzung noch eine Rolle bei der Bestimmung

der Sättigungsverkehrsstärken. Zur weiteren Analyse wurde dabei eine Fahrzeugzusammensetzung gewählt, die ausschließlich aus Pkw besteht. Sowohl die Fahrstreifengeometrie als auch die Signalprogramme spielen bei der Betrachtung der Verlustzeiten keine Rolle, da diese in der Simulation nicht variiert werden können. Da die Knotenpunkte nach realen Vorbildern aufgebaut und kalibriert wurden, würde eine Veränderung eine erneute Kalibrierung der Knotenpunkte notwendig machen. Um allerdings eine umfassende Analyse der Wartezeiten zu ermöglichen und auch die gesamte Verlustzeit zu ermitteln, müssen Simulationen mit unterschiedlichen Belastungen der einzelnen Fahrstreifen durchgeführt werden. Fahrstreifen mit bedingt verträglich geführten Abbiegeströmen wurden dabei nicht gesondert behandelt.

Daher wurde jedes Simulationsmodell so belastet, dass von sehr wenig Verkehr bis hin zu einer vollständigen Übersättigung jeder Lastbereich abgedeckt wird. Jedes Netz wurde insgesamt mit 18 bis 20 unterschiedlichen Belastungen simuliert. Dabei wurde jeder Lastfall mit 16 Simulationsläufen durchgeführt, was zu stabilen Ergebnissen geführt hat. Jede dieser 16 Simulationen der 18 bis 20 Lastfälle konnte dann mithilfe der bei der Kalibrierung entwickelten Auswerteprogramme analysiert werden. Dabei wurden alle relevanten Kenngrößen berechnet, um sie den entsprechenden Größen, die in den einzelnen Berechnungsschritten im Verfahren des

HBS (2015) bestimmt werden, gegenüberstellen zu können.

### 5.1.2 Berechnung der Bezugsgrößen

Um eine Analyse der einzelnen Komponenten des Verfahrensablaufes im HBS (2015) durchführen zu können, war es notwendig, das Verfahren in einem eigenen Programm abzubilden. Dadurch konnten alle relevanten Zwischenergebnisse mit den entsprechenden Kenngrößen aus der Simulationsauswertung verglichen werden. In einem ersten Schritt wurde für die realen Knotenpunkte und die erhobenen Verkehrsstärken die mittlere Wartezeit des Kfz-Verkehrs nach dem HBS (2015) mithilfe dieses Programms berechnet. Bild 5-1 zeigt in Blau diese Wartezeiten, zum Vergleich sind die Wartezeiten aus der Realität (Grün) und dem kalibrierten Simulationsmodell (Rot) dargestellt. Die beiden letztgenannten Werte wurden dabei aus der Zeitdifferenz aller Fahrzeuge von der Ankunft am Ende der Warteschlange bis zum Überfahren der Haltlinie gebildet. Die Unterschiede zwischen den simulierten Werten (Rot) und den empirischen Werten (Grün) aus der Messung entsprechen denen, die während der Kalibrierung bereits erläutert wurden (vgl. Kapitel 4.2.2).

Die Eingangsgrößen für die Berechnung nach dem HBS (2015) wurden dabei weitgehend aus Luftbildern mit Höhenangaben bestimmt. Dies betrifft die Breite und die Länge der Fahrstreifen sowie deren

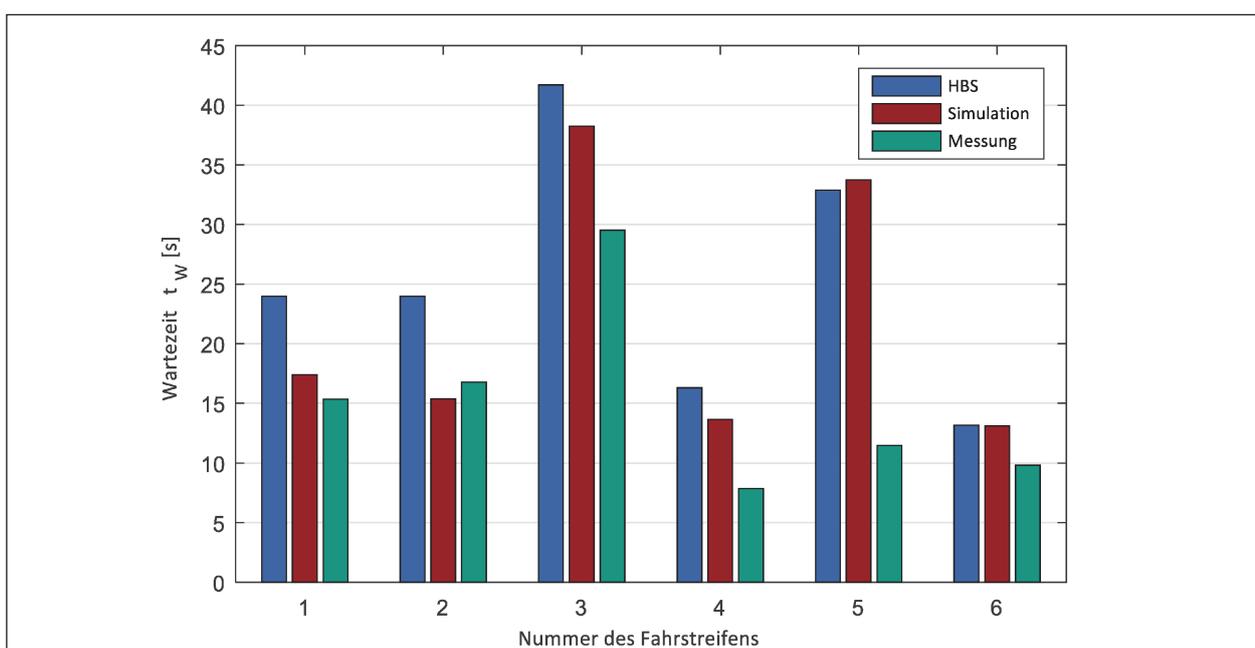


Bild 5-1: Vergleich der Wartezeiten zwischen HBS-Verfahren, Simulation und Erhebung am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustr. in Karlsruhe

Radius und die Längsneigung. Die Zeiten für Freigabezeitbeginn und -ende konnten dem Signalzeitenplan entnommen werden, ebenso die Umlaufzeit. Die Verkehrsstärken wurden anhand der real vorliegenden Belastung bestimmt. Die Instationarität wurde bei den weiteren Berechnungen nicht berücksichtigt; es wurde stationärer Zufluss unterstellt.

Zur weiteren Analyse der Differenzen zwischen der Wartezeit aus der Simulation und nach dem HBS (2015) sollen mehrere Lastfälle betrachtet werden, um ein genaueres Bild der Unterschiede zu erhalten.

Um die Ursache der Unterschiede identifizieren zu können, müssen außerdem alle relevanten Zwischenergebnisse der Berechnung nach dem HBS (2015) erfasst werden, um sie mit den entsprechenden Kenngrößen der Simulation vergleichen zu können. Dabei wurde wie nachfolgend erläutert vorgegangen.

Im ersten Schritt wurde das kalibrierte Simulationsmodell in allen Zufahrten gleichmäßig belastet. Diese Belastung wurde dann anhand der einzelnen Kapazitäten laut dem HBS (2015) auf die verschiedenen Fahrbeziehungen aufgeteilt, sodass alle Fahrstreifen in etwa gleichmäßig ausgelastet sind, wobei die Aufteilung auf die einzelnen Fahrstreifen weiterhin durch die Verhaltensmodelle in der Simulation erfolgt. Für jeden Lastfall wurden dann 16 Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen durchgeführt.

Aus allen Simulationsläufen wurde dann die mittlere Belastung der einzelnen Verkehrsströme und der einzelnen Fahrstreifen bestimmt. Die Belastung der Ströme dient dabei als Eingangsgröße zur Berechnung nach dem HBS (2015).

Die Zeitbedarfswerte der einzelnen Fahrstreifen wurden ebenfalls für jeden Lastfall bestimmt, ebenso wie die Wartezeit und die mittlere Rückstaulänge. Dabei handelt es sich um die Anzahl der Fahrzeuge, die vor Freigabezeitende an der Warteschlange angekommen sind, aber erst nach dem Freigabezeitende die Haltlinie überfahren. Der Wert entspricht damit dem Rückstau bei Freigabezeitende ( $N_{GE}$ ) nach HBS (2015). Dieser Wert wurde für jeden Umlauf des Signalprogramms bestimmt und anschließend der Mittelwert gebildet.

Im Hinblick auf die Betrachtung der durch einen Knotenpunkt resultierenden Gesamtverlustzeit an-

stelle ausschließlich der (rechnerischen) Wartezeit in einer Knotenpunktzufahrt bis zur Haltlinie wurde diese Verlustzeit ebenfalls mithilfe der Simulation bestimmt. Dabei wurde für jedes Fahrzeug aufgezeichnet, zu welchem Zeitpunkt es in das abgebildete Netz einfährt und zu welchem Zeitpunkt es das Netz wieder verlässt. Daraus wurde die „Aufenthaltszeit“ jedes Fahrzeugs im Simulationsmodell bestimmt. Um hieraus die durch den Knotenpunkt entstehende Verlustzeit zu ermitteln, wurde eine Mindestdurchfahrzeit ermittelt, die sich bei freier Fahrt ohne den Knotenpunkt im quasi leeren Netz ergibt. Dafür wurden in allen Modellen die Langsamfahrbereiche und die Lichtsignalanlagen sowie eventuell vorhandene Konfliktflächen entfernt.

In diesen einfachen Streckennetzen wurde jeder Verkehrsstrom dann mit sehr geringer Belastung simuliert. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die Fahrzeuge im Netz nicht behindert werden und

in Simulation ermittelt	Kenngröße nach dem HBS
$Q_{i,sim}$ Belastung pro Verkehrsstrom $i$ ermittelt bei „Ankunft am Ende der Warteschlange“	Eingangsgröße für die Berechnung
$Q_{j,sim}$ Belastung pro Fahrstreifen $j$ ermittelt bei „Ankunft am Ende der Warteschlange“	$Q_j$ nach Ziffer S4.4.6
$t_{B,j,sim}$ mittlerer Zeitbedarfswert ermittelt bei „Überfahrt Haltlinie“	$t_B$ nach Ziffer S4.4.2
$t_{w,j,sim}$ mittlere Wartezeit ermittelt aus „Überfahrt Haltlinie“ und „Ankunft am Ende der Warteschlange“	$t_{w,j}$ nach Ziffer S4.4.10 (außerdem $t_{WG}$ und $t_{WR}$ getrennt)
$t_{v,j,sim}$ mittlere Verlustzeit ermittelt aus „Aufenthaltszeit im Netz“ und „Mindestdurchfahrzeit des Netzes“	keine Vergleichsgröße
$N_{GE,j,sim}$ mittlere Rückstaulänge ermittelt aus „Ankunft am Ende der Warteschlange“, „Überfahrt Haltlinie“ und Signalbildwechsel	$N_{GE,j}$ nach Ziffer S4.4.11
keine Vergleichsgröße	$x_j$ Auslastungsgrad nach Ziffer S4.4.9
keine Vergleichsgröße	$C_j$ Kapazität nach Ziffer S4.4.3 u. a.

Tab. 5-1: Vergleichbare Kenngrößen für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage

das Netz vollständig mit ihrer Wunschgeschwindigkeit durchqueren. Aus diesen Simulationen wurde die Aufenthaltszeit bestimmt, welche der Mindestdurchfahrzeit entspricht. Anschließend wurde diese Zeit von den mittleren Aufenthaltszeiten, die in den einzelnen Lastfällen aufgetreten ist, subtrahiert. Daraus ergibt sich die Zeit, die durch Störungen resultieren, die der Knotenpunkt sowie die jeweiligen verkehrlichen Verhältnisse verursachen; diese Zeit stellt die Gesamtverlustzeit gegenüber freier Fahrt ohne Knotenpunkt dar.

Nach der Simulation und der Ermittlung der genannten Kenngrößen, wurde für jeden Lastfall eine Berechnung nach dem HBS (2015) für jeden einzelnen Fahrstreifen durchgeführt. Die variable Größe bildet dabei die Bemessungsverkehrsstärke, die anhand der Ankunftsverteilung an der Warteschlange aus der Simulation ermittelt wurde. Insgesamt standen damit für jeden Lastfall die in Tabelle 5-1 angegebenen Kenngrößen aus der Simulation und Kenngrößen gemäß dem HBS (2015) zur weiteren Analyse zur Verfügung.

Bild 5-2 zeigt beispielhaft die so ermittelten Wartezeiten für den betrachteten Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neu-Straße in Karlsruhe nach dem HBS (2015) und aus der Simulation. Außerdem zu erken-

nen sind die Verlustzeit in der Simulation und die Kapazität nach dem HBS (2015) als vertikale, gepunktete Linie.

### 5.1.3 Ableitung von Ansätzen für das Bewertungsverfahren

Der differenzierte Vergleich der berechneten mittleren Wartezeit nach dem HBS (2015) und der simulativ ermittelten mittleren Wartezeit zeigt, dass in der Simulation die Wartezeiten bei hohen Auslastungsgraden deutlich, d. h. bis zu mehr als dreimal höher sind. Die berechnete mittlere Wartezeit ergibt sich aus der Grundwartezeit, die aus dem periodischen Wechsel zwischen Freigabezeit und Sperrzeit resultiert und der Rückstauwartezeit, die aus dem Rückstau von Fahrzeugen resultiert, die bis zum Ende der Freigabezeit nicht abfließen können (Gleichung S4-42 bis Gleichung S4-44 in Kapitel S4.4.10 des HBS (2015)).

Die Wartezeit aus dem periodischen Wechsel zwischen Freigabezeit und Sperrzeit ist von der Sättigungsverkehrsstärke und somit letztendlich von den Zeitbedarfswerten abhängig. Es hat sich gezeigt, dass die ermittelten Zeitbedarfswerte aus der Simulation teilweise deutlich abweichen von den nach HBS (2015) berechneten Zeitbedarfswerten.

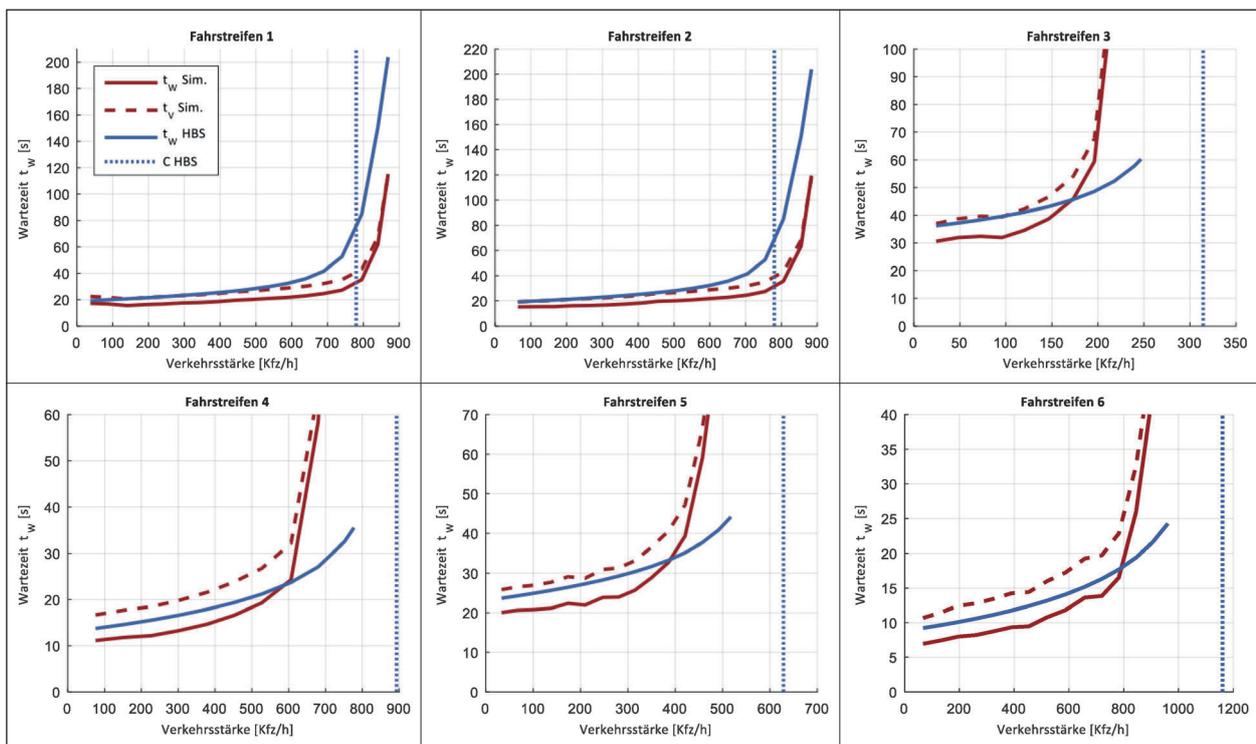


Bild 5-2: Vergleich der mittleren Warte- und Verlustzeit aus der Simulation mit der berechneten mittleren Wartezeit nach HBS (2015) am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe

Der Standardzeitbedarfswert von 1,8 s pro Fahrzeug wird nach dem HBS (2015) rechnerisch mittels Anpassungsfaktoren an die örtlichen Gegebenheiten angepasst.

Dazu gehört auch die Berücksichtigung des Einflusses der Längsneigung im Bereich des Knotenpunkts. Dieser Einfluss wird aber anscheinend im HBS (2015) stark überschätzt, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass die Werte für diesen Einflussfaktor noch auf Beobachtungen des Verkehrsablaufs zu einer Zeit mit gegenüber heute veralteter Fahrzeugtechnik beruhen.

Insbesondere hat sich in der Simulation aber auch gezeigt, dass eine Abhängigkeit des Zeitbedarfswerts von der Auslastung besteht. Das HBS (2015) dagegen geht von konstanten Zeitbedarfswerten aus.

Eine Erklärung für die Unterschiede zwischen berechneten und simulativ ermittelten mittleren Wartezeiten könnte somit in den Annahmen für die Berechnung der Grundwartezeit nach dem HBS (2015) liegen. Dies kann aber nicht abschließend geprüft werden, da in der Simulation keine getrennte Ermittlung der beiden Wartezeitanteile möglich ist.

Die festgestellten Unterschiede können aber auch zu wesentlichen Teilen aus der Rückstauwartezeit resultieren, die von der Rückstaulänge bei Freigabezeitende und der Kapazität des betrachteten Stroms abhängig ist. Die Kapazität hängt von der Sättigungsverkehrsstärke ab, die wiederum vom Zeitbedarfswert abhängt (Gleichung S4-8 in Kapitel S4.4.3 des HBS (2015)).

Die Rückstaulänge bei Freigabezeitende ist ebenfalls von der Kapazität des betrachteten Stroms, aber auch vom Auslastungsgrad des Fahrstreifens sowie dem Instationaritätsfaktor abhängig (Gleichung S4-45 in Kapitel S4.4.10 des HBS (2015)). Die Berechnung mit der Gleichung des HBS (2015) erfolgt durch eine durchgängige Funktion statt mit fünf Gleichungen in Abhängigkeit des Auslastungsgrads wie im HBS (2001), bei denen zusätzlich auch noch Interpolationen erforderlich waren.

In Bild 5-3 sind die simulativ ermittelten Rückstaulängen bei Freigabezeitende den entsprechenden berechneten Rückstaulängen nach dem HBS (2015) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads gegenübergestellt. Der Auslastungsgrad bezieht sich dabei jeweils auf die rechnerische Kapazität nach dem HBS (2015). Es zeigt sich, dass bis zu einem

Auslastungsgrad von etwa 0,65 in der Simulation keine Fahrzeuge bei Freigabezeitende auf den Fahrstreifen verbleiben. Dies entspricht der ursprünglichen Gleichung für die Rückstaulänge bei Freigabezeitende nach dem alten HBS (2001), nach der in diesem Fall  $N_{GE} = 0$  Fz galt. Mit der neuen durchgängigen Funktion ergibt sich hier bereits ein Rückstau mit bis zu 2 Fz. Bei diesen geringen Auslastungsgraden unter 0,65 ist diese Differenz jedoch unkritisch, da sich hierdurch keine relevanten Unterschiede in der daraus folgenden Bewertung ergeben.

Bei Auslastungsgraden ab 0,75 und vor allem bei einem Auslastungsgrad über 0,85 sind die in der Simulation ermittelten Rückstaulängen jedoch deutlich größer als die nach dem HBS (2015) berechneten Rückstaulängen. Die simulativ ermittelten Rückstaulängen sind in einzelnen Fällen bis zu 3,5-mal länger als die berechnete Rückstaulänge bei Freigabezeitende, wodurch die festgestellten Unterschiede zwischen der simulativ ermittelten mittleren Wartezeit und der berechneten mittleren Wartezeit erklärt sind.

Der nahezu sprunghafte Anstieg der Rückstaulänge in der Simulation bei hohen Auslastungsgraden legt nahe, dass der ursprüngliche Ansatz des HBS (2001), die Rückstaulänge bei Freigabezeitende in Abhängigkeit des Auslastungsgrads in Stufen zu berechnen, durchaus sinnvoll erscheint. Die Überführung in eine durchgängige Funktion ist zwar anwenderfreundlicher, führt aber bei hoch ausgelasteten Fahrstreifen anscheinend zu deutlichen Unterschätzungen der Rückstaulänge bei Freigabezeitende und damit der mittleren Wartezeit. Hier sind vertiefende Untersuchungen erforderlich.

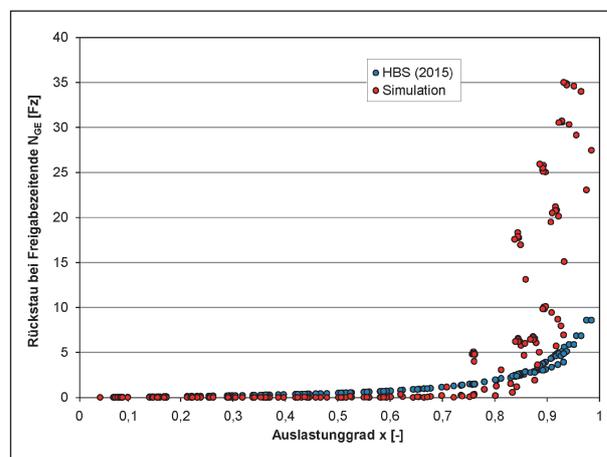


Bild 5-3: Rückstaulängen bei Freigabezeitende aus Simulation und aus Berechnung nach dem HBS (2015) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads

Ein weiterer Effekt, der in der Empirie und auch in der Simulation beobachtet wurde, ist, dass bei geringeren Auslastungen sich nicht zwangsläufig eine gleichmäßige Auslastung von zwei Fahrstreifen eines Stroms einstellt. Erklärt werden kann dies beispielsweise damit, wenn hinter dem Knotenpunkt einer der beiden Fahrstreifen eingezogen wird; in solchen Fällen ordnen sich die Kraftfahrer bei geringen Auslastungen tendenziell eher auf dem hinter dem Knotenpunkt durchgehenden Fahrstreifen ein, solange sie hierdurch keine (wesentlich) höheren Wartezeiten am Knotenpunkt in Kauf nehmen müssen und auch auf dem dann stärker belasteten Fahrstreifen zügig abfließen können. Ebenfalls ist die Fahrstreifenwahl abhängig von der Anzahl zu tätiger Fahrstreifenwechsel. Bei geringen Auslastungen in einer aufgeweiteten Zufahrt benutzen die Kraftfahrer bevorzugt den Fahrstreifen, für den die wenigsten Fahrstreifenwechsel notwendig sind. Erst mit zunehmender Auslastung stellt sich eine solche gleichmäßigere Auslastung beider Fahrstreifen ein. Im Berechnungsverfahren des HBS (2015) wird grundsätzlich, d. h. unabhängig von der Höhe des Auslastungsgrads eine gleichmäßige Auslastung aller Fahrstreifen unterstellt. Da diese Unschärfe bei geringen Auslastungen im Hinblick auf die Bewertung nicht maßgebend ist, kann diese jedoch hingenommen werden.

## 5.2 Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage

Die möglichen Einflussgrößen auf die Verkehrsqualität an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage sind gemäß dem HBS (2015):

- Knotenpunktgestaltung,
- Führung des Radverkehrs,
- Steuerungsbedingungen,
- Verkehrsstärke und -zusammensetzung und
- Umfeldbedingungen.

Die Knotenpunktgestaltung ist durch den Aufbau des Simulationsnetzes vorgegeben und hat keine nicht nachvollziehbaren Einflüsse auf die Warte- und Verlustzeit. Zur Vereinfachung wird Radverkehr nicht näher betrachtet. Als Umfeldbedingungen werden für die Verfahren des HBS (2015) grundsätzlich Helligkeit und eine trockene Fahrbahn unterstellt.

Das Verfahren kann also in Hinblick auf die Verkehrsstärken und -zusammensetzungen untersucht werden. Dazu wurden verschiedene Lastfälle definiert, die in Kapitel 5.2.1 näher beschrieben werden.

### 5.2.1 Definition der Lastfälle

Im Gegensatz zu den Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage bildet die Verkehrsstärke an vorfahrtgeregelten Knotenpunkten einen zweidimensionalen Freiheitsgrad. Da ein (vorfahrtrechtlich untergeordneter) Verkehrsstrom in einen anderen (vorfahrtrechtlich übergeordneten) Verkehrsstrom einfahren oder diesen kreuzen muss, besteht eine Abhängigkeit zwischen diesen Strömen. Das Netz kann damit nicht gleichmäßig in allen Richtungen mit unterschiedlichen Belastungen betrachtet werden. Stattdessen müssen die Abhängigkeiten der Verkehrsströme untereinander berücksichtigt werden.

Zur Definition der Lastfälle wurde als Grundlage die Grundkapazität eines Verkehrsstroms herangezogen. Dabei wurden verschiedene Auslastungsgrade definiert, die den in der Praxis relevanten Teil der Grundkapazitätskurve des HBS (2015) abdecken.

Bild 5-4 veranschaulicht diese Lastfälle am Beispiel des Verkehrsstroms 6 (Rechtseinbieger). Der erste Lastfall ergibt sich direkt aus der Grundkapazität. Der ihm übergeordnete Strom 2 (Geradausfahrer) bildet die Hauptstromsumme. Andere Ströme haben keinen Einfluss auf den Rechtseinbieger. Die Belastung des Hauptstroms wurde von 0 Fz/h bis 1.600 Fz/h variiert. Der Zufluss für den Nebenstrom ergibt rechnerisch über die Grundkapazität laut dem HBS (2015). Ein Lastfall bildet z. B. eine Belastung von 200 Fahrzeugen pro Stunde im Hauptstrom und 940 Fahrzeugen pro Stunde im Nebenstrom. Dieses Vorgehen wurde für verschiedene Auslastungsgrade angewendet (50 %, 75 %, 90 %, 100 % und 110 %). Die verschiedenen Lastfälle sollen Aufschluss darüber geben, inwieweit das Verfahren in verschiedenen Belastungssituationen anwendbar ist.

Um eventuelle Abhängigkeiten der Wartezeit des Nebenstroms von der Zusammensetzung der Hauptstrombelastung aus verschiedenen Strömen zu identifizieren, wurden in der Simulation folgende Stromkonstellationen betrachtet:

- Strom 6 zu Strom 2,
- Strom 7 zu Strom 2,
- Strom 7 zu Strom 2 und 3,

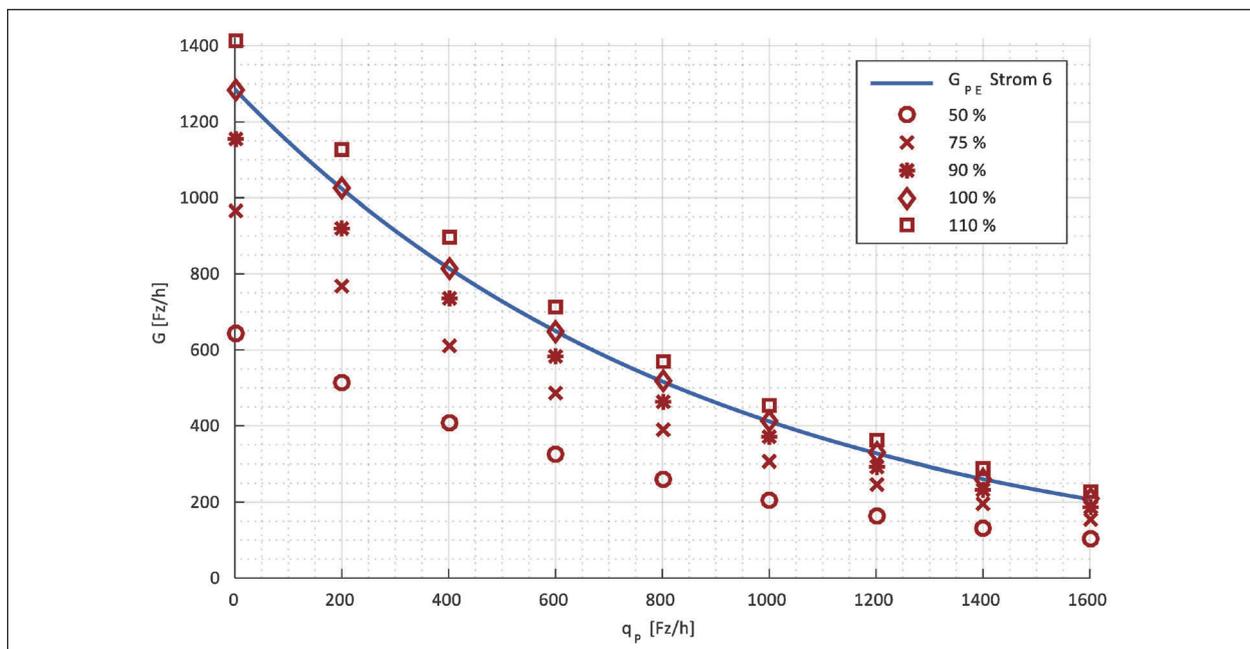


Bild 5-4: Definition der Lastfälle in Abhängigkeit des Auslastungsgrades für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage

- Strom 4 zu Strom 2 und 8 und
- Strom 4 zu Strom 7 und 8.

Für jedes Szenario wurden dann die genannten Lastfälle simuliert. Insgesamt wurden für die 5 Stromkonstellationen je 5 Lastfälle mit je 9 Hauptstrombelastungen berechnet. Jede einzelne Simulation wurde mit 32 Startzufallszahlen durchgeführt, um stabile und belastbare Ergebnisse zu erhalten. Damit wurden insgesamt 7.200 Simulationsläufe durchgeführt.

### 5.2.2 Berechnung der Bezugsgrößen

Zur näheren Betrachtung der Wartezeiten wurden zwei Herangehensweisen berücksichtigt. Zum einen wurden die empirisch erhobenen Wartezeiten mit den Wartezeiten aus der Berechnung nach dem HBS (2015) verglichen. Zum anderen wurde das kalibrierte Simulationsmodell mit den oben beschriebenen Lastfällen simuliert und die Ergebnisse schließlich wieder den nach dem HBS (2015) berechneten Wartezeiten gegenübergestellt.

Zur Berechnung nach dem HBS (2015) wurde, ebenso wie bei den Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage, das Verfahren mit allen Einzelschritten mithilfe eines eigenen Programms nachgebildet. Im Verfahren zur Berechnung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage werden weniger Eingangsgrößen verwendet als im Verfahren

für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage. Die Fahrstreifenanzahl und Nutzung durch Ströme ist durch die Erhebung bekannt. Die Länge der einzelnen Aufstellplätze wurden anhand von Luftbildern ermittelt. Die Steuerungsart (Zeichen 206 oder Zeichen 206 StVO) war ebenfalls durch die Messung vor Ort bekannt.

Anhand der erhobenen Daten konnte eine Stunde ausgewählt werden, in der die Verkehrsbelastungen der einzelnen Ströme bestimmt wurde. Für alle erhobenen Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage konnte damit die Berechnung nach dem HBS (2015) durchgeführt werden. Als Vergleichsgröße wurde aus den Messdaten die Zeit bestimmt, die die Fahrzeuge in der Belastungsstunde benötigen, um vom Ende der Warteschlange bis zum Einfahren in den Knotenpunkten benötigen. Bild 5-5 zeigt die so bestimmten Wartezeiten – exemplarisch für einen Knotenpunkt und die untergeordneten Ströme – im Vergleich.

Um die Wartezeiten weitergehend zu analysieren, wurden die bereits erläuterten Lastfälle im nach Zeitlücken und Kapazität kalibrierten Simulationsmodell durchgeführt. Die wesentlichen Berechnungsgrößen des Verfahrens nach dem HBS (2015) sind die Grundkapazität und die sich daraus ergebenden Wartezeiten. Letztere lässt sich ebenso wie bei den realen Knotenpunkten bestimmen. Darüber hinaus wurden für jeden Lastfall die Verlustzeit und die Län-

ge der Warteschlange bestimmt. Die Verlustzeit ist dabei die Zeit, die die Fahrzeuge im Mittel zusätzlich benötigen, als ein frei durch das Netz fahrendes Fahrzeug. Die frei fahrenden Fahrzeuge unterliegen dabei keinen Störungen durch andere Fahrzeuge.

Ebenso müssen sich Fahrzeuge der Nebenströme am Knotenpunkt nicht orientieren.

Dabei entsteht in jedem Lastfall ein Mehrbedarf an Zeit durch die Verzögerung aufgrund der Orientie-

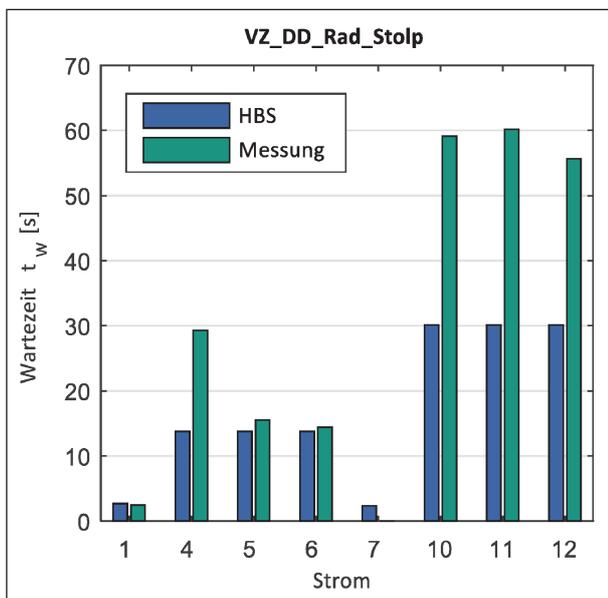


Bild 5-5: Vergleich der Wartezeiten zwischen HBS-Verfahren und Erhebung am Knotenpunkt Radeberger Straße/ Stolpener Straße in Dresden

rung (Sichtbarkeit) bzw. der Knotenpunktgeometrie (betrifft an Einmündungen und Kreuzungen die ab- und einbiegenden Ströme), dem Warten an erster Position und dem Warten in der Warteschlange sowie dem Beschleunigen nach Einfahrt in den Knotenpunkt.

Die Länge der Warteschlange beschreibt für jeden Lastfall die Entfernung von der Halt- bzw. Wartelinie, bei der die Fahrzeuge im Mittel das Warteschlangeneende erreicht haben. Die Größe ist also mit der mittleren Rückstaulänge vergleichbar, die nach dem Verfahren des HBS (2015) berechnet wird.

Bild 5-6 zeigt für die Stromkonstellation „Strom 7 zu Strom 2 und 3“ bei einer Auslastung von etwa 75 % eine Gegenüberstellung der Verlustzeit und Wartezeit der Simulation und der nach dem HBS (2015) berechneten Wartezeit.

### 5.2.3 Ableitung von Ansätzen für das Bewertungsverfahren

Der differenzierte Vergleich der berechneten mittleren Wartezeit nach dem HBS (2015) und der simulativ ermittelten mittleren Wartezeit zeigt, dass bei hohen Kapazitäten über etwa 400 Fz/h die berechneten Wartezeiten größer als die aus der Simulation ermittelten Wartezeiten sind. Bei geringen Kapazitäten unter 400 Kfz/h dagegen sind die berechneten Wartezeiten deutlich geringer als die simulativ ermittelten Wartezeiten. Diese Effekte konnten bei

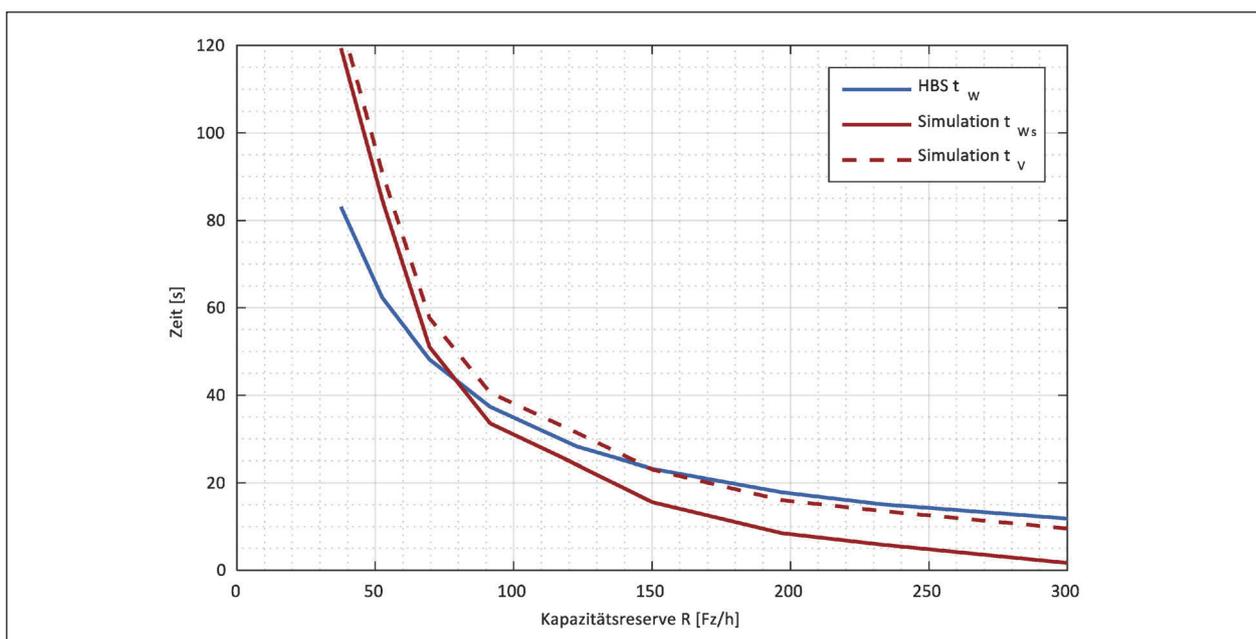


Bild 5-6: Vergleich zwischen berechneter mittlerer Wartezeit nach HBS (2015) und mittlerer Zeit in Warteschlange aus Simulation sowie mittlerer Verlustzeit aus Simulation

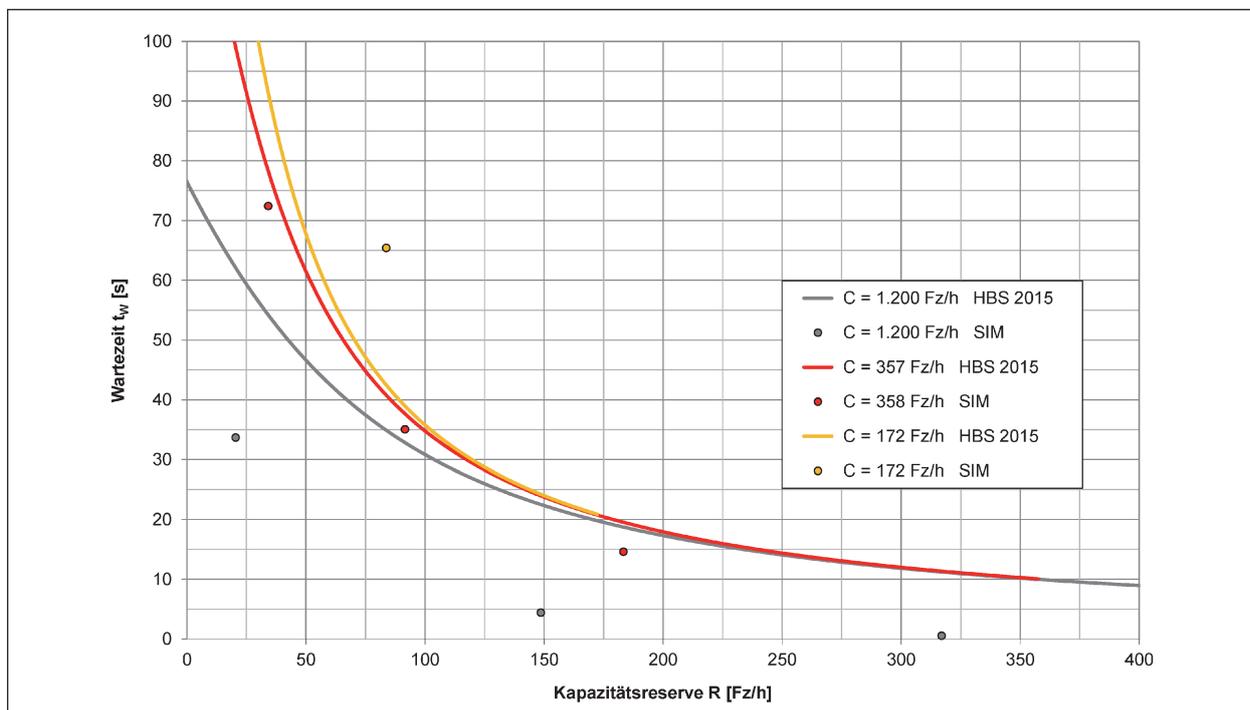


Bild 5-7: Vergleich zwischen berechneter mittlerer Wartezeit nach HBS (2015) und mittlerer Wartezeit aus Simulation in Abhängigkeit der Kapazität für die Stromkonstellation „Strom 6 zu Strom 2“

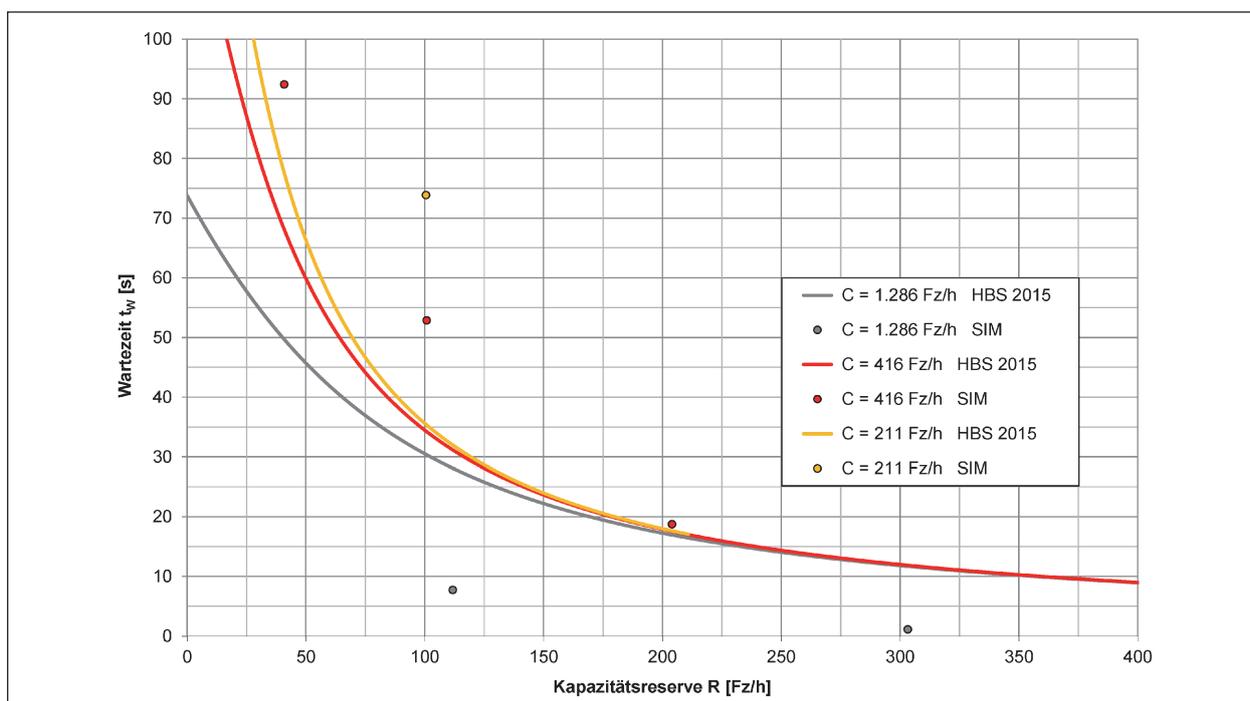


Bild 5-8: Vergleich zwischen berechneter mittlerer Wartezeit nach HBS (2015) und mittlerer Wartezeit aus Simulation in Abhängigkeit der Kapazität für die Stromkonstellation „Strom 7 zu Strom 2“

den Stromkonstellationen „Strom 6 zu Strom 2“ (Bild 5-7), „Strom 7 zu Strom 2“ (Bild 5-8) und „Strom 7 zu Strom 2 und 3“ (Bild 5-9) festgestellt werden. Bei der ebenfalls betrachteten Stromkonstellation „Strom 4 zu Strom 7 und 8“ konnte dieser

Effekt zwar nicht festgestellt werden (hier sind die berechneten Wartezeiten immer deutlich geringer als die simulativ ermittelten Wartezeiten), dennoch weisen die Ergebnisse darauf hin, dass bei hohen Kapazitäten bei der Berechnung nach dem HBS

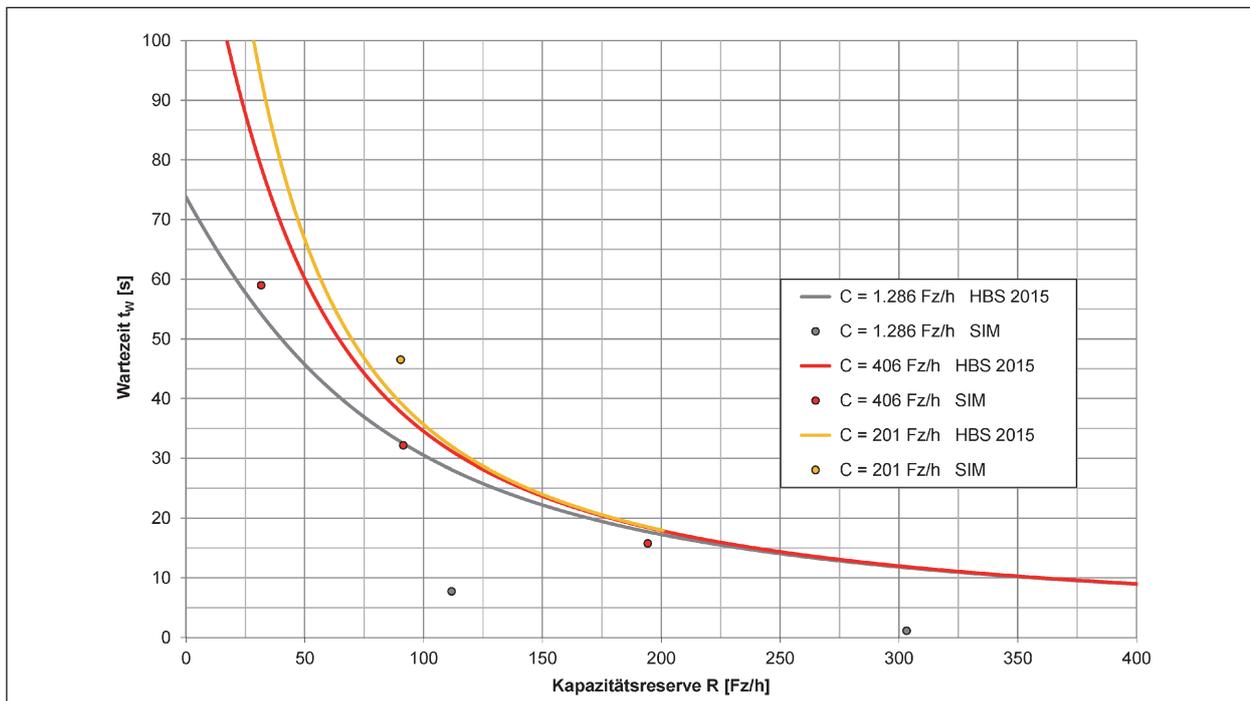


Bild 5-9: Vergleich zwischen berechneter mittlerer Wartezeit nach HBS (2015) und mittlerer Wartezeit aus Simulation in Abhängigkeit der Kapazität für die Stromkonstellation „Strom 7 zu Strom 2 und 3“

(2015) die mittlere Wartezeit überschätzt wird, bei geringen Kapazitäten dagegen wird die mittlere Wartezeit bei der Berechnung nach dem HBS (2015) unterschätzt.

Vor diesem Hintergrund wurde geprüft, ob die Gleichung zur Berechnung der Wartezeit des HBS (2015) (Gleichung 5-1) sinnvoll angepasst werden kann.

$$t_{w,i} = \frac{3600}{C_i} + 900 \cdot \left[ \left( \frac{q_i}{C_i} - 1 \right) + \sqrt{\left( \frac{q_i}{C_i} - 1 \right)^2 + \frac{8 \cdot q_i}{C_i^2}} \right] \quad (\text{Gl. 5-1})$$

mit

$t_{w,i}$  mittlere Wartezeit der Fahrzeuge im Verkehrsstrom i [s]

$C_i$  Kapazität des Verkehrsstroms i [Fz/h]

$q_i$  Verkehrsstärke in Verkehrsstrom i [Fz/h]

Diese Gleichung soll jedoch in ihrer Grundform nicht geändert werden, sondern lediglich so angepasst werden, dass eine möglichst genaue, d. h. realistischere Berechnung der mittleren Wartezeit sowohl bei hohen als auch geringen Kapazitäten erfolgt. Deshalb wurde eine Anpassung der beiden in der Wartezeitgleichung bestehenden Konstanten (900 und 8) vorgenommen, sodass diese als freie Variablen (bezeichnet mit a und b) angesetzt werden, um eine möglichst hohe Anpassung an die simulativ ermittelten Wartezeiten zu erzielen (Minimierung der Fehlerquadrate) (Gleichung 5-2).

$$t_{w,i} = \frac{3600}{C_i} + a \cdot \left[ \left( \frac{q_i}{C_i} - 1 \right) + \sqrt{\left( \frac{q_i}{C_i} - 1 \right)^2 + \frac{b \cdot q_i}{C_i^2}} \right] \quad (\text{Gl. 5-2})$$

mit

$t_{w,i}$  mittlere Wartezeit der Fahrzeuge im Verkehrsstrom i [s]

$C_i$  Kapazität des Verkehrsstroms i [Fz/h]

$q_i$  Verkehrsstärke in Verkehrsstrom i [Fz/h]

a, b Variablen

Zu jeder Kapazität wurden mit den Wartezeiten aus der Simulation für die betrachteten Auslastungsgrade des Nebenstroms von 50 %, 75 %, 90 %, 100 % und 110 % die optimalen Parameter a und b ermittelt. D. h., es wurde auch der Fall der Überlastung (Kapazitätsreserve < 0 Fz/h) einbezogen. In Bild 5-10 ist beispielhaft für die Stromkonstellation „Strom 6 zu Strom 2“ die Anpassung der Wartezeitgleichung mit zwei freien Variablen a und b bei einer Kapazität von 1.200 Fz/h dargestellt. Der Wert der Variable a streut bei Anpassung der Wartezeitgleichung mit zwei freien Variablen a und b in Abhängigkeit der Kapazität zwischen etwa 450 und 1.500 (Bild 5-11). Im Mittel liegt er bei etwa 900. Der Wert der Variablen b dagegen hat eine deutliche Abhängigkeit von der Kapazität (Bild 5-12).

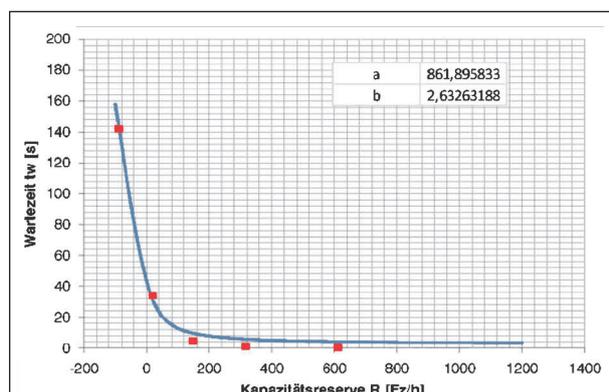


Bild 5-10: Anpassung der Wartezeitgleichung mit zwei freien Variablen a und b für die Stromkonstellation „Strom 6 zu Strom 2“ bei einer Kapazität von 1.200 Fz/h

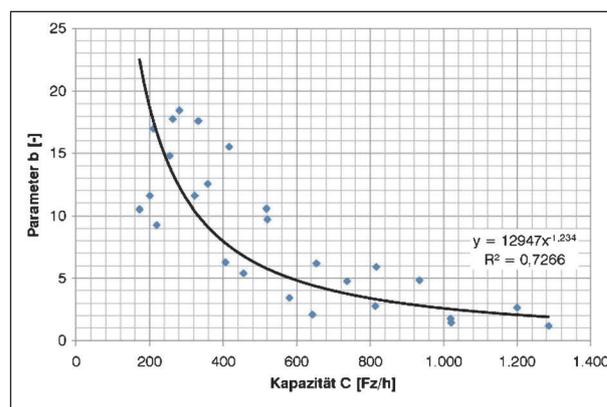


Bild 5-12: Variable b bei Anpassung der Wartezeitgleichung mit zwei freien Variablen a und b in Abhängigkeit der Kapazität

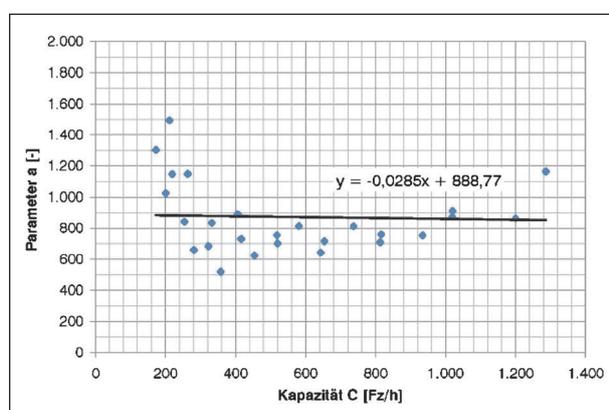


Bild 5-11: Variable a bei Anpassung der Wartezeitgleichung mit zwei freien Variablen a und b in Abhängigkeit der Kapazität

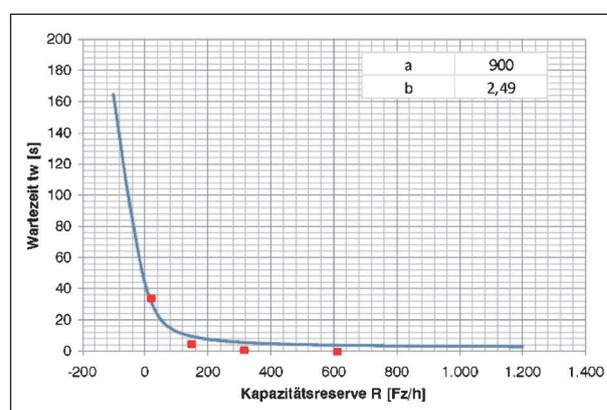


Bild 5-13: Anpassung der Wartezeitgleichung mit einer freien Variablen b für die Stromkonstellation „Strom 6 zu Strom 2“ bei einer Kapazität von 1.200 Fz/h

Ausgehend von diesem Ergebnis erfolgte eine erneute Anpassung der Wartezeitgleichung, bei der die erste Konstante (900) beibehalten wurde und nur für die zweite Konstante (8) eine freie Variable (weiterhin bezeichnet mit b) angesetzt wurde, um eine möglichst hohe Anpassung an die simulativ ermittelten Wartezeiten zu erzielen (Minimierung der Fehlerquadrate) (Gleichung 5-3).

$$t_{w,i} = \frac{3600}{C_i} + 900 \cdot \left[ \left( \frac{q_i}{C_i} - 1 \right) + \sqrt{\left( \frac{q_i}{C_i} - 1 \right)^2 + \frac{b \cdot q_i}{C_i^2}} \right] \quad (\text{Gl. 5-3})$$

mit

$t_{w,i}$  mittlere Wartezeit der Fahrzeuge im Verkehrsstrom i [s]

$C_i$  Kapazität des Verkehrsstroms i [Fz/h]

$q_i$  Verkehrsstärke in Verkehrsstrom i [Fz/h]

b Variable

Zu jeder Kapazität wurde dann mit den Wartezeiten aus der Simulation für die Auslastungsgrade des Nebenstroms unterhalb der Kapazität von 50 %, 75 %, 90 % und 100 % der optimale Parameter b ermittelt. D. h., es wurden diesmal nur die Fälle mit einer Kapazitätsreserve von mehr als 0 Fz/h einbezogen. In Bild 5-13 ist beispielhaft für die Stromkonstellation „Strom 6 zu Strom 2“ die Anpassung der Wartezeitgleichung mit einer freien Variablen b für die Stromkonstellation „Strom 6 zu Strom 2“ bei einer Kapazität von 1.200 Fz/h dargestellt.

Im Ergebnis ergibt sich daraus die in Bild 5-14 dargestellte Funktion für die Variable b in Abhängigkeit von der Kapazität. Damit ergibt sich die angepasste Wartezeitgleichung wie in Gleichung 5-4 dargestellt.

Durch die angepasste Wartezeitgleichung treten abweichende Bewertungen durch unterschiedliche Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs aus berechneter mittlerer Wartezeit und aus mittlerer Wartezeit aus Simulation seltener auf (Bild 5-15).

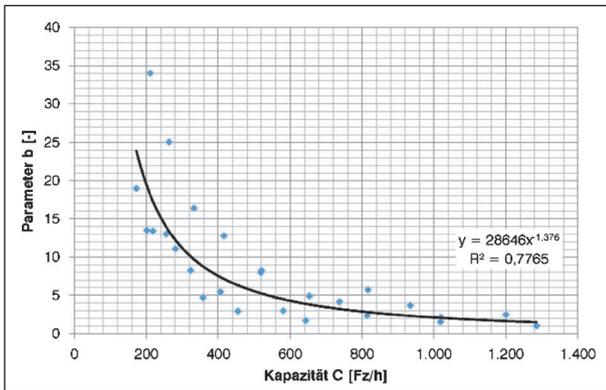


Bild 5-14: Variable b bei Anpassung der Wartezeitgleichung mit der freien Variablen b in Abhängigkeit der Kapazität

Im Hinblick auf die mittleren Verlustzeiten (gegenüber der freien Durchfahrt ohne Knotenpunkt) lässt sich festhalten, dass diese – über alle Stromkonstellationen und Belastungsfälle betrachtet – im Mittel um etwa 6 s höher sind als die mittleren Wartezeiten, die in der Simulation bestimmt wurden. Damit liegt die Differenz zwischen Verlust- und Wartezeit in etwa in der Größenordnung, wie sie u. a. auch schon BRILON (2003) für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage allgemein angegeben hat; BRILON (2003) hat diesen zusätzlichen Zeitverlust mit 5 s beziffert. Dieser lässt sich im Wesentlichen durch den geometric delay erklären, der bei Einmündungen und Kreuzungen ohne Lichtsignalan-

Strom 6 zu 2 QSV = A 8			Strom 7 zu 2 QSV = A 8			Strom 7 zu 2u3 QSV = A 8		
QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)
A	3	7	A	3	8	A	3	8
B	4	1	B	4	0	B	4	0
C	1	0	C	1	0	C	1	0
Strom 6 zu 2 QSV = B 5			Strom 7 zu 2 QSV = B 4			Strom 7 zu 2u3 QSV = B 6		
QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)
B	2	4	B	2	4	B	2	4
C	1	1	C	1	0	C	2	2
D	2	0	D	1	0	D	2	0
Strom 6 zu 2 QSV = C 2			Strom 7 zu 2 QSV = C 0			Strom 7 zu 2u3 QSV = C 1		
QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)
C	0	1	C			C	1	1
D	1	1	D					
E	1	0	E					
Strom 6 zu 2 QSV = D 5			Strom 7 zu 2 QSV = D 4			Strom 7 zu 2u3 QSV = D 3		
QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)
C	1	1	C	3	3	D	2	3
D	2	2	D	1	1	E	1	0
E	2	2						
Strom 6 zu 2 QSV = E 15			Strom 7 zu 2 QSV = E 11			Strom 7 zu 2u3 QSV = E 9		
QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)
D	2	1	C	0	1	D	1	0
E	13	14	D	3	2	E	8	9
			E	8	8			
Strom 6 zu 2 QSV = F 10			Strom 7 zu 2 QSV = F 18			Strom 7 zu 2u3 QSV = F 18		
QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)	QSV	HBS 2015	HBS b(Ci)
F	10	10	F	18	18	F	18	18

Bild 5-15: Vergleich der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs aus berechneter mittlerer Wartezeit nach HBS (2015) und aus berechneter mittlerer Wartezeit nach angepasster Wartezeitgleichung in Bezug zu Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs aus mittlerer Wartezeit aus Simulation

ge bei Abbiegern auftritt. Bei Kreisverkehren, die hier nicht betrachtet wurden, ist dieser geometric delay höher, wie beispielsweise die Ergebnisse von BANSI (2004) gezeigt haben.

$$t_{w,i} = \frac{3600}{C_i} + 900 \cdot \left[ \left( \frac{q_i}{C_i} - 1 \right) + \sqrt{\left( \frac{q_i}{C_i} - 1 \right)^2 + \frac{2,8646 \cdot 10^4 \cdot C_i^{-1,37} \cdot q_i}{C_i^2}} \right] \quad (\text{Gl. 5-4})$$

mit

$t_{w,i}$  mittlere Wartezeit der Fahrzeuge im Verkehrsstrom  $i$  [s]

$C_i$  Kapazität des Verkehrsstroms  $i$  [Fz/h]

$q_i$  Verkehrsstärke in Verkehrsstrom  $i$  [Fz/h]

Die im HBS (2015) angegebenen zusätzlichen Zeitverluste vor und hinter Einmündungen und Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage, die von BAIER et al. (2015) abgeleitet wurden, sind diejenigen Zeitverluste, die bei einer freien Durchfahrt durch einen Knotenpunkt (also ohne Beeinflussung durch andere Verkehre) gegenüber freien Durchfahrt ohne Knotenpunkt auftreten. Diese sind abhängig von den mittleren Fahrtgeschwindigkeiten auf den Strecken vor und hinter dem Knotenpunkt. Die zusätzlichen Zeitverluste werden bei der anlagenübergreifenden Betrachtung von Netzabschnitten als zusätzliche Zeitverluste der berechneten mittleren Wartezeit an den Knotenpunkten zugeschlagen.

Bei Einmündungen und Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage werden diese nach der Art der Vorfahrtregelung unterschieden:

- Bei einer Vorfahrtregelung des betrachteten Stroms mit Zeichen 205 StVO betragen die zusätzlichen Zeitverluste bei Fahrtgeschwindigkeiten auf den Strecken vor und hinter dem Knotenpunkt bis zu 50 km/h insgesamt 2,0 s, bei Fahrtgeschwindigkeiten bis zu 60 km/h insgesamt 3,5 s.
- Bei einer Vorfahrtregelung des betrachteten Stroms mit Zeichen 206 StVO betragen die zusätzlichen Zeitverluste bei Fahrtgeschwindigkeiten auf den Strecken vor und hinter dem Knotenpunkt bis zu 50 km/h insgesamt 9,5 s, bei Fahrtgeschwindigkeiten bis zu 60 km/h insgesamt 11,5 s.

Diese Unterschiede resultieren daher, dass bei einer Vorfahrtregelung mit Zeichen 206 StVO ein

Fahrzeug auch bei freiem Verkehr anhalten muss, d. h. eine Abbremsung bis zum Stand erfolgt. Bei den Strömen, die in der Simulation betrachtet wurden, handelt es sich um solche, für die eine Vorfahrtregelung mit Zeichen 205 StVO vorliegt (Ströme 4 und 6) bzw. die gegenüber dem Verkehr aus der Gegenrichtung wartepflichtig sind (Strom 7). Dies bedeutet, dass die Fahrzeuge dieser Ströme nicht zwangsläufig anhalten müssen, sondern nur in Abhängigkeit der jeweiligen Situation (keine ausreichenden Zeitlücken im vorfahrtberechtigten Verkehr) anhalten und dazu bis zum Stand abbremsen. Infolgedessen ergibt sich der über alle Stromkonstellationen und Belastungsfälle festgestellte zusätzliche Zeitverlust zur Wartezeit von im Mittel etwa 6 s.

## 6 Einfluss von Instationarität

### 6.1 Entwicklung von typischen Ganglinien auf Basis von Realdaten

Wie in Kapitel 2.5.2 bereits beschrieben, sind die Auswirkungen instationärer Zuflüsse auf die Berechnung der Wartezeiten an Knotenpunkten auf jeden Fall zu beachten. Bei der Berücksichtigung von Instationarität werden häufig bestimmte Ganglinientypen mathematisch angenähert oder, bei nicht ausreichender Datenlage, unterstellt. Die häufigsten Formen hierbei sind eine Parabel oder ein Dreieck. Es ist davon auszugehen, dass diese idealisierten Arten von Ganglinien in der Realität jedoch nur selten vorkommen. Zur Ableitung der für die systematische Untersuchung der Auswirkungen von Instationarität notwendigen Profile für die Laborbeispiele wurden Dauerzählstellendaten aus Dresden ausgewertet. Die Lage der 18 vollautomatischen Pegelzählstellen ist in Bild 6-1 dargestellt, die spezifischen Eigenschaften hierzu finden sich in Tabelle 6-1. Die Daten der PZS wurden am 05. September 2012 (Mittwoch) in der Zeit zwischen 05:00 Uhr und 20:00 Uhr aufgenommen. Die Erfassung erfolgte fahrstreifenbezogen ohne zeitliche Aggregation.

Abweichend vom bisher geplanten Vorgehen wurden die Rohdaten aus den FE 02.277/2006/ARB und FE 02.278/2006/ARB aufgrund fehlender Detaildaten und mangelnden Umfangs nicht für diese Untersuchung mitverwendet.



Bild 6-1: Lage der Pegelzählstellen im Stadtgebiet Dresden (Kartenmaterial: © OpenStreetMap-Mitwirkende, CC-BY-SA)

Nr.	PZS	Lage (Straße)	TGw-Typ nach HBS 2001	Typ I	Klassifizierung Hauptstraßennetz (nach LH DD)	Erfassungsart (TLS)
1	PZS 0293	Carolabrücke - Rathenauplatz	TGw1	Radialstr.	Bundesstr.	8+1
2	PZS 0320	Pirnaer Landstraße – Altsporbitz	TGw3	Radialstr.	sonst. Hauptverkehrsstr.	8+1
3	PZS 0346	Loschwitzer Brücke – Schillerplatz	TGw2	Tangentialstr.	sonst. Hauptverkehrsstr.	8+1
4	PZS 0404	Teplitzer Straße – Reichenbachstraße	TGw1	Radialstr.	Bundesstr.	8+1
5	PZS 0506	Nürnberger Straße – Fritz-Förster-Platz	TGw1	Tangentialstr.	Staatsstr.	8+1
6	PZS 0552	Zellescher Weg – Ackermannstraße	TGw2	Tangentialstr.	Staatsstr.	8+1
7	PZS 0574	Tschirnhausstraße – Michaelistraße	TGw3	Tangentialstr.	Staatsstr.	8+1
8	PZS 0808	Kesselsdorfer Str. – Baumarkt	TGw3	Radialstr.	sonst. Hauptverkehrsstr.	8+1
9	PZS 0822	Coventrystraße – Braunsdorfer Str.	TGw2	Radialstr.	Bundesstr.	8+1
10	PZS 0831	Coventrystraße – Kesselsdorfer Str.	TGw3	Radialstr.	Bundesstr.	8+1
11	PZS 0841	Coventrystraße – Gompitzer Höhe	TGw3	Radialstr.	Bundesstr.	8+1
12	PZS 0906	Hamburger Straße – Flügelweg	TGw2	Radialstr.	Bundesstr.	8+1
13	PZS 0909	Meißner Landstraße – Schunckstraße	TGw2	Radialstr.	Bundesstr.	8+1
14	PZS 0957	Löbtauer Straße – Berliner Straße	TGw1	Tangentialstr.	sonst. Hauptverkehrsstr.	8+1
15	PZS 1002	Leipziger Straße – Alter Schlachthof	TGw2	Radialstr.	Staatsstr.	8+1
16	PZS 1045	Washingtonstraße – Lommatzcher Str.	TGw2	Tangentialstr.	Staatsstr.	8+1
17	PZS 1214	Bautzner Landstraße – Rossendorfer Str.	TGw3	Radialstr.	Bundesstr.	8+1
18	PZS 1303	Pillnitzer Landstraße – Wasserwerkstraße	TGw3	Tangentialstr.	Staatsstr.	8+1

Tab. 6-1: Daten der Pegelzählstellendaten Dresden



Bild 6-2: Kompakte Darstellung der Spitzenstundengänglinien einzelner Pegelzählstellen in 15-Minuten-Intervallen (x-Achse: 15-Minuten-Intervalle, y-Achse: Verkehrsstärke in Kfz/h, Markierung bei 1.000 Kfz/h)

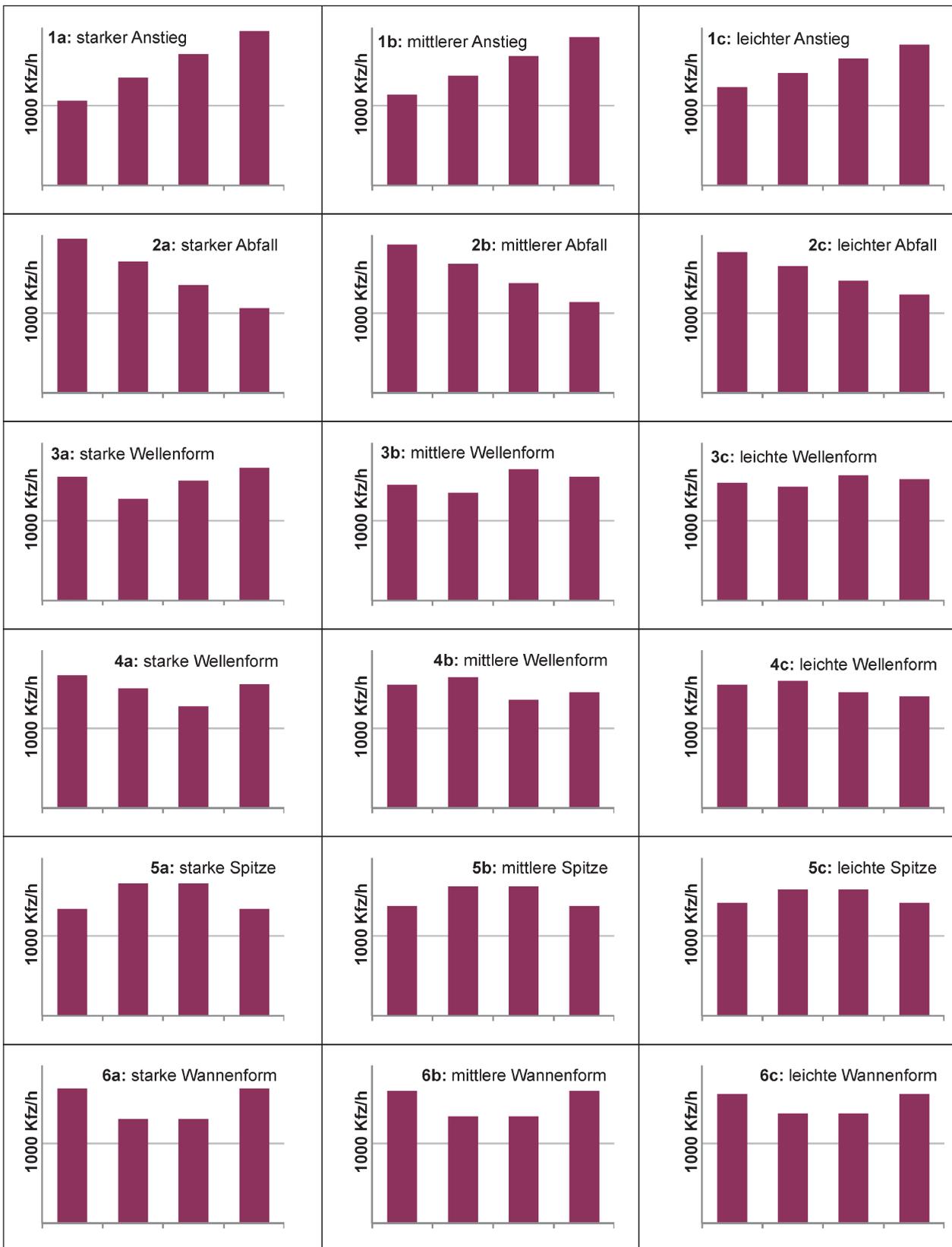


Bild 6-3: Kompakte Darstellung aller Ganglinien für die Laborbeispiele in 15-Minuten-Intervallen (x-Achse: 15-Minuten-Intervalle, y-Achse: Verkehrsstärke in Kfz/h, Markierung bei 1.000 Kfz/h)

Die Diagramme in Bild 6-4 zeigen beispielhaft für zwei der Pegelzählstellen den Verlauf der Spitzenstunde sowie der beiden Viertelstunden davor und danach in Aggregationsstufen von einer Minute, 5 Minuten und 15 Minuten. Dabei ist ersichtlich, dass diese Ganglinien weder einer Parabel noch einem Dreieck noch einer anderen symmetrischen Form folgen. Zur Verdeutlichung, dass es sich hierbei nicht um Einzelfälle handelt, ist in Bild 6-2 eine größere Auswahl der Spitzenstundenganglinien der Pegelzählstellen in minimalistischer Form zusammenfassend dargestellt. Die Rohdaten sind dabei zu 15-Minuten-Intervallen verdichtet.

Abweichend vom HBS (2015), das die Spitzenstunde auf Basis von 15-Minuten-Intervallen identifiziert, aber übereinstimmend mit WU (1990), erfolgt hier eine Bestimmung der relevanten Spitzenstunde anhand von 5-Minuten-Intervallen.

Ausgehend von den verschiedenen Ganglinienprofilen der Pegelzählstellendaten und mit dem Fokus auf einer möglichst umfassenden Abdeckung vieler möglicher Variationen von Anordnung und Belas-

tung der 15-Minuten-Intervalle innerhalb einer Stunde, wurden 18 Profile für die Untersuchung im Rahmen der Laborbeispiele entworfen. Diese zeichnen sich durch gute Handhabbarkeit aus und ermöglichen eine systematische Analyse und Sichtbarmachung verschiedener Effekte bei vertretbarem Aufwand. Bild 6-3 beinhaltet die Kompaktdarstellung der einzelnen Profile. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Laborbeispiele mit ihren Eigenschaften erfolgt in Kapitel 6.2.2.

Um die Validität der entworfenen Profile zu überprüfen, wurden zusätzliche Daten von Dauerzählstellen in Berlin ausgewertet. Eine Tagesmessung vom 17.09.2015 an einer großen Anzahl von Zählstellen sowie Messwerte über den Zeitraum vom 01.09. bis 30.11.2015 für 5 Zählstellen ergaben rund 1.200 Datensätze. Diese wurden zuerst fehlerbereinigt und zu 5-Minuten-Intervallen aggregiert, um die jeweilige Spitzenstunde zu identifizieren. Die Zuordnung der Ganglinienformen über einen Algorithmus erfolgte auf Basis von 15-Minuten-Intervallen. Zur Minimierung der Komplexität wurde dabei nicht in die starke, mittlere oder schwache Ausprägung un-

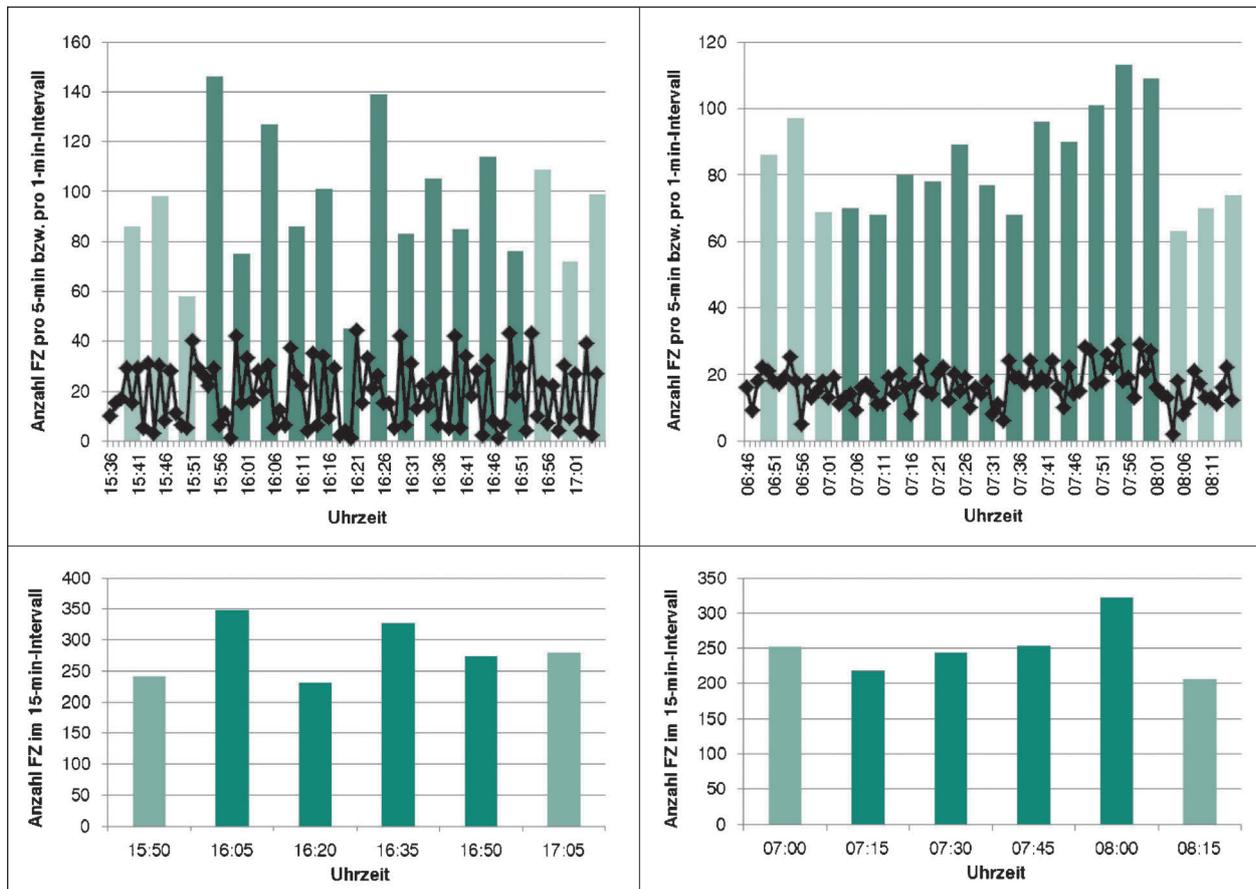


Bild 6-4: Spitzenstundenganglinien in verschiedenen Aggregationsstufen der PZS 0506N und 0522N

terschieden. Bis zu einem Unterschied des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls zur mittleren Spitzenstundenverkehrsstärke von 4 % wurde das Profil „konstant“ zugeordnet.

Insgesamt kommen in allen untersuchten Spitzenstunden die instationären Ganglinienprofile häufiger vor als ein stationärer Verlauf der Verkehrsstärke. Bild 6-5 zeigt die Verteilung über die Tageszeit hinweg, Bild 6-6 stellt die Häufigkeit der Profile insgesamt dar. Es ist zu erkennen, dass mit Ausnahme der Profile „Anstieg“ und „Abfall“ die instationären Ganglinienprofile etwa gleich häufig vorkommen. Stationarität, durch das Profil „konstant“ repräsentiert,

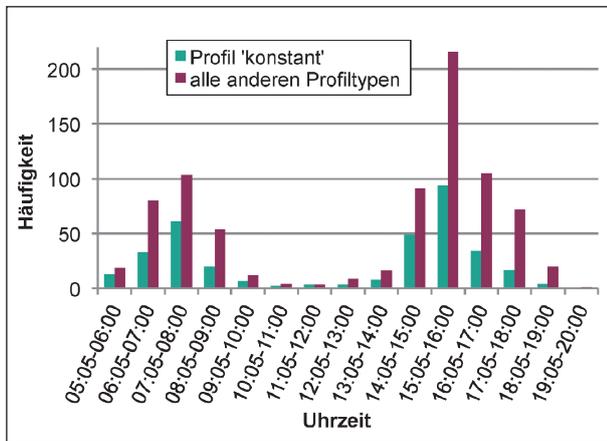


Bild 6-5: Häufigkeit der Spitzenstunden im Tagesverlauf, nach stationärem und instationärem Zufluss (Daten Berlin)

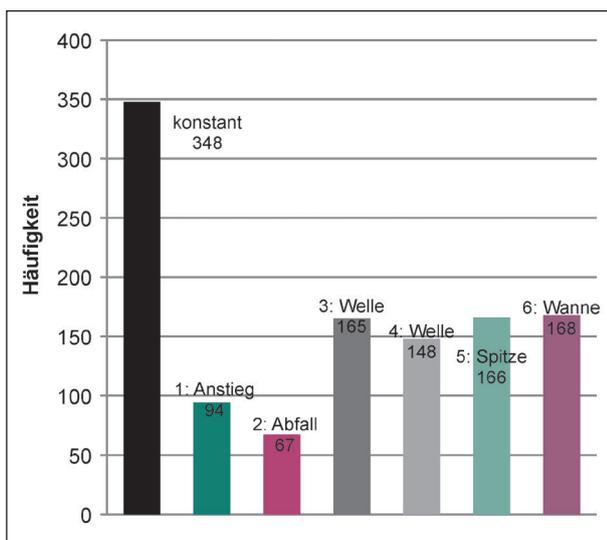


Bild 6-6: Häufigkeit der Profile innerhalb der Spitzenstunden (Daten Berlin)

tiert, kommt mit 30 % Häufigkeit also wesentlich seltener vor als Instationarität.

## 6.2 Einfluss von Instationarität an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage

### 6.2.1 Aufbau und Kalibrierung des Simulationsmodells mit VISSIM

Die mikroskopischen Simulationen zur Analyse des Einflusses instationärer Zuflüsse an einer Lichtsignalanlage wurden auf einem möglichst einfach gehaltenen Modell einer Strecke mit einer festzeitgesteuerten Lichtsignalanlage ausgeführt (siehe Bild 6-7).

Dabei wurde VISSIM in der Version 7 verwendet und über die COM-Schnittstelle mit Python 2.7 extern gesteuert.

Ebenso erfolgte die Koordinierung der verschiedenen Variationen und die Auswertung von Zwischenergebnissen (teil-)automatisiert über entsprechende Skripte in Python.

Die Kalibrierung erfolgte anhand der Anpassung der über Reisezeitmessungen ermittelten Verlustzeit in VISSIM an die nach dem HBS (2015) berechnete Wartezeit für den stationären Fall. Hierfür wurde ein konstanter Zufluss mit verschiedenen Kombinationen des Lichtsignalprogramms sowie einem Auslastungsgrad  $x_j$  im Bereich zwischen effektiv 0,92 und 0,96 verwendet. Es wurde Wert darauf gelegt, möglichst wenige Anpassungen an den in VISSIM voreingestellten Parametern vorzunehmen, sodass lediglich die Einstellungen für das Verhalten an Lichtsignalanlagen verändert wurden.

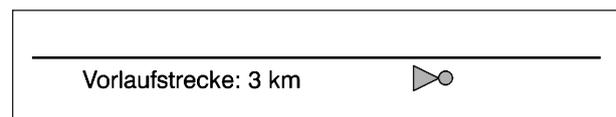


Bild 6-7: Skizze des Modellaufbaus der Laborbeispiele

### 6.2.2 Entwicklung der Laborbeispiele – Ganglinienformen, Signalprogramme und Simulationsvarianten

Die Profile für die Laborbeispiele wurden auf Basis der Ganglinien der Pegelzählstellen in Dresden so gewählt, dass möglichst viele Kombinationen und Variationen von Verläufen der Verkehrsstärke innerhalb einer Stunde abgedeckt werden. Dies bezieht sich sowohl auf die Fälle mit symmetrischen gegenüber asymmetrischen Verläufen (mit ansteigenden oder abfallenden Varianten), als auch auf die Relationen der Belastungen in den vier 15-Minuten-Intervallen einer Stunde zueinander. 15-Minuten-Intervalle sind zwar, im Vergleich zu 1-Minuten- oder 5-Minuten-Intervallen, stark aggregiert und nicht in der Lage, die feineren Nachfrageschwankungen abzubilden, allerdings kann davon ausgegangen werden, dass bei der Kapazitätsuntersuchung eines Knotenpunkts die Nachfragedaten in dieser Form vorliegen. Für die Simulationen hat eine Modellierung der Fahrzeugzuflüsse und eine Definition der Auswertungen auf Basis von 5-Minuten-Intervallen den Vorteil, zwar möglichst detaillierte Ergebnisse zu erhalten, das Auftreten von Unschärfen durch den recht langen Streckenvorlauf zur Lichtsignalanlage jedoch zu vernachlässigen ist. Eine lange Vorlaufstrecke ist hier besonders von Bedeutung. Es ist nicht nur notwendig sicherzustellen, dass die Fahrzeuge mit realistischem Fahrverhalten an der Lichtsignalanlage eintreffen, sondern ebenso, ausreichend Aufstellfläche für die Warteschlange in Intervallen mit sehr hohen Auslastungsgraden zu gewährleisten.

Für jede Simulationsvariante wurde ein Festzeitsignalprogramm gewählt, dessen Freigabezeitanteil mindestens 50 % beträgt. Der mittlere stündliche Zufluss wurde dabei ebenfalls variiert, sodass sich verschiedene effektive Auslastungsgrade ergeben, die sowohl durch den Freigabezeitanteil als auch durch den eigentlichen Zufluss determiniert werden.

Nachfolgend sind die Profile der Laborbeispiele mit ihren Ganglinien und spezifischen Kenngrößen auf-

Variante	Umlaufzeit $t_U$ [s]	Freigabezeit $t_F$ [s]	Zuflussverkehrsstärke $q_{60}$ [Fz/h]	Auslastungsgrad $x$ [-]
I	30	20	1.340	0,91
II	30	20	1.400	0,95
III	60	30	1.000	0,92
IV	60	30	1.100	1,01
V	60	45	1.500	0,93
VI	60	45	1.600	0,99
VII	90	55	1.250	0,96
VIII	90	55	1.300	0,99
IX	120	75	1.250	0,94
X	120	75	1.300	0,98

Tab. 6-2: Simulationsvarianten für die Laborbeispiele

geführt. Dabei ist der konkrete Wert der stündlichen Belastung lediglich als beispielhaft zu betrachten, da die Ganglinien, je nach spezifischer Simulationsvariante (siehe Tabelle 6-2) auf unterschiedlich hohe Stundenverkehrsstärken skaliert wurden.

Anhand der schematischen Darstellung der verschiedenen Ganglinien in Bild 6-8 ist der zeitliche Ablauf der Simulationsexperimente ersichtlich. Die Fahrzeugzuflüsse (es werden ausschließlich Pkw betrachtet) sind in 5-Minuten-Intervallen modelliert, umgeben von ausreichend langem zeitlichen Vor- und Nachlauf. Im Verlauf der Entwicklung der Laborbeispiele wurden auch Varianten mit verschieden starken Verkehrsstärken im Vorlauf der eigentlichen Spitzenstunde getestet. Diese wurden zwar wieder verworfen, der entsprechende zeitliche Vorlauf bleibt aber im Simulationsmodell erhalten. Die Auswertung erfolgt ebenso in 5-Minuten-Intervallen: zuerst teilautomatisiert, zur Bildung der Durchschnittswerte der Simulationsläufe mit verschiedenen Startzufallszahlen, mithilfe der die Simulation steuernden Python-Skripte, anschließend in Excel.

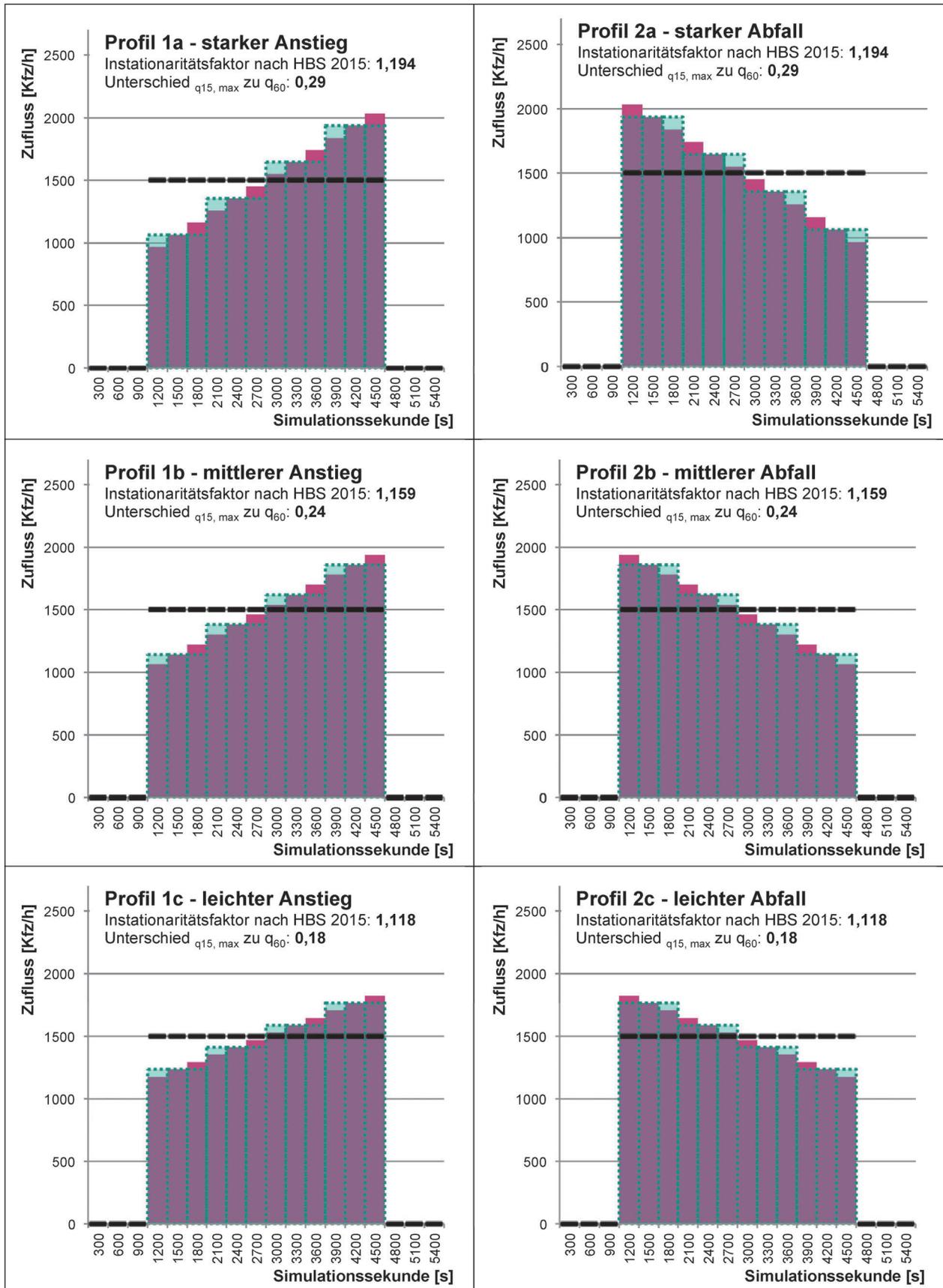


Bild 6-8: Ganglinien für die Laborbeispiele in 5-Minuten-Intervallen (Rot) und 15-Minuten-Intervallen (Grün) mit Darstellung der stündlichen Verkehrsstärke (Schwarz)



Bild 6-8: Fortsetzung

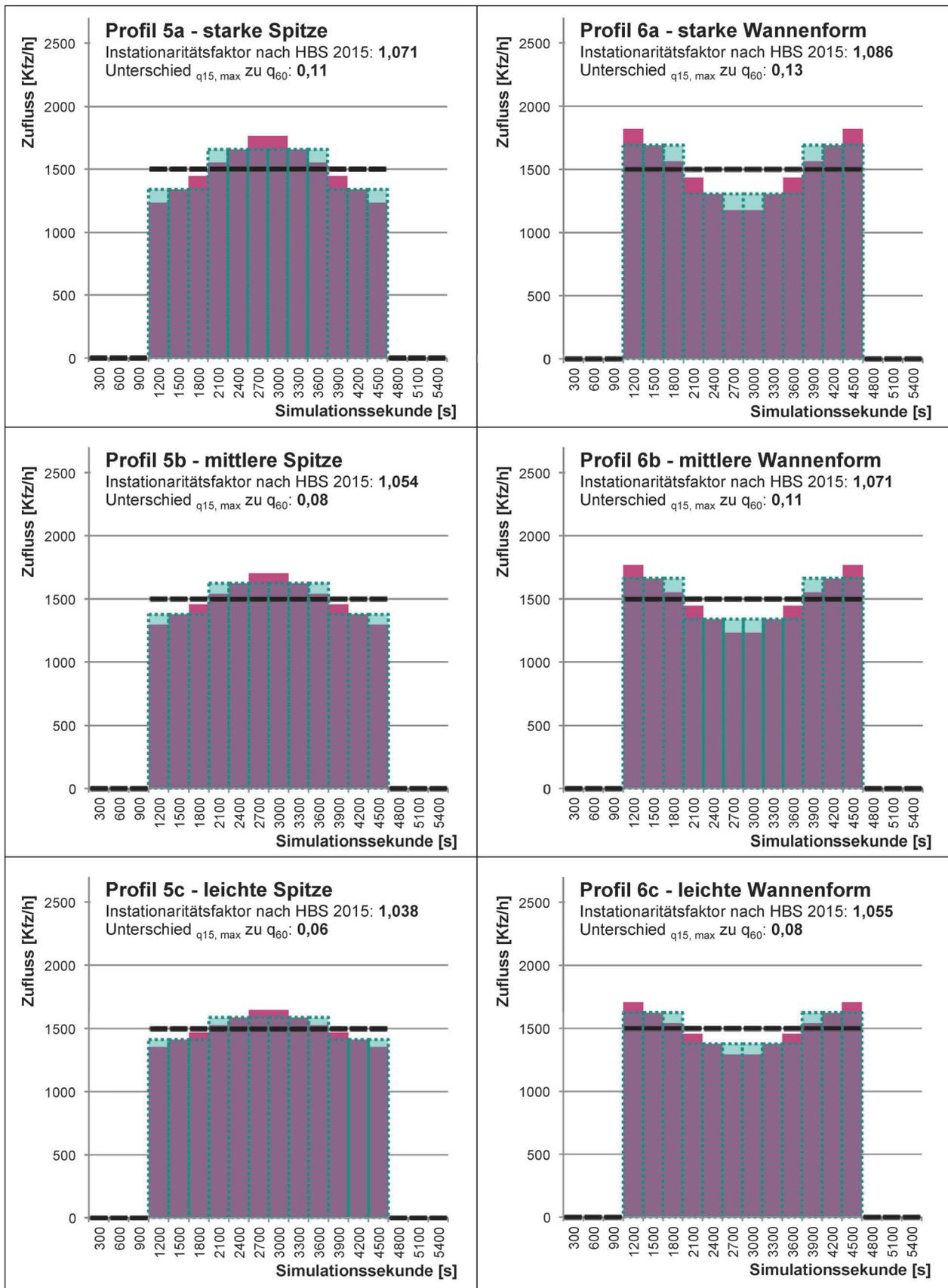


Bild 6-8: Fortsetzung

### 6.2.3 Ergebnisse der Simulationsstudien

Wie zu erwarten war, liefern die Profile der Laborbeispiele in der Simulation sehr unterschiedliche Ergebnisse, sowohl hinsichtlich der absoluten mittleren Verlustzeiten pro Fahrzeug, als auch für die prozentualen Abweichungen zu den nach dem HBS (2015) berechneten Wartezeiten. Einen Überblick dazu zeigt das Diagramm in Bild 6-9. Es stellt die Quadratesumme der mittleren prozentualen Abweichungen der mittleren Verlustzeit pro Kfz über die gesamte simulierte Spitzenstunde im Vergleich zu den nach HBS (2015) berechneten mittleren Wartezeiten pro Kfz dar. Die verschiedenen Ganglinienprofile sind dabei, nach der Höhe ihrer Abweichungen, über alle Signalprogramm-Zufluss-Varianten hinweg, sortiert. Dabei gibt die Höhe der Abweichung keine Auskunft darüber, ob eine Abweichung nach oben oder unten vorliegt.

Das Profil „konstant“ zur Modellierung eines stationären Zuflusses weist erwartungsgemäß die kleinste Abweichung auf. Der Grund, dass es in diesem Fall überhaupt zu einer Abweichung kommt, gibt einen ersten Hinweis darauf, dass nicht allein die

Instationarität des Zuflusses (unabhängig von Form, Verlauf oder Höhe), sondern auch der tatsächliche Auslastungsgrad einen Einfluss auf die Abweichungen haben könnte. Die in der Berechnungsformel für die Warteschlangenlänge nach HBS (2015) unterstellte symmetrische Parabelform der Ganglinie (vgl. Kapitel 2.5.2) zeigt ebenfalls, wenig überraschend, im Vergleich sehr niedrige Werte.

Die stärksten Abweichungen werden eindeutig durch innerhalb der Stunde ansteigende Verkehrsstärken verursacht, wobei das Verhältnis der minimalen zur maximalen Belastung innerhalb der Ganglinie zusätzlichen Einfluss besitzt.

Je mehr sich ein Ganglinienprofil der idealisierten konstanten Belastung oder der Parabelform annähert bzw. je geringer der Unterschied zwischen dem höchstbelasteten 15-Minuten-Intervall und der mittleren Verkehrsstärke innerhalb der Stunde ausfällt, desto niedriger ist auch die Abweichung. Dabei ist innerhalb dieser Sortierung zusätzlich von Bedeutung, ob die erste oder die zweite Hälfte der betrachteten Stunde stärker belastet ist. Bild 6-10 stellt zusätzlich für einige Ganglinien die einzelnen

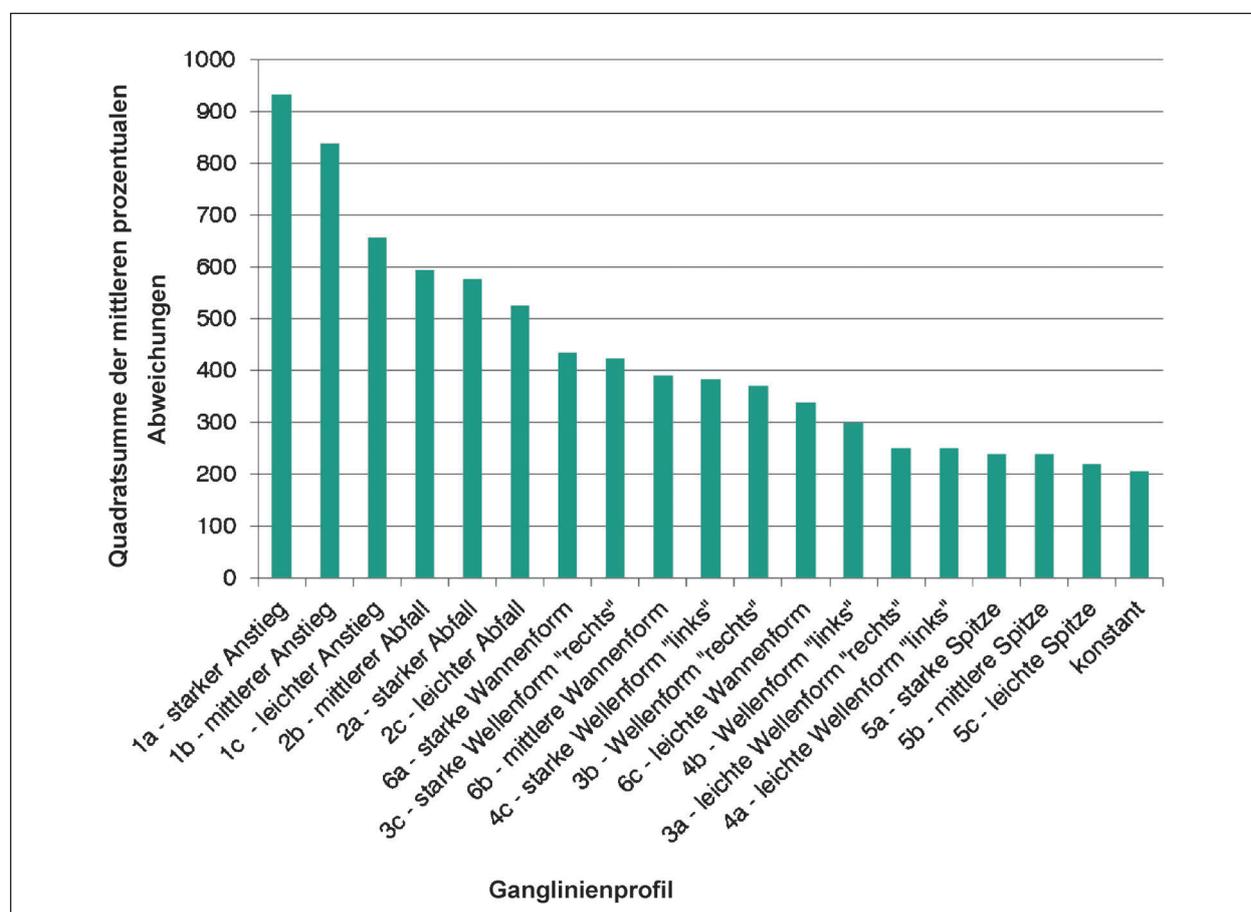


Bild 6-9: Abweichungen der Simulationsergebnisse von den nach HBS (2015) berechneten mittleren Wartezeiten insgesamt

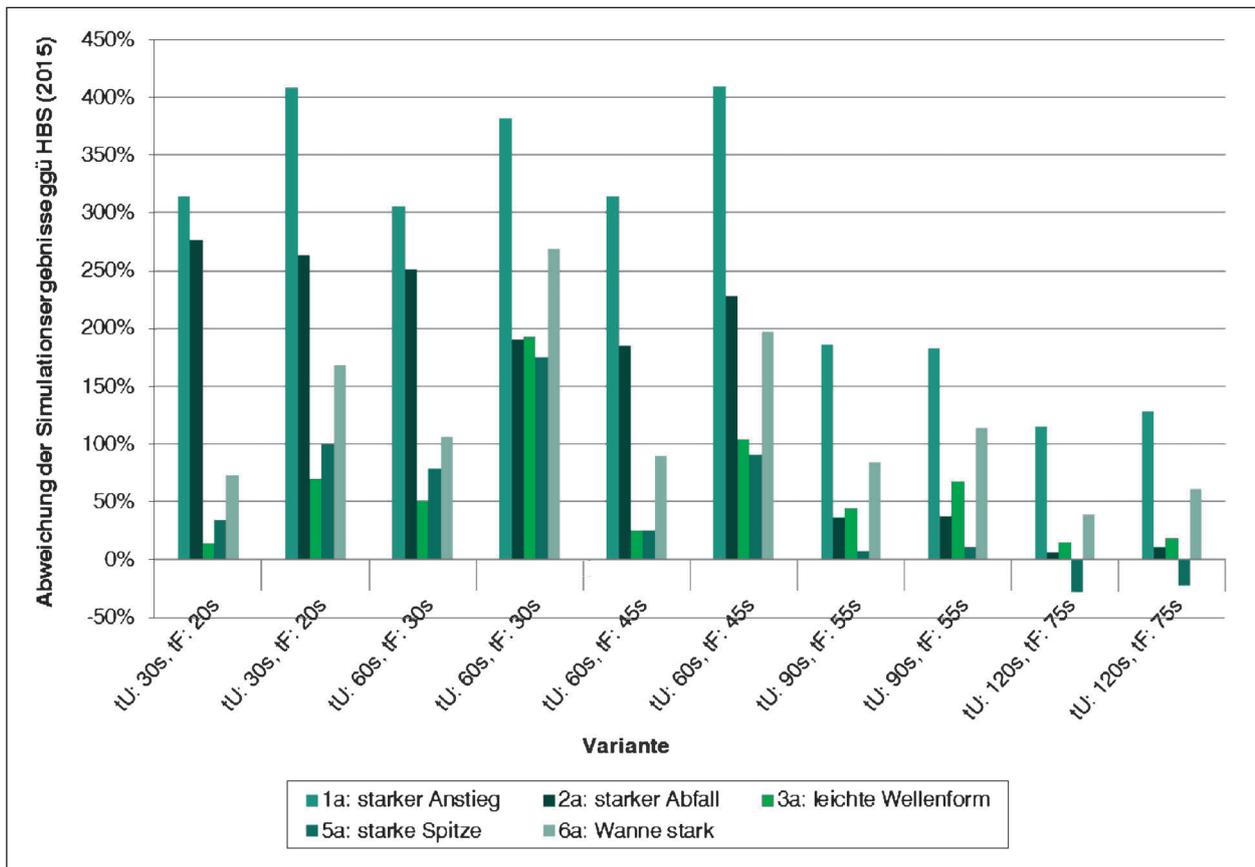


Bild 6-10: Abweichungen der Simulationsergebnisse gegenüber der berechneten Wartezeiten nach HBS (2015) für ausgewählte Beispielganglinien

Abweichungen in Abhängigkeit der Signalprogramm-Zufluss-Variante dar.

Eine genauere Aufschlüsselung aller Ergebnisse findet sich in Tabelle 6-3.

#### 6.2.4 Entwicklung einer Formalisierung zur Berücksichtigung der Instationarität

Aus der Analyse der Abweichungen der Simulationsergebnisse von den nach dem HBS (2015) berechneten Wartezeiten sowie den Unterschieden zueinander ergaben sich Hinweise auf mögliche Einflussfaktoren. Für eine genauere Untersuchung, ob und in welchem Ausmaß eine Auswirkung bestehen könnte, wurden folgende Eigenschaften der Laborbeispielprofile in Betracht gezogen:

- Differenz des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls zur Gesamtverkehrsstärke:  $\frac{q_{15,max} - q_{60}}{q_{60}}$ ,
- Differenz des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls zum niedrigstbelasteten:  $\frac{q_{15,max} - q_{15,min}}{q_{15,min}}$ ,
- Position des höchstbelasteten Viertelstundenintervalls innerhalb der Stunde,

- Lage der halben Stunde mit der höheren Belastung und

- Auslastungsgrad.

Für die Analyse und Identifikation der Einflussfaktoren wurde zunächst für jede Variante und jedes Laborbeispielprofil ein „idealer Instationaritätsfaktor“ bestimmt, für den die Abweichung zwischen den mittleren Verlustzeiten aus der Simulation und den per HBS (2015) unter Verwendung dieses Faktors berechneten Wartezeiten minimal wird.

Dabei wurden zwei Versionen für die Berechnung der mittleren Warteschlangenlänge getestet:

- Verwendung der bestehenden Gleichung des HBS (2015) inkl.  $f_{in,j}$  und 0,58 und
- Verwendung der „Basisformel“ nach AKÇELIK (1980), also der Gleichung des HBS (2015) ohne  $f_{in,j}$  und 0,58.

Unabhängig davon, dass sich eine Minimierung der Abweichungen mittels der Berechnung nach dem HBS (2015) als deutlich schwieriger herausstellte, ist die Korrektheit der Verwendung der ursprüng-

Ganglinienform/Variante	I: $t_{ij}$ : 30s, $t_F$ : 20s, $x = 0,91$	II: $t_{ij}$ : 30s, $t_F$ : 20s, $x = 0,95$	III: $t_{ij}$ : 60s, $t_F$ : 30s, $x = 0,92$	IV: $t_{ij}$ : 60s, $t_F$ : 30s, $x = 1,01$	V: $t_{ij}$ : 60s, $t_F$ : 45s, $x = 0,93$	VI: $t_{ij}$ : 60s, $t_F$ : 45s, $x = 0,99$	VII: $t_{ij}$ : 90s, $t_F$ : 55s, $x = 0,96$	VIII: $t_{ij}$ : 90s, $t_F$ : 55s, $x = 0,99$	IX: $t_{ij}$ : 120s, $t_F$ : 75s, $x = 0,94$	X: $t_{ij}$ : 120s, $t_F$ : 75s, $x = 0,98$
1a – starker Anstieg	314	409	305	382	314	409	185	183	114	129
1b – mittlerer Anstieg	278	367	246	397	258	357	168	170	101	110
1c – leichter Anstieg	148	281	168	364	172	287	141	156	76	90
2a – starker Abfall	276	263	251	190	184	228	36	37	6	11
2b – mittlerer Abfall	251	313	232	244	188	197	51	33	7	4
2c – leichter Abfall	164	262	170	295	145	190	73	53	16	5
3a – leichte Wellenform „rechts“	14	70	51	192	26	104	44	67	15	19
3b – Wellenform „rechts“	53	144	89	252	64	162	66	81	20	33
3c – starke Wellenform „rechts“	58	150	92	272	70	202	80	119	37	61
4a – leichte Wellenform „links“	24	82	58	186	29	107	40	57	-1	0
4b – Wellenform „links“	41	118	72	206	42	137	46	59	20	6
4c – starke Wellenform „links“	65	138	88	246	70	184	76	99	26	39
5a – starke Spitze	34	99	78	175	25	90	8	11	-27	-23
5b – mittlere Spitze	19	101	68	189	32	64	15	15	-23	-25
5c – leichte Spitze	11	73	52	183	20	70	22	22	-16	-22
6a – starke Wannenform	73	168	105	269	89	197	83	114	38	61
6b – mittlere Wannenform	55	147	86	248	65	179	75	112	36	58
6c – leichte Wannenform	34	114	67	223	48	163	66	97	28	51
konstanter Zufluss	-9	30	28	176	1	79	26	50	0	-1
<b>Quadratsumme über alle Ganglinienformen einer Variante</b>	<b>38,76</b>	<b>79,34</b>	<b>40,00</b>	<b>124,43</b>	<b>31,85</b>	<b>76,57</b>	<b>13,23</b>	<b>17,18</b>	<b>3,71</b>	<b>5,50</b>

Tab. 6-3: Prozentuale Abweichungen der mittleren Wartezeiten in [s/Fz], berechnet nach HBS (2015) in Relation zu den in der Simulation gemessenen Verlustzeiten für die Laborbeispiele

lichen Formel offensichtlich. Wie in Kapitel 2.4.3 aufgezeigt wurde, unterscheiden sich die beiden Formulierungen lediglich durch den nahezu undokumentierten Faktor 0,58. Dieser lässt sich allein durch die Unterstellung einer parabelförmigen, symmetrischen Spitzenstundenganglinie erklären. Eine Identifikation charakteristischer Einflussfaktoren der verschiedenen Instationaritätsverläufe auf Basis dieser Gleichung wäre also ein Widerspruch in sich und kann daher allein auf der „Basisformel“ nach AKÇELIK (1980) ohne diese Annahme erfolgen.

Auf der Grundlage dieses „idealen Instationaritätsfaktors“ wurden verschiedene Kombinationen der potenziellen Einflussgrößen in unterschiedlicher Form getestet und untersucht. Als mögliche Varian-

ten, wie diese als Variablen in eine neue Formulierung eingehen könnten, wurden in erster Linie ein additiver sowie ein multiplikativer Einfluss analysiert. Die Möglichkeit einer Formulierung als Exponent(en) wurde aufgrund der Komplexität nur am Rande betrachtet.

Für jede der in Frage kommenden Kombinationen erfolgte die Ermittlung von Faktoren bzw. Parametern über eine Minimierung der Quadratsumme der Abweichungen zwischen dem „idealen Instationaritätsfaktor“ und dem Wert, der durch die variablen Faktoren/Parameter bestimmt wird.

$$\min \sum_i \left( \frac{f_{IN,neu,i} - f_{IN,ideal,i}}{f_{IN,ideal,i}} \right)^2 \quad (\text{Gl. 6-1})$$

mit

$f_{IN,neu,i}$  zu prüfender, nach neuer Vorschrift berechneter, Instationaritätsfaktor

$f_{IN,ideal,i}$  „idealer“ Instationaritätsfaktor

Tabelle 6-4 zeigt die dabei berechneten Faktoren für die relevanten Einflussgrößen, die Quadratsumme aller berücksichtigter Abweichungen sowie die maximalen prozentualen Abweichungen einzelner Elemente für die vier Kombinationen mit den niedrigsten Abweichungen. Klar ersichtlich ist hierbei die Relevanz der Ganglinieneigenschaft, um wieviel sich das höchstbelastete 15-Minuten-Intervall von der mittleren stündlichen Verkehrsstärke unterscheidet. Dieser Wert ist als alleinige Charakteristik der Ganglinie im Instationaritätsfaktor des HBS (2015) enthalten. Wird diese Eigenschaft einbezogen, verliert die zweite Kenngröße für die Amplitude der Ganglinie zwischen höchst- und niedrigstbelastetem 15-Minuten-Intervall soweit an Relevanz, dass keine der Kombinationen unter den am besten abschneidenden enthalten ist bzw. der entsprechende Faktor für die Variante mit allen vier Kenngrößen sogar einen negativen Wert annimmt. Von den anfangs aufgezählten möglichen Charakteristika erwiesen sich diejenigen für die Kennzeichnung der stärker belasteten Hälfte und der Auslastungsgrad als relevant. Somit ergibt sich die Grundform des neuen Instationaritätsfaktors in Gleichung 6-2.

Tabelle 6-7 am Schluss des Kapitels zeigt eine Zusammenfassung aller relevanten Ergebnisse der Laborbeispiele.

$$f_{IN,neu} = 1 + f_{q60} \cdot \left( \frac{q_{15,max} - q_{60}}{q_{60}} \right) + f_{qmin} \cdot \left( \frac{q_{15,max} - q_{15,min}}{q_{15,min}} \right) + f_{q\frac{1}{2}} \cdot n_{q\frac{1}{2}} + f_x \cdot x \quad (Gl. 6-2)$$

mit

$f_{IN,neu}$  Instationaritätsfaktor, neu

$f_{q60}$  Faktor für das Verhältnis des höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalls zum 60-Minuten-Intervall

$q_{15,max}$  Verkehrsstärke im höchstbelasteten 15-Minuten-Intervall innerhalb der Spitzenstunde [Kfz/h]

$q_{60}$  Verkehrsstärke im 60-Minuten-Intervall (Spitzenstunde) [Kfz/h]

$f_{qmin}$  Faktor für das Verhältnis des höchstbelasteten zum niedrigstbelasteten 15-Minuten-Intervall

$q_{15,min}$  Verkehrsstärke im niedrigstbelasteten 15-Minuten-Intervall innerhalb der Spitzenstunde [Kfz/h]

$f_{q\frac{1}{2}}$  Faktor für die Lage des stärker belasteten 30-Minuten-Intervalls

$n_{q\frac{1}{2}}$  Parameter für die Lage des stärker belasteten 30-Minuten-Intervalls, wobei  $n_{q\frac{1}{2}} = 1$ , wenn  $q_{30,1} > q_{30,2}$  (erste Hälfte der Spitzenstunde ist die höher belastete),  $n_{q\frac{1}{2}} = 2$  für  $q_{30,1} < q_{30,2}$  sowie  $n_{q\frac{1}{2}} = 1,5$  für den symmetrischen und  $n_{q\frac{1}{2}} = 0$  für den stationären Fall

$f_x$  Faktor für den Auslastungsgrad x

**6.2.5 Validierung bzw. Identifikation der besten Variante mithilfe der Realdaten**

Um aus der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Auswahl möglicher Kombinationen von Einflussgrößen die ideale Variante zu identifizieren, wurden diese auf die Spitzenstundenganglinien der Dresdener Pegelzählstellendaten angewendet. Da-

Kombination	Faktor für $\frac{q_{15,max} - q_{60}}{q_{60}}$	Faktor für $\frac{q_{15,max} - q_{15,min}}{q_{15,min}}$	Faktor für $q_{max,1/2}$	Faktor für den Auslastungsgrad	Quadratsumme der Abweichungen	maximale Abweichungen
„Add 4“	0,5174429	-0,0921484	-0,0090817	-0,0299581	0,261	8 %/-9 %
„Add 3-3“	0,2522735	-	-0,0076992	-0,0273701	0,261 (0,267*)	8 %/-9 % (8 %/-10 %)*
„Add 2-1“	0,2181681	-	-0,0210034	-	0,273	11 %/-9 %
„Add 2-2“	0,2383935	-	-	-0,0369617	0,264 (0,265*)	9 %/-9 % (8 %/-9 %)*

\* für die Variante mit auf 2 Nachkommastellen gerundeten Werten ergeben sich etwas veränderte Zahlen

Tab. 6-4: Kenngrößen der 4 Kombinationen (additive Variante) mit den niedrigsten Abweichungen

für wurden Simulationen mit diesen statt der Laborbeispiel-Ganglinien, aber denselben Signalprogramm-Zufluss-Varianten, durchgeführt und auf dieselbe Art ausgewertet. Um diesem Aufbau zu entsprechen und eine Vergleichbarkeit der Realbeispiele untereinander zu gewährleisten, wurden alle Ganglinien auf die passenden Gesamtverkehrsstärken pro Stunde skaliert.

Die Ergebnisse in Form der Abweichungen als Quadratesumme der Mittelwerte pro Variante über alle Ganglinien sind in Tabelle 6-5 dargestellt. Die obere Hälfte zeigt dabei die Kombinationen, aus deren Menge die Parameter für den neuen Faktor zur Berücksichtigung der Instationarität gewählt werden, im unteren Teil der Tabelle finden sich die Ergebnisse desselben Berechnungsverfahrens mit leicht abgeänderter Datenbasis als eine stark vereinfachte Form der Sensitivitätsbetrachtung. Der jeweils minimale Wert pro Signalprogramm-Zufluss-Variante ist dabei markiert, bei den Summen die kleinsten drei. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Kombination „Add 3-3“, welche die Parameter  $f_{q60}$ ,  $f_{q\frac{1}{2}}$  und  $f_{xi}$  beinhaltet, sowohl in der Version mit zwei als auch mit drei Nachkommastellen unter den kleinsten Gesamtsummen vorkommt. Dies spricht für eine Stabilität dieser Kombination. Zusätzlich zeigt dieser Fall die mit Abstand geringsten Abweichungen für die Variante mit einem Auslastungsgrad von  $x > 1$ . Somit ist die Auswahl der Kombination „Add 3-3“ für die Neufassung des Instationaritätsfaktors eindeutig und einzig die Wahl der Anzahl der Nachkommastellen für die einzelnen Parameter bleibt als Freiheitsgrad bestehen. Hierbei wird aus Gründen der Praktikabilität die Variante mit zwei Nachkommastellen bevorzugt. Die Gesamt-Quadratesumme der Abweichungen der so berechneten Wartezeiten gegenüber der Verlustzeiten aus der Simulation beträgt dabei 40,64 und ist um 90 % geringer als diejenige zwischen den Wartezeiten nach der bisherigen Berechnung laut HBS (2015) und den Verlustzeiten aus der Simulation.

Damit ergibt sich der aktualisierte Faktor zur Berücksichtigung instationärer Zuflussganglinien an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage (siehe Gleichung 6-4) zur Verwendung in der Formel zur Berechnung der Warteschlangenlänge (siehe Gleichung 6-3).

$$N_{GE,j} = \frac{T \cdot C_{0,i,j}}{4} \cdot \left[ (f_{IN,neu,j} \cdot x_j - 1) + \sqrt{(f_{IN,neu,j} \cdot x_j - 1)^2 + \frac{4 \cdot f_{IN,neu,j} \cdot x_j}{T \cdot C_{0,i,j}}} \right] \quad (\text{Gl. 6-3})$$

mit

$f_{IN,neu}$	Instationaritätsfaktor, neu
$N_{GE,j}$	mittl. Rückstau bei Freigabezeitende für den Betrachtungszeitraum auf FS j [Kfz]
T	Betrachtungszeitraum (i. d. R. T = 1 h) [h]
$C_{0,i,j}$	Kapazität des Stroms i auf FS j [Kfz/h]
$f_{in,j}$	Instationaritätsfaktor für den FS j [-]
$x_j$	Auslastungsgrad des FS j [-]

$$f_{IN,neu,j} = 1 + 0,25 \cdot \left( \frac{q_{15,max,j} - q_{60,j}}{q_{60,j}} \right) - 0,01 \cdot n_{q\frac{1}{2},j} - 0,03 \cdot x_j \quad (\text{Gl. 6-4})$$

mit

$f_{IN,neu}$	Instationaritätsfaktor, neu
$q_{15,max}$	Verkehrsstärke im höchstbelasteten 15-Minuten-Intervall innerhalb der Spitzenstunde [Kfz/h]
$q_{60}$	Verkehrsstärke im 60-Minuten-Intervall (Spitzenstunde) [Kfz/h]
$q_{15,min}$	Verkehrsstärke im niedrigstbelasteten 15-Minuten-Intervall innerhalb der Spitzenstunde [Kfz/h]
$n_{q\frac{1}{2}}$	Parameter für die Lage des stärker belasteten 30-Minuten-Intervalls, wobei $n_{q\frac{1}{2}} = 1$ , wenn $q_{30,1} > q_{30,2}$ (erste Hälfte der Spitzenstunde ist die höher belastete), $n_{q\frac{1}{2}} = 2$ für $q_{30,1} < q_{30,2}$ sowie $n_{q\frac{1}{2}} = 1,5$ für den symmetrischen und $n_{q\frac{1}{2}} = 0$ für den stationären Fall
$f_x$	Faktor für den Auslastungsgrad x

Die mithilfe des neuen Faktors berechneten mittleren Wartezeiten weisen erwartungsgemäß eine deutlich geringere Abweichung zu den Verlustzeiten aus der Simulation auf, unterscheiden sich aber ebenso von den jeweils „idealen Instationaritätsfaktoren“. Für eine Auswahl der Beispielganglinien sind diese prozentualen Abweichungen in Bild 6-11 aufgetragen. Eine genauere Aufschlüsselung der Abweichungen pro Signalprogramm-Zufluss-Variante liefert Tabelle 6-6.

	I: t <sub>U</sub> : 30s, t <sub>F</sub> : 20s	II: t <sub>U</sub> : 30s, t <sub>F</sub> : 20s	III: t <sub>U</sub> : 60s, t <sub>F</sub> : 30s	IV: t <sub>U</sub> : 60s, t <sub>F</sub> : 30s	V: t <sub>U</sub> : 60s, t <sub>F</sub> : 45s	VI: t <sub>U</sub> : 60s, t <sub>F</sub> : 45s	VII: t <sub>U</sub> : 90s, t <sub>F</sub> : 55s	VIII: t <sub>U</sub> : 90s, t <sub>F</sub> : 55s	IX: t <sub>U</sub> : 120s, t <sub>F</sub> : 75s	X: t <sub>U</sub> : 120s, t <sub>F</sub> : 75s	Summe
<b>Auslastungsgrad</b>	<b>0,91</b>	<b>0,95</b>	<b>0,92</b>	<b>1,01</b>	<b>0,93</b>	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	<b>0,99</b>	<b>0,94</b>	<b>0,98</b>	
Abweichung Simulation – „alte“ HBS-Berechnung	18,74	64,22	26,77	161,20	19,31	77,17	14,11	22,87	3,81	5,72	413,93
„Add 4“, 2 NKS	2,96	0,36	29,40	3,50	3,82	0,36	1,69	1,93	3,72	4,29	52,94
„Add 4“, 3 NKS	2,89	0,37	30,37	3,42	3,87	0,37	1,64	1,90	3,67	4,21	53,56
„Add 3-3“, 2 NKS	3,50	1,13	0,14	17,80	4,12	1,21	2,04	1,55	4,19	4,95	40,64
„Add 3-3“, 3 NKS	2,94	0,72	0,21	25,60	3,48	1,55	1,60	1,21	3,76	4,21	45,28
„Add 2-1“, 2 NKS	2,74	0,72	0,36	35,74	3,20	2,71	1,41	1,31	3,54	3,68	55,40
„Add 2-1“, 3 NKS	2,90	0,79	0,32	32,89	3,38	2,39	1,53	1,33	3,67	3,89	53,08
„Add 2-2“, 2 NKS	2,97	0,76	0,20	23,00	3,55	1,39	1,68	1,29	3,83	4,38	43,05
„Add 2-2“, 3 NKS	2,74	0,62	0,25	26,91	3,28	1,65	1,50	1,19	3,64	4,06	45,84
„Add 3-3“, 2 NKS *	2,57	0,59	0,32	33,37	3,05	2,45	1,31	1,17	3,45	3,67	51,95
„Add 3-3“, 3 NKS *	2,54	0,57	0,32	33,48	3,02	2,41	1,30	1,16	3,44	3,65	51,89

\* zusätzliche Ergebnisse bei Ermittlung der potenziellen Parameter des Instationaritätsfaktors auf erweiterter Datenbasis

Tab. 6-5: Quadratesummen über die mittleren Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den nach der entsprechenden, zu prüfenden Kombination berechneten Wartezeiten für die verschiedenen Signalprogramm-Zufluss-Varianten

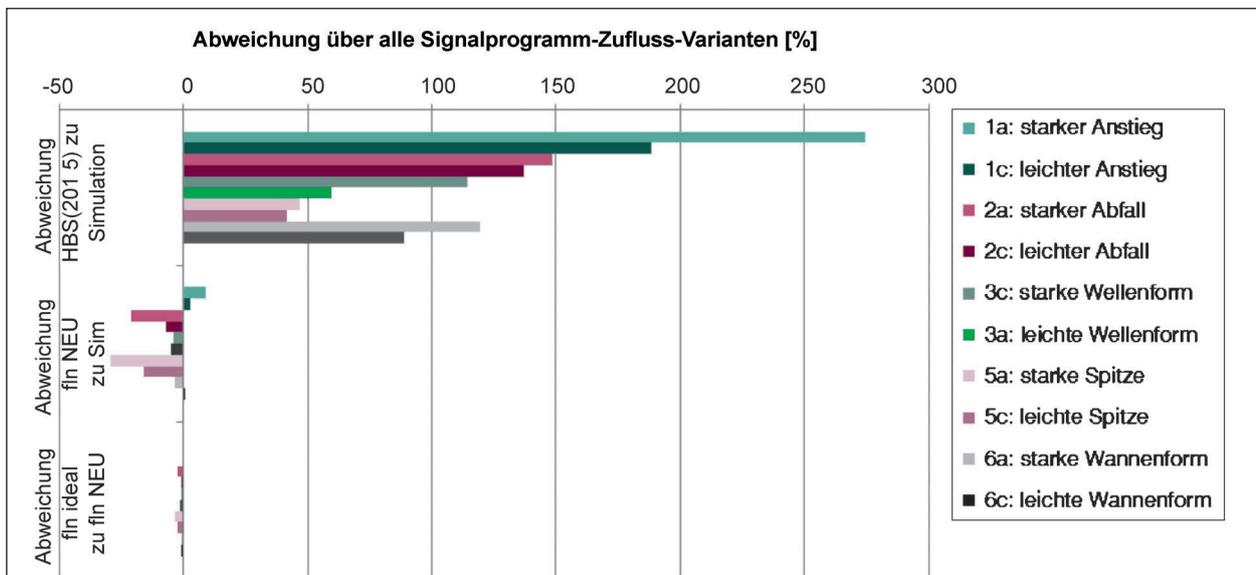


Bild 6-11: Abweichungen der Instationaritätsfaktoren nach Ganglinie

Variante	x	Daten	Abweichung HBS-Simulation [%]		Abweichungen neue Berechnung – Simulation [%]	
			Mittelwert	Spannweite Abweichungen	Mittelwert	Spannweite Abweichungen
I: t <sub>U</sub> : 30s, t <sub>F</sub> : 20s	0,91	Labor	100	-9/314	-24	-33/-13
		Real	44	-4/268	-32	-43/-20
II: t <sub>U</sub> : 30s, t <sub>F</sub> : 20s	0,95	Labor	175	30/409	-6	-24/8
		Real	113	35/390	-15	-32/8
III: t <sub>U</sub> : 60s, t <sub>F</sub> : 30s	0,92	Labor	121	28/305	9	4/16
		Real	74	22/253	1	-16/13
IV: t <sub>U</sub> : 60s, t <sub>F</sub> : 30s	1,01	Labor	247	175/397	84	47/126
		Real	209	134/428	68	32/141
V: t <sub>U</sub> : 60s, t <sub>F</sub> : 45s	0,93	Labor	97	1/314	-28	-44/-18
		Real	47	-2/268	-34	-50/-21
VI: t <sub>U</sub> : 60s, t <sub>F</sub> : 45s	0,99	Labor	179	64/409	9	-31/69
		Real	134	54/396	-5	-34/58
VII: t <sub>U</sub> : 90s, t <sub>F</sub> : 55s	0,96	Labor	69	8/185	-22	-56/2
		Real	51	2/206	-22	-41/-5
VIII: t <sub>U</sub> : 90s, t <sub>F</sub> : 55s	0,99	Labor	81	11/183	-14	-47/9
		Real	70	17/232	-15	-42/27
IX: t <sub>U</sub> : 120s, t <sub>F</sub> : 75s	0,94	Labor	24	-27/114	-36	-67/-17
		Real	13	-20/140	-34	-53/-16
X: t <sub>U</sub> : 120s, t <sub>F</sub> : 75s	0,98	Labor	32	-25/129	-37	-61/-17
		Real	22	-17/158	-36	-56/-9

Tab. 6-6: Abweichungen der nach HBS (2015) mit dem Instationsritätsfaktor nach HBS (2015) bzw. dem neu ermittelten Instationsritätsfaktor berechneten mittleren Wartezeiten gegenüber den per Simulation ermittelten in Prozent

Variante	Auslastungs-grad x	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS [s/Kfz]	Abweichung HBS gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS NEU [s/Kfz]	Abweichung HBS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
<b>Profil 1a – starker Anstieg</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	25,08	103,75	314 %	1,041	1,025	18,29	-27 %	-1,53 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	30,72	156,32	409 %	1,009	1,024	33,21	8 %	1,54 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	33,01	133,67	305 %	1,012	1,025	36,38	10 %	1,33 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	50,41	242,96	382 %	0,961	1,022	111,90	122 %	6,35 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	32,10	132,86	314 %	1,045	1,025	24,79	-23 %	-1,92 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	40,88	208,07	409 %	0,993	1,023	69,21	69 %	3,05 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	61,09	174,26	185 %	1,046	1,024	50,03	-18 %	-2,14 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	78,14	220,93	183 %	1,021	1,023	85,27	9 %	0,14 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	73,92	158,48	114 %	1,079	1,024	45,31	-39 %	-5,06 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	89,29	204,14	129 %	1,050	1,023	70,70	-21 %	-2,53 %
<b>Mittelwert</b>		<b>51,46</b>	<b>173,54</b>	<b>274 %</b>			<b>54,51</b>	<b>9,12 %</b>	<b>-0,08 %</b>
<b>Profil 1b – mittlerer Anstieg</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	20,12	76,05	278 %	1,013	1,012	16,38	-19 %	-0,04 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	26,67	124,44	367 %	0,995	1,011	27,60	3 %	1,62 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	30,32	105,05	246 %	0,998	1,012	33,17	9 %	1,46 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	41,86	208,05	397 %	0,944	1,009	94,78	126 %	6,98 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	28,62	102,37	258 %	1,036	1,012	21,64	-24 %	-2,37 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	38,04	173,70	357 %	0,988	1,010	55,20	45 %	2,21 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	53,12	142,30	168 %	1,036	1,011	43,52	-18 %	-2,47 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	69,21	186,75	170 %	1,013	1,010	71,21	3 %	-0,33 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	63,64	127,71	101 %	1,069	1,012	41,02	-36 %	-5,36 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	81,27	170,87	110 %	1,043	1,010	60,33	-26 %	-3,16 %
<b>Mittelwert</b>		<b>45,29</b>	<b>141,73</b>	<b>245 %</b>			<b>46,49</b>	<b>6,49 %</b>	<b>-0,15 %</b>
<b>Profil 1c – leichter Anstieg</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	19,18	47,58	148 %	1,005	0,997	14,57	-24 %	-0,84 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	22,98	87,60	281 %	0,978	0,996	22,71	-1 %	1,77 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	27,63	74,15	168 %	0,980	0,997	30,14	9 %	1,73 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	35,88	166,38	364 %	0,925	0,994	76,67	114 %	7,39 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	25,10	68,25	172 %	1,026	0,996	18,82	-25 %	-2,88 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	34,30	132,74	287 %	0,982	0,994	42,03	23 %	1,30 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	43,77	105,28	141 %	1,022	0,995	37,76	-14 %	-2,63 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	57,13	146,10	156 %	1,001	0,994	57,61	1 %	-0,63 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	52,85	92,91	76 %	1,056	0,996	37,15	-30 %	-5,69 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	69,24	131,65	90 %	1,033	0,995	50,96	-26 %	-3,67 %
<b>Mittelwert</b>		<b>38,81</b>	<b>105,26</b>	<b>188 %</b>			<b>38,84</b>	<b>2,61 %</b>	<b>-0,41 %</b>

Tab. 6-7: Kenngrößen und Ergebnisse für alle Laborbeispiele, sortiert nach Beispielganglinien

Variante	Auslastungs-grad x	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS [s/Kfz]	Abweichung HBS gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS NEU [s/Kfz]	Abweichung HBS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
<b>Profil 2a – starker Abfall</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	27,57	103,75	276 %	1,051	1,035	20,12	-27 %	-1,50 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	43,04	156,32	263 %	1,034	1,034	38,91	-10 %	0,00 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	38,08	133,67	251 %	1,031	1,035	39,47	4 %	0,42 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	83,79	242,96	190 %	1,000	1,032	126,30	51 %	3,21 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	46,71	132,86	184 %	1,069	1,035	27,97	-40 %	-3,18 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	63,49	208,07	228 %	1,018	1,033	81,84	29 %	1,48 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	128,01	174,26	36 %	1,101	1,034	56,50	-56 %	-6,07 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	160,95	220,93	37 %	1,079	1,033	97,78	-39 %	-4,26 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	149,74	158,48	6 %	1,136	1,034	49,61	-67 %	-8,92 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	184,74	204,14	11 %	1,113	1,033	80,53	-56 %	-7,21 %
<b>Mittelwert</b>		<b>92,61</b>	<b>173,54</b>	<b>148 %</b>			<b>61,90</b>	<b>-21,18 %</b>	<b>-2,60 %</b>
<b>Profil 2b – mittlerer Abfall</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	21,68	76,05	251 %	1,024	1,022	17,82	-18 %	-0,11 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	30,11	124,44	313 %	1,007	1,021	31,82	6 %	1,43 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	31,64	105,05	232 %	1,005	1,022	35,60	13 %	1,73 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	60,48	208,05	244 %	0,976	1,019	107,96	78 %	4,44 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	35,54	102,37	188 %	1,052	1,022	24,01	-32 %	-2,84 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	58,57	173,70	197 %	1,013	1,020	65,88	12 %	0,67 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	94,06	142,30	51 %	1,076	1,021	48,42	-49 %	-5,12 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	140,33	186,75	33 %	1,066	1,020	81,95	-42 %	-4,30 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	119,13	127,71	7 %	1,115	1,022	44,25	-63 %	-8,36 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	164,90	170,87	4 %	1,101	1,020	68,18	-59 %	-7,34 %
<b>Mittelwert</b>		<b>75,64</b>	<b>141,73</b>	<b>152 %</b>			<b>52,59</b>	<b>-15,27 %</b>	<b>-1,98 %</b>
<b>Profil 2c – leichter Abfall</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	18,04	47,58	164 %	0,995	1,007	15,68	-13 %	1,23 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	24,19	87,60	262 %	0,984	1,006	25,63	6 %	2,15 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	27,47	74,15	170 %	0,978	1,007	31,98	16 %	2,87 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	42,14	166,38	295 %	0,944	1,004	87,89	109 %	6,31 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	27,90	68,25	145 %	1,034	1,006	20,52	-26 %	-2,73 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	45,82	132,74	190 %	0,999	1,004	49,97	9 %	0,51 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	60,76	105,28	73 %	1,046	1,005	41,22	-32 %	-3,87 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	95,64	146,10	53 %	1,035	1,004	65,87	-31 %	-2,98 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	80,07	92,91	16 %	1,084	1,006	39,48	-51 %	-7,24 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	125,36	131,65	5 %	1,076	1,005	56,58	-55 %	-6,59 %
<b>Mittelwert</b>		<b>54,74</b>	<b>105,26</b>	<b>137 %</b>			<b>43,48</b>	<b>-6,84 %</b>	<b>-1,04 %</b>

Tab. 6-7: Fortsetzung

Variante	Auslastungs-grad x	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS [s/Kfz]	Abweichung HBS gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS NEU [s/Kfz]	Abweichung HBS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
<b>Profil 3a – leichte Wellenform</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	16,26	18,51	14 %	0,973	0,965	11,99	-26 %	-0,87 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	18,86	31,97	70 %	0,948	0,964	16,65	-12 %	1,63 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	23,85	36,01	51 %	0,942	0,965	25,89	9 %	2,40 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	30,21	88,23	192 %	0,899	0,962	50,78	68 %	7,06 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	19,82	24,88	26 %	1,002	0,964	15,12	-24 %	-3,78 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	28,35	57,88	104 %	0,968	0,963	26,51	-6 %	-0,55 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	33,17	47,81	44 %	0,998	0,963	30,57	-8 %	-3,42 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	43,29	72,26	67 %	0,981	0,963	40,57	-6 %	-1,86 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	38,83	44,69	15 %	1,033	0,964	32,11	-17 %	-6,64 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	54,15	64,22	19 %	1,016	0,963	39,64	-27 %	-5,25 %
<b>Mittelwert</b>		<b>30,68</b>	<b>48,65</b>	<b>60 %</b>			<b>28,98</b>	<b>-4,97 %</b>	<b>-1,13 %</b>
<b>Profil 3b – Wellenform</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	16,89	25,78	53 %	0,982	0,978	12,88	-24 %	-0,41 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	20,20	49,31	144 %	0,960	0,977	18,62	-8 %	1,73 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	24,78	46,76	89 %	0,953	0,977	27,35	10 %	2,54 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	33,46	117,65	252 %	0,916	0,975	59,34	77 %	6,46 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	22,42	36,69	64 %	1,015	0,977	16,36	-27 %	-3,76 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	32,62	85,31	162 %	0,978	0,975	31,25	-4 %	-0,30 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	39,83	66,28	66 %	1,015	0,976	32,91	-17 %	-3,78 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	54,81	99,29	81 %	0,998	0,975	45,93	-16 %	-2,27 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	48,98	58,90	20 %	1,051	0,977	33,79	-31 %	-7,03 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	65,98	87,78	33 %	1,029	0,976	43,21	-35 %	-5,23 %
<b>Mittelwert</b>		<b>36,00</b>	<b>67,37</b>	<b>96 %</b>			<b>32,16</b>	<b>-7,42 %</b>	<b>-1,20 %</b>
<b>Profil 3c – starke Wellenform</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	17,76	28,01	58 %	0,992	0,980	13,10	-26 %	-1,13 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	21,63	54,11	150 %	0,970	0,979	19,12	-12 %	0,95 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	26,03	49,86	92 %	0,966	0,980	27,70	6 %	1,47 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	33,43	124,48	272 %	0,915	0,977	61,52	84 %	6,78 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	23,62	40,25	70 %	1,020	0,980	16,67	-29 %	-3,96 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	30,44	91,88	202 %	0,973	0,978	32,51	7 %	0,49 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	39,48	71,25	80 %	1,014	0,979	33,50	-15 %	-3,43 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	48,39	105,76	119 %	0,989	0,978	47,33	-2 %	-1,12 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	45,89	62,96	37 %	1,046	0,980	34,21	-25 %	-6,34 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	58,10	93,68	61 %	1,021	0,978	44,14	-24 %	-4,17 %
<b>Mittelwert</b>		<b>34,48</b>	<b>72,22</b>	<b>114 %</b>			<b>32,98</b>	<b>-3,69 %</b>	<b>-1,05 %</b>

Tab. 6-7: Fortsetzung

Variante	Auslastungs-grad x	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS [s/Kfz]	Abweichung HBS gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS NEU [s/Kfz]	Abweichung HBS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
<b>Profil 4a – leichte Wellenform</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	16,36	20,28	24 %	0,975	0,979	12,97	-21 %	0,39 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	20,02	36,38	82 %	0,958	0,978	18,82	-6 %	2,01 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	24,55	38,71	58 %	0,951	0,979	27,49	12 %	2,91 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	33,87	96,73	186 %	0,917	0,976	60,21	78 %	6,37 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	21,45	27,74	29 %	1,011	0,978	16,48	-23 %	-3,23 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	31,75	65,60	107 %	0,976	0,976	31,75	0 %	0,01 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	37,53	52,61	40 %	1,009	0,977	33,14	-12 %	-3,18 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	50,76	79,88	57 %	0,993	0,976	46,49	-8 %	-1,63 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	48,63	48,25	-1 %	1,050	0,978	33,96	-30 %	-6,88 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	70,66	70,64	0 %	1,034	0,977	43,58	-38 %	-5,53 %
<b>Mittelwert</b>		<b>35,56</b>	<b>53,68</b>	<b>58 %</b>			<b>32,49</b>	<b>-4,87 %</b>	<b>-0,88 %</b>
<b>Profil 4b – Wellenform</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	17,51	24,64	41 %	0,989	0,986	13,57	-22 %	-0,28 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	21,41	46,76	118 %	0,969	0,985	20,22	-6 %	1,68 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	26,31	45,14	72 %	0,969	0,986	28,48	8 %	1,79 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	37,20	113,86	206 %	0,930	0,983	66,31	78 %	5,71 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	24,56	34,85	42 %	1,024	0,986	17,34	-29 %	-3,74 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	34,40	81,69	137 %	0,982	0,984	35,37	3 %	0,20 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	43,46	63,62	46 %	1,022	0,985	34,81	-20 %	-3,62 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	60,07	95,73	59 %	1,004	0,984	50,47	-16 %	-2,03 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	57,70	56,76	-2 %	1,062	0,985	35,13	-39 %	-7,24 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	80,04	84,56	6 %	1,042	0,984	46,21	-42 %	-5,59 %
<b>Mittelwert</b>		<b>40,27</b>	<b>64,76</b>	<b>73 %</b>			<b>34,79</b>	<b>-8,54 %</b>	<b>-1,31 %</b>
<b>Profil 4c – starke Wellenform</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	17,02	28,01	65 %	0,983	0,990	13,96	-18 %	0,74 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	22,74	54,11	138 %	0,977	0,989	21,16	-7 %	1,28 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	26,50	49,86	88 %	0,970	0,990	29,12	10 %	2,05 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	36,02	124,48	246 %	0,926	0,987	70,31	95 %	6,65 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	23,66	40,25	70 %	1,020	0,990	17,91	-24 %	-2,99 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	32,38	91,88	184 %	0,978	0,988	37,87	17 %	1,06 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	40,45	71,25	76 %	1,016	0,989	35,93	-11 %	-2,64 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	53,02	105,76	99 %	0,996	0,988	53,17	0 %	-0,76 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	49,78	62,96	26 %	1,052	0,990	35,90	-28 %	-5,92 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	67,60	93,68	39 %	1,031	0,988	48,00	-29 %	-4,14 %
<b>Mittelwert</b>		<b>36,92</b>	<b>72,22</b>	<b>103 %</b>			<b>36,33</b>	<b>0,50 %</b>	<b>-0,47 %</b>

Tab. 6-7: Fortsetzung

Variante	Auslastungs-grad x	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS [s/Kfz]	Abweichung HBS gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS NEU [s/Kfz]	Abweichung HBS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
<b>Profil 5a – starke Spitze</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	20,13	26,92	34 %	1,013	0,984	13,40	-33 %	-2,84 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	26,02	51,81	99 %	0,993	0,983	19,82	-24 %	-0,97 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	27,12	48,36	78 %	0,976	0,984	28,20	4 %	0,84 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	44,07	121,26	175 %	0,949	0,981	64,59	47 %	3,41 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	30,78	38,53	25 %	1,042	0,984	17,10	-44 %	-5,59 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	46,65	88,77	90 %	1,000	0,982	34,33	-26 %	-1,86 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	64,03	68,88	8 %	1,049	0,983	34,34	-46 %	-6,35 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	92,71	102,70	11 %	1,033	0,982	49,33	-47 %	-4,98 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	84,11	61,01	-27 %	1,088	0,983	34,80	-59 %	-9,62 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	117,66	90,87	-23 %	1,070	0,982	45,46	-61 %	-8,25 %
<b>Mittelwert</b>		<b>55,33</b>	<b>69,91</b>	<b>47 %</b>			<b>34,14</b>	<b>-29,07 %</b>	<b>-3,62 %</b>
<b>Profil 5b – mittlere Spitze</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	19,01	22,54	19 %	1,004	0,978	12,90	-32 %	-2,58 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	20,85	41,86	101 %	0,965	0,977	18,66	-11 %	1,24 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	25,09	42,08	68 %	0,957	0,978	27,38	9 %	2,20 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	36,78	106,17	189 %	0,929	0,975	59,50	62 %	4,99 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	23,80	31,41	32 %	1,021	0,977	16,38	-31 %	-4,28 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	45,48	74,40	64 %	0,999	0,976	31,34	-31 %	-2,34 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	50,75	58,46	15 %	1,033	0,976	32,95	-35 %	-5,51 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	76,82	88,55	15 %	1,020	0,976	46,03	-40 %	-4,39 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	68,49	52,71	-23 %	1,074	0,977	33,82	-51 %	-9,01 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	103,54	78,17	-25 %	1,061	0,976	43,28	-58 %	-7,99 %
<b>Mittelwert</b>		<b>47,06</b>	<b>59,64</b>	<b>45 %</b>			<b>32,22</b>	<b>-21,79 %</b>	<b>-2,77 %</b>
<b>Profil 5c – leichte Spitze</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	17,49	19,44	11 %	0,989	0,972	12,47	-29 %	-1,68 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	19,87	34,28	73 %	0,957	0,971	17,69	-11 %	1,42 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	24,58	37,43	52 %	0,951	0,972	26,67	9 %	2,19 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	32,84	92,81	183 %	0,913	0,969	55,29	68 %	6,17 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	21,90	26,37	20 %	1,013	0,971	15,78	-28 %	-4,09 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	36,54	62,01	70 %	0,986	0,970	28,97	-21 %	-1,63 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	41,21	50,34	22 %	1,017	0,971	31,80	-23 %	-4,60 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	62,58	76,35	22 %	1,007	0,970	43,36	-31 %	-3,68 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	55,33	46,56	-16 %	1,059	0,971	33,00	-40 %	-8,31 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	86,31	67,63	-22 %	1,047	0,970	41,51	-52 %	-7,40 %
<b>Mittelwert</b>		<b>39,87</b>	<b>51,32</b>	<b>42 %</b>			<b>30,65</b>	<b>-15,73 %</b>	<b>-2,16 %</b>

Tab. 6-7: Fortsetzung

Variante	Auslastungs-grad x	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS [s/Kfz]	Abweichung HBS gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS NEU [s/Kfz]	Abweichung HBS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
<b>Profil 6a – starke Wannenumform</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	18,55	32,11	73 %	1,000	0,990	13,90	-25 %	-0,99 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	23,27	62,27	168 %	0,980	0,989	21,02	-10 %	0,91 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	26,94	55,36	105 %	0,974	0,990	29,02	8 %	1,60 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	36,70	135,42	269 %	0,928	0,987	69,71	90 %	6,30 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	24,63	46,62	89 %	1,024	0,989	17,82	-28 %	-3,40 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	34,54	102,48	197 %	0,982	0,987	37,49	9 %	0,55 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	43,41	79,62	83 %	1,022	0,988	35,76	-18 %	-3,25 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	54,42	116,20	114 %	0,997	0,987	52,76	-3 %	-1,00 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	50,72	70,02	38 %	1,053	0,989	35,78	-29 %	-6,09 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	64,20	103,34	61 %	1,028	0,988	47,73	-26 %	-3,88 %
<b>Mittelwert</b>		<b>37,74</b>	<b>80,34</b>	<b>120 %</b>			<b>36,10</b>	<b>-3,20 %</b>	<b>-0,93 %</b>
<b>Profil 6b – mittlere Wannenumform</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	17,48	27,06	55 %	0,989	0,984	13,42	-23 %	-0,43 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	21,12	52,10	147 %	0,967	0,983	19,86	-6 %	1,70 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	26,14	48,55	86 %	0,967	0,984	28,22	8 %	1,77 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	34,95	121,66	248 %	0,922	0,981	64,73	85 %	6,45 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	23,48	38,74	65 %	1,020	0,984	17,12	-27 %	-3,53 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	31,92	89,16	179 %	0,977	0,982	34,42	8 %	0,54 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	39,49	69,17	75 %	1,014	0,983	34,38	-13 %	-3,06 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	48,64	103,08	112 %	0,990	0,982	49,43	2 %	-0,77 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	44,99	61,25	36 %	1,044	0,983	34,82	-23 %	-5,83 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	57,77	91,22	58 %	1,021	0,982	45,52	-21 %	-3,76 %
<b>Mittelwert</b>		<b>34,60</b>	<b>70,20</b>	<b>106 %</b>			<b>34,19</b>	<b>-1,04 %</b>	<b>-0,69 %</b>
<b>Profil 6a – leichte Wannenumform</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	17,04	22,77	34 %	0,984	0,978	12,93	-24 %	-0,54 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	19,81	42,41	114 %	0,957	0,977	18,72	-6 %	2,12 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	25,40	42,41	67 %	0,960	0,978	27,42	8 %	1,89 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	33,13	107,06	223 %	0,914	0,975	59,79	81 %	6,68 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	21,53	31,79	48 %	1,011	0,978	16,42	-24 %	-3,32 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	28,59	75,23	163 %	0,969	0,976	31,51	10 %	0,76 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	35,67	59,04	66 %	1,005	0,977	33,03	-7 %	-2,78 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	45,29	89,37	97 %	0,984	0,976	46,22	2 %	-0,86 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	41,53	53,16	28 %	1,038	0,977	33,88	-18 %	-5,85 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	52,17	78,89	51 %	1,014	0,976	43,40	-17 %	-3,70 %
<b>Mittelwert</b>		<b>32,02</b>	<b>60,21</b>	<b>89 %</b>			<b>32,33</b>	<b>0,47 %</b>	<b>-0,56 %</b>

Tab. 6-7: Fortsetzung

Variante	Auslastungs-grad $x$	Verlustzeit Simulation [s/Kfz]	Wartezeit nach HBS [s/Kfz]	Abweichung HBS gegenüber Simulation	$f_{IN}$ ideal	$f_{IN}$ NEU	Wartezeit nach HBS NEU [s/Kfz]	Abweichung HBS – Sim NEU	Abweichung $f_{IN}$ ideal zu $f_{IN}$ NEU
<b>Konstant</b>									
I: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,91	16,40	14,87	-9 %	0,976	0,973	12,50	-24 %	-0,31 %
II: $t_U$ : 30s, $t_F$ : 20s	0,95	18,40	23,93	30 %	0,944	0,972	17,79	-3 %	2,93 %
III: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	0,92	23,95	30,76	28 %	0,944	0,972	26,74	12 %	3,06 %
IV: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 30s	1,01	30,21	83,35	176 %	0,899	0,970	55,71	84 %	7,91 %
V: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,93	19,27	19,43	1 %	0,999	0,972	15,84	-18 %	-2,70 %
VI: $t_U$ : 60s, $t_F$ : 45s	0,99	25,96	46,34	79 %	0,961	0,970	29,20	12 %	1,00 %
VII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,96	31,22	39,25	26 %	0,991	0,971	31,92	2 %	-2,01 %
VIII: $t_U$ : 90s, $t_F$ : 55s	0,99	41,33	62,15	50 %	0,977	0,970	43,63	6 %	-0,71 %
IX: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,94	37,90	38,04	0 %	1,031	0,972	31,30	-17 %	-5,70 %
X: $t_U$ : 120s, $t_F$ : 75s	0,98	54,18	53,73	-1 %	1,016	0,971	41,68	-23 %	-4,50 %
<b>Mittelwert</b>		<b>29,88</b>	<b>41,18</b>	<b>38 %</b>			<b>30,63</b>	<b>3,09 %</b>	<b>-0,10 %</b>

Tab. 6-7: Fortsetzung

### 6.3 Einfluss von Instationarität an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage

#### 6.3.1 Aufbau und Kalibrierung des Simulationsmodells mit VISSIM

Im Gegensatz zur Untersuchung des Einflusses von Instationarität an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage, wofür sich ein sehr vereinfachtes Modell in VISSIM erstellen lässt, ist die Modellierung einer vorfahrtgeregelten Situation ungleich komplexer. Eine alleinige Prüfung der Sättigungsverkehrsstärke reicht hierfür nicht aus. Dabei stellt sich zu allererst die Frage, anhand welcher Größen überhaupt eine Kalibrierung erfolgen kann und wie eine Testumgebung auszusehen hat.

Da, wie beispielsweise bereits in Kapitel 2.3 oder 2.6 dargestellt, innerhalb des Verfahrens des HBS (2015) bei der Berechnung der mittleren Wartezeit an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage uneindeutig ist, welche Zeitverluste tatsächlich mitberücksichtigt werden, stellen diese keinesfalls eine geeignete Kalibrierungsgröße dar.

Deshalb liegt die Betrachtung der Grundkapazität in Abhängigkeit vom Fahrmanöver (Ströme) und der

maßgebenden Hauptstromsumme nahe. Als möglichst simples Laborbeispiel wurde demnach eine einfache Einmündung an einer einstreifigen Vorfahrtsstraße modelliert. Die Kalibrierung hierfür erfolgte gemeinsam mit den für die Analyse der Wartezeiten erstellten Modellen und ist somit in Kapitel 4.3.4 bereits ausführlich beschrieben.

#### 6.3.2 Modellierung und Untersuchung der Instationarität

Nicht nur die Erstellung eines Simulationsmodells ist für einen Knotenpunkt ohne Lichtsignalanlage, insbesondere eine vorfahrtgeregelte Kreuzung, komplexer als für einen Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage. Da bei Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage sowohl der Haupt- als auch der Nebenstrom zu betrachten sind, müssen verschiedene Szenarien definiert werden. Zum einen ist zu untersuchen, wie sich Instationarität im Hauptstrom auf die Grundkapazität auswirkt. Zum anderen ist der Einfluss instationären Zuflusses im Nebenstrom auf dessen Wartezeiten zu ermitteln. Die Kombination beider Variationen stellt den dritten Fall mit der höchsten Komplexität dar.

### 6.3.3 Instationarität im Hauptstrom

Eine Untersuchung von Instationarität im Hauptstrom ist mit dem für die Kalibrierung verwendeten Modell ohne größere Anpassungen umsetzbar. Dabei können direkt die sich ergebenden Kurven der Grundkapazität miteinander verglichen werden, um so eine Auswirkung von Instationarität auf die Anzahl an Fahrzeugen aus dem Nebenstrom, die in der betrachteten Stunde in den Hauptstrom einfahren können, zu ermitteln. Dafür wurden die Ganglinientypen 1a (starker Anstieg), 2a (starker Abfall), 5a (starke Spitze) und 6a (starke Wannenförmigkeit) (vgl. Kapitel 6.2.2) verwendet. Das in Kapitel 4.3.4 beschriebene Vorgehen, in dem in einzelnen Simulationsläufen der Zufluss des Hauptstroms von nahe null bis 1.800 Kfz/h bei stetigem hohem Zufluss im Nebenstrom gesteigert wird, wurde dahingehend angepasst, dass der entsprechende stündliche Zufluss auf die verschiedenen Ganglinientypen umgerechnet wurde.

Als Ergebnis zeigt sich hierbei, dass sich die instationären Zuflüsse im Hauptstrom nur minimal auf die stündliche Grundkapazität für den Nebenstrom auswirken. Die in Bild 6-12 gemeinsam dargestellten Kurven liegen fast deckungsgleich aufeinander, einzig im Bereich sehr starker Hauptstrombelastungen zeigen sich Unterschiede. Der RMSPE

schwankt dabei von etwa 6 % (Ganglinientyp Anstieg) bis 14 % (Ganglinientyp konstant), im Bereich bis 1.200 Kfz/h Belastung im Hauptstrom nur noch zwischen circa 1 % und 3 % (siehe Tabelle 6-8).

Betrachtet man daher die sich für die Fahrzeuge im Nebenstrom ergebenden Verlustzeiten, relativ zum Fall konstanten Zuflusses im Hauptstrom, so zeigt sich ein ähnlich homogenes Bild. Die absoluten Zahlen sind hierbei weniger relevant, da, wie beschrieben, mit einem stetig hohen Zufluss im Ne-

		konstant	Abfall	Anstieg	Spitze	Wannenform
gesamt	RMSE	23,23	19,87	9,96	20,98	17,60
	RMSPE	14 %	13 %	6 %	13 %	11 %
bis 1.600	RMSE	16,51	8,76	5,40	12,91	11,63
	RMSPE	9 %	6 %	3 %	7 %	6 %
bis 1.200	RMSE	10,99	3,64	4,30	8,91	6,55
	RMSPE	3 %	1 %	1 %	3 %	2 %

Tab. 6-8: Abweichungen der aus den Simulationsergebnissen berechneten Grundkapazitätskurven zur HBS-Grundkapazitätskurve nach Ganglinienprofil

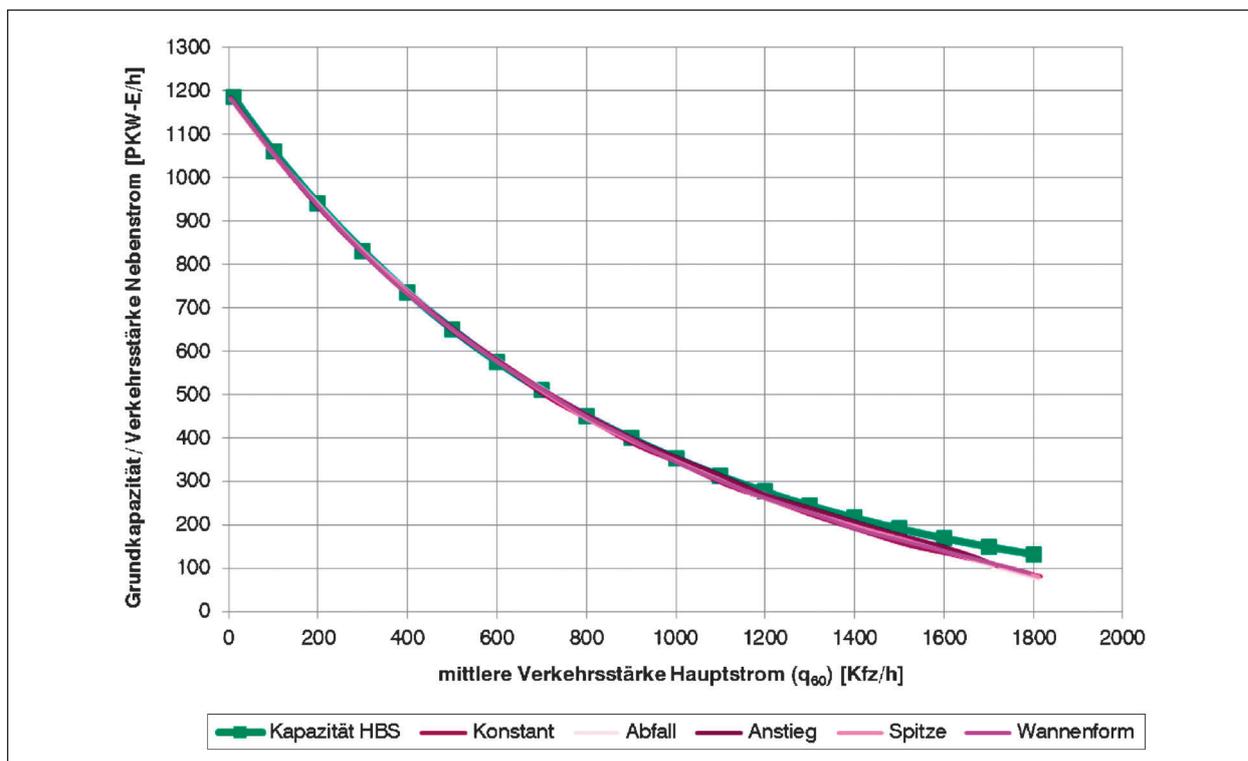


Bild 6-12: Kurven der sich aus den Simulationsergebnissen ergebenden Grundkapazitäten für die verschiedenen Ganglinienprofile im Hauptstrom

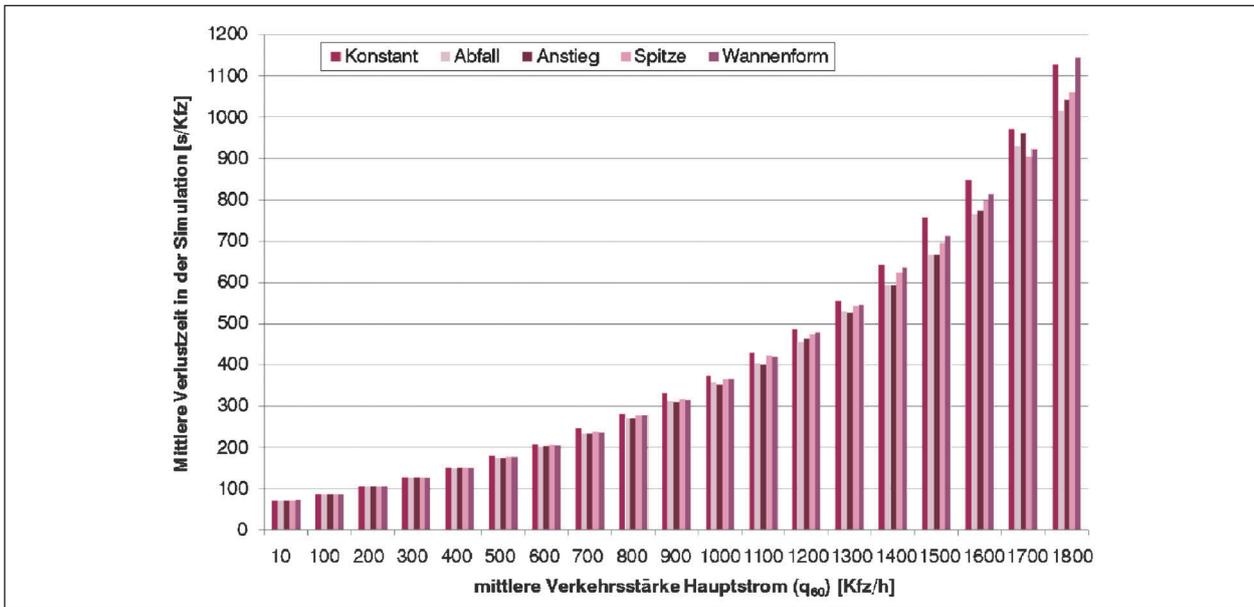


Bild 6-13: Mittlere Verlustzeiten aus der Simulation für die verschiedenen Ganglinienprofile des Hauptstroms im Vergleich

q60 HS [Kfz/h]	Verlustzeit ‚konstant‘ [s/Kfz]	Abweichung zu ‚konstant‘			
		Abfall	Anstieg	Spitze	Wannenform
10	72,30	0,0 %	-0,2 %	0,0 %	0,1 %
100	88,09	-0,6 %	-1,0 %	-0,5 %	-0,4 %
200	107,67	-1,5 %	-0,9 %	-0,4 %	-0,3 %
300	128,92	-1,2 %	-0,9 %	-0,2 %	-0,3 %
400	151,19	-0,7 %	0,1 %	0,1 %	-0,1 %
500	179,33	-1,9 %	-2,0 %	-0,4 %	-0,8 %
600	208,10	-2,6 %	-1,4 %	-0,3 %	-0,7 %
700	245,66	-4,3 %	-4,2 %	-2,7 %	-3,1 %
800	281,38	-3,7 %	-3,7 %	-1,0 %	-1,5 %
900	331,39	-5,3 %	-6,0 %	-3,7 %	-4,5 %
1.000	372,10	-3,9 %	-5,7 %	-1,9 %	-1,5 %
1.100	430,16	-6,2 %	-6,5 %	-1,8 %	-2,4 %
1.200	486,30	-6,3 %	-4,8 %	-2,4 %	-1,2 %
1.300	556,39	-5,0 %	-5,5 %	-2,3 %	-1,9 %
1.400	643,77	-7,9 %	-7,9 %	-3,2 %	-1,2 %
1.500	758,32	-12,1 %	-12,0 %	-8,4 %	-6,1 %
1.600	847,46	-9,9 %	-8,7 %	-5,9 %	-3,8 %
1.700	971,14	-4,1 %	-1,0 %	-6,9 %	-5,0 %
1.800	1.128,64	-9,9 %	-7,7 %	-5,9 %	1,5 %
Quadratesumme		6 %	5 %	2 %	1 %
bis 1.600		5 %	5 %	2 %	1 %
bis 1.200		2 %	2 %	0 %	0 %

Tab. 6-9: Abweichungen verschiedener Ganglinienprofile im Hauptstrom auf Basis der Ergebnisse konstanten Zuflusses

benstrom simuliert wurde, der zu sehr hohen Verlustzeiten durch beabsichtigt lange Warteschlangen führt. Die Werte liegen ebenfalls recht nah beieinander, vor allem für Hauptstrombelastungen unterhalb von 1.200 Kfz/h (siehe Bild 6-13). Die Abweichungen der Ergebnisse der verschiedenen Ganglinien im Vergleich zum stationären Fall sind zusätzlich in Tabelle 6-9 gegeben.

### 6.3.4 Instationarität im Nebenstrom

Um den Einfluss nicht stationären Zuflusses im Nebenstrom zu untersuchen, ist eine Anpassung des Simulationsmodells notwendig. Da hier nicht mehr die Kapazitätsermittlung in Abhängigkeit von der Ganglinie im Vordergrund steht, sondern die Verlustzeiten miteinander verglichen werden sollen, muss der stetig hohe Zufluss im Nebenstrom durch eine realistischere stündliche Verkehrsstärke ersetzt werden. Hierfür werden mehrere Fälle unterschieden: 100 %, 75 %, und 50 % Auslastung sowie Überlastung mit 110 %. Der Gesamtzufluss pro Stunde ergibt sich dabei durch die Grundkapazität des Nebenstroms bei der entsprechenden Hauptstrombelastung. Im Fall von 100 % liegen die sich ergebenden Kombinationen von Haupt- und Nebenstromzufluss also genau auf der Grundkapazitätskurve, für 75 % Auslastung wird die Verkehrsstärke für den Nebenstrom entsprechend verringert.

### Instationärer Zufluss im Nebenstrom bei konstantem Zufluss im Hauptstrom

Wie Tabelle 6-10 zu entnehmen, zeigt das Profil der Wannenförmigkeit die insgesamt geringsten Abweichungen gegenüber einem konstanten Zufluss im Nebenstrom, vor allem bei weniger hoher Auslastung. Die anderen Ganglinienformen weichen in dem Fall ähnlich stark ab. Im Fall der vollen Auslastung von 100 % zeigt das abfallende Profil einen deutlichen Unterschied als die anderen Ganglinien. Anders als die grafischen Darstellungen in Bild 6-14 und Bild 6-15 vermuten lassen, ist es hierbei kaum relevant, ob die komplette Spanne der Hauptstrombelastungen (bis 1.800 Kfz/h) oder nur der Bereich bis 1.200 Kfz/h betrachtet wird, besonders bei hoher Auslastung. Vergleicht man hingegen die per HBS (2015) berechneten Wartezeiten und die aus der Simulation ermittelten Verlustzeiten (siehe Tabelle 6-11) direkt miteinander, zeigt sich ein deutlicher Unterschied hinsichtlich der berücksichtigten Hauptstrombelastungen. Auch hier ist nicht der direkte Vergleich der absoluten Werte zielführend. Der relative Vergleich der Abweichungen zueinander liefert jedoch aufschlussreiche Ergebnisse. Unabhängig von der Auslastung (im nicht überlasteten Zustand) sind die Differenzen über die gesamte Grundkapazitätskurve sehr viel größer als bis zu ei-

ner Hauptstrombelastung von 1.200 Kfz/h, was darauf schließen lässt, dass bei hohen Hauptstrombelastungen die Instationarität im Nebenstrom stark an Bedeutung verliert. Ein weiterer interessanter Aspekt in Bild 6-17 sind die Differenzen der HBS-Wartezeiten bei Überlastung von 110 %. Bei niedrigen Hauptstrombelastungen liegen die Wartezeiten deutlich oberhalb der Verlustzeiten. Auch im Fall von 100 % Auslastung deutet sich dies bereits an.

Auslastung	HS berücksichtigt bis [Kfz/h]	Abweichung zu ‚konstant‘ (RMSPE)			
		Abfall	Anstieg	Spitze	Wannenform
50 %	1.200	9 %	7 %	7 %	3 %
50 %	1.800	8 %	10 %	8 %	5 %
75 %	1.200	35 %	45 %	34 %	8 %
75 %	1.800	39 %	38 %	30 %	8 %
100 %	1.200	59 %	10 %	18 %	10 %
100 %	1.800	52 %	14 %	15 %	9 %
110 %	1.200	25 %	24 %	4 %	5 %
110 %	1800	25 %	23 %	4 %	4 %

Tab. 6-10: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses

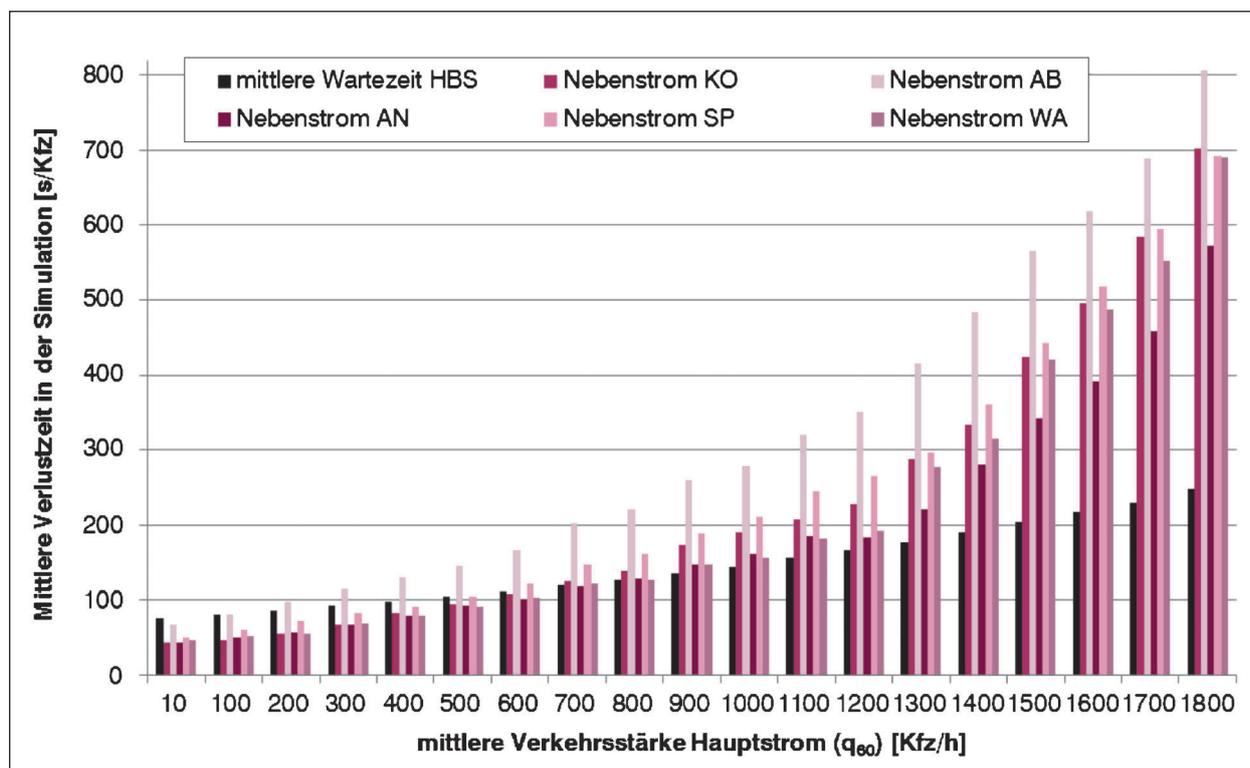


Bild 6-14: Verlustzeiten aus der Simulation bei konstanten Hauptstrombelastungen und Instationarität im Nebenstrom für Nebensstromauslastungen von 100 %, je Ganglinienprofil

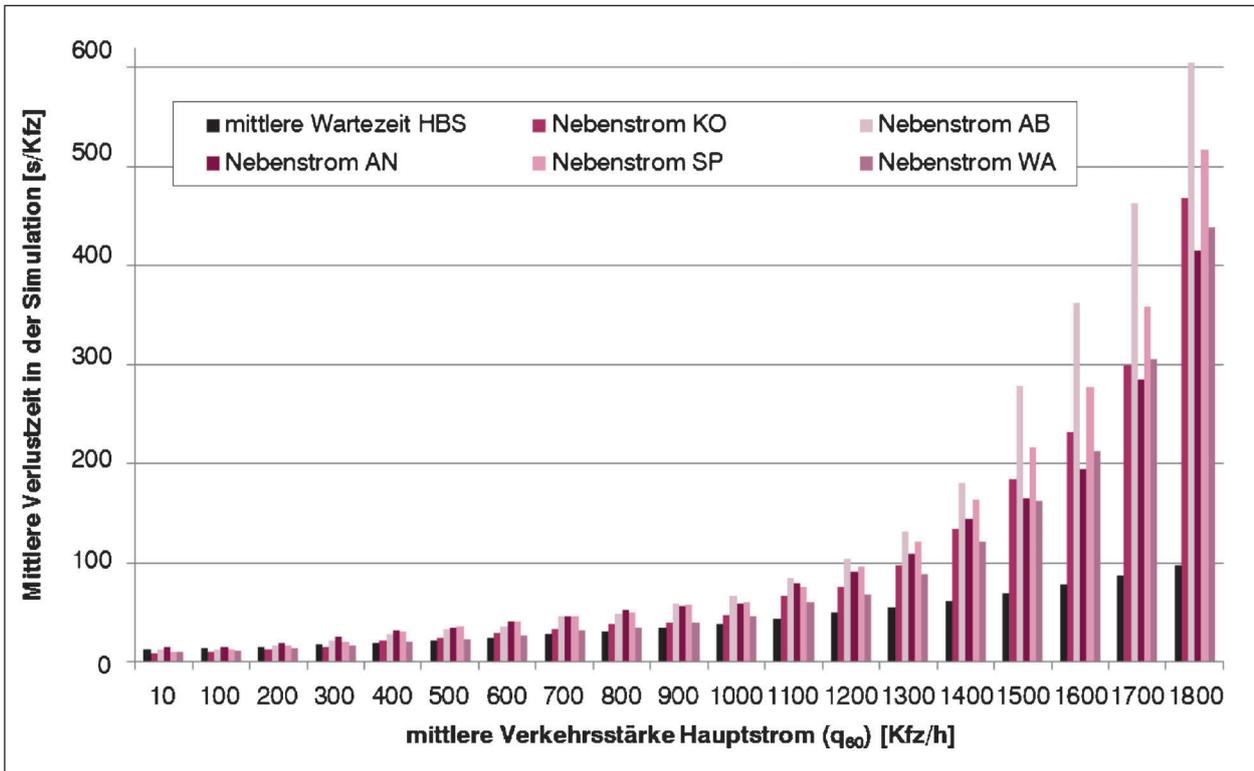


Bild 6-15: Verlustzeiten aus der Simulation bei konstanten Hauptstrombelastungen und Instationarität im Nebenstrom für Nebenstromauslastungen von 75 %, je Ganglinienprofil

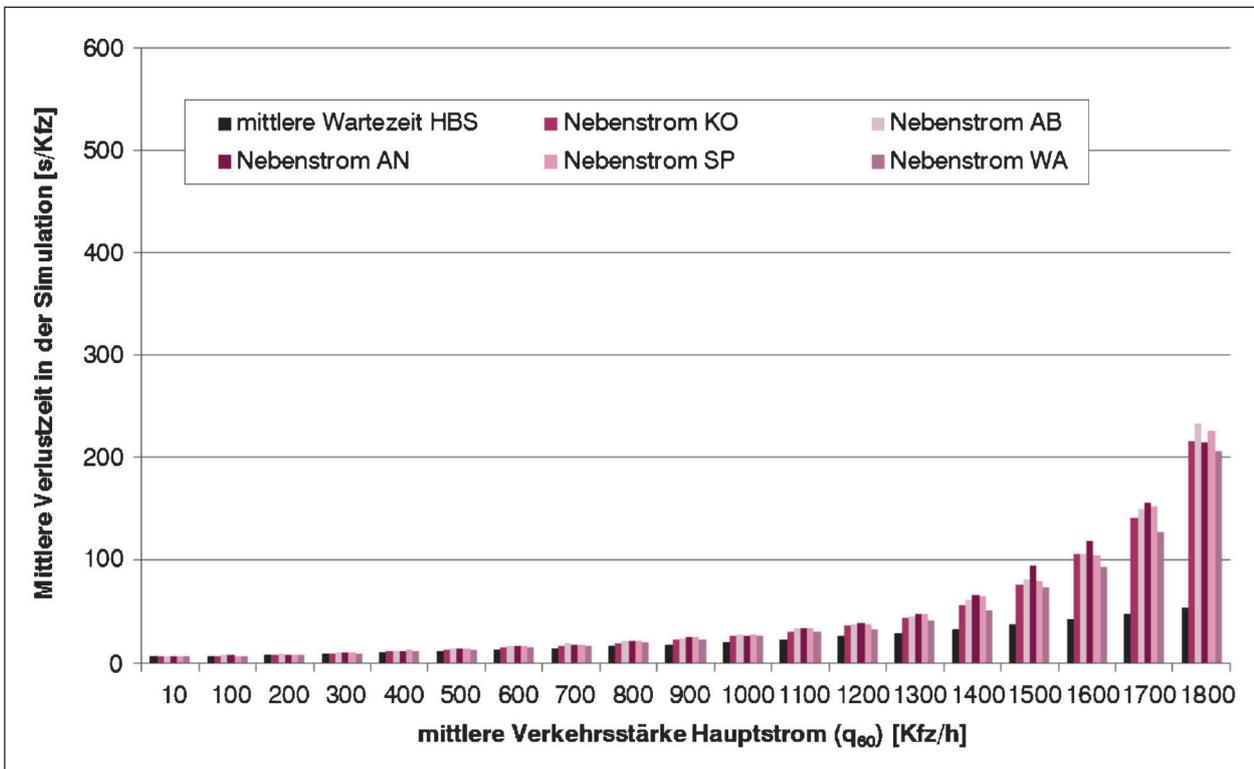


Bild 6-16: Verlustzeiten aus der Simulation bei konstanten Hauptstrombelastungen und Instationarität im Nebenstrom für Nebenstromauslastungen von 50 %, je Ganglinienprofil

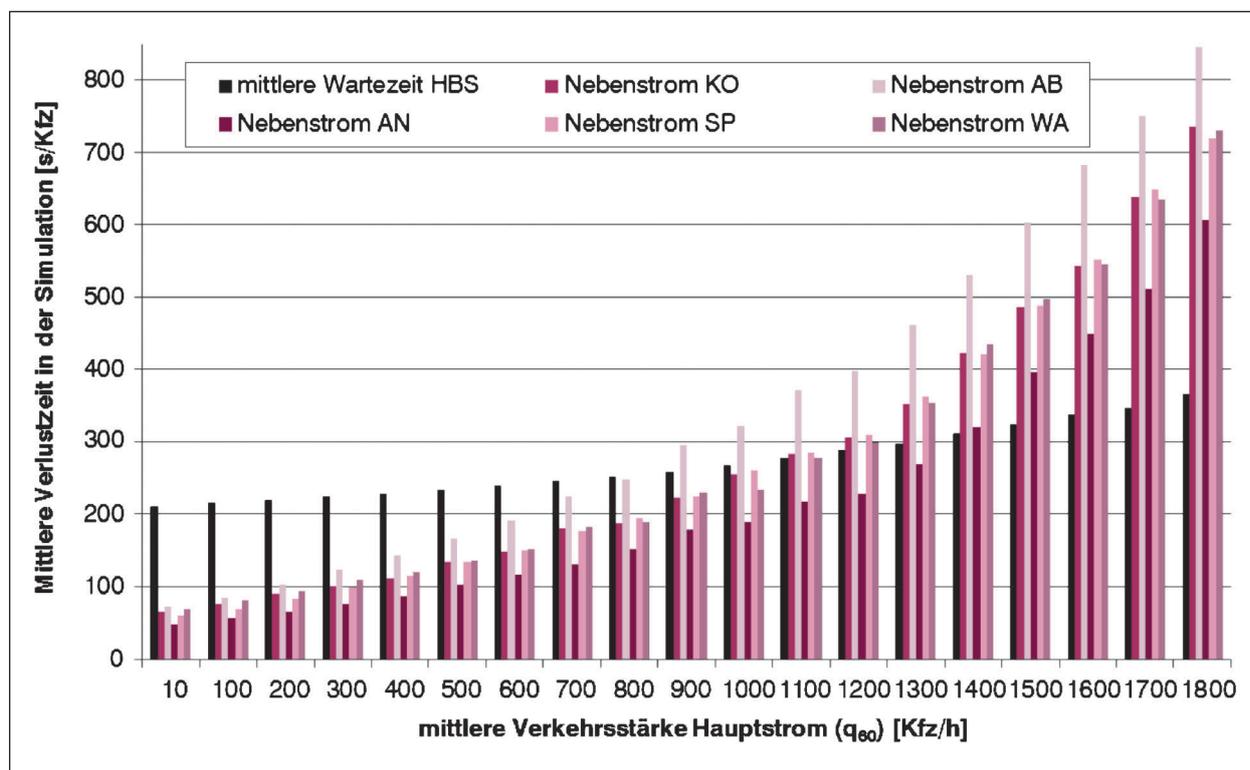


Bild 6-17: Verlustzeiten aus der Simulation bei konstanten Hauptstrombelastungen und Instationarität im Nebenstrom für Nebensstromauslastungen von 110 %, je Ganglinienprofil

Fall	HS berücksichtigt bis [Kfz/h]	konstant	Abfall	Anstieg	Spitze	Wannenform
50 %	1.200	20 %	29 %	28 %	29 %	19 %
50 %	1.800	97 %	108 %	109 %	106 %	87 %
75 %	1.200	27 %	60 %	60 %	58 %	19 %
75 %	1.800	126 %	203 %	120 %	158 %	115 %
100 %	1.200	28 %	66 %	23 %	33 %	21 %
100 %	1.800	74 %	116 %	50 %	78 %	69 %
110 %	1.200	42 %	38 %	53 %	43 %	40 %
110 %	1.800	50 %	63 %	49 %	51 %	49 %

Tab. 6-11: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten aus der Simulation gegenüber der nach HBS berechneten Wartezeiten

### Instationarität im Haupt- und Nebenstrom

Für diesen Fall werden alle Ganglinientypen, sowohl im Haupt- als auch im Nebenstrom, miteinander kombiniert als Zuflüsse im Simulationsmodell verwendet und die jeweiligen Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen des Falls stationären Zuflusses in beiden Strömen verglichen. Die Ergebnisse in Form des RMSPE der prozentualen Abweichungen finden sich mit farblicher Abstufung der Werte in den Tabellen 6-12 bis Tabelle 6-19. Die Diagramme in Bild 6-18 bis Bild 6-21 zeigen die verschiedenen Abweichungen in grafischer Form. Da-

bei weisen die Varianten mit 75 % Auslastung die stärksten Streuungen auf (RMSPE der Abweichungen zwischen 9 % und 257 %) und die wenig ausgelasteten (50 %) sowie überlasteten (110 %) die geringsten Streuungen.

Die Ergebnisse sind insgesamt nicht überraschend. Die stärksten Abweichungen zeigt in allen Fällen das abfallende Ganglinienprofil, da sich bereits zu Anfang der betrachteten Spitzenstunde eine vergleichsweise lange Warteschlange aufbaut, egal ob durch fehlende ausreichend große Lücken im Hauptstrom oder durch sehr starken Zufluss im Ne-

HS/NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		59 %	10 %	18 %	10 %
AB	41 %	78 %	9 %	39 %	43 %
AN	9 %	37 %	5 %	16 %	25 %
SP	10 %	58 %	9 %	28 %	9 %
WA	11 %	56 %	24 %	13 %	11 %

Tab. 6-12: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 100 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.200 Kfz/h

HS/NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		35 %	45 %	34 %	8 %
AB	65 %	257 %	23 %	70 %	89 %
AN	37 %	12 %	125 %	72 %	32 %
SP	33 %	54 %	70 %	103 %	9 %
WA	5 %	63 %	45 %	11 %	21 %

Tab. 6-16: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 75 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.200 Kfz/h

HS/NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		52 %	14 %	15 %	9 %
AB	43 %	73 %	16 %	41 %	46 %
AN	14 %	34 %	10 %	15 %	28 %
SP	10 %	50 %	8 %	25 %	8 %
WA	13 %	48 %	29 %	14 %	12 %

Tab. 6-13: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 100 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.800 Kfz/h

HS/NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		39 %	38 %	30 %	8 %
AB	107 %	252 %	57 %	108 %	120 %
AN	35 %	11 %	108 %	67 %	28 %
SP	41 %	63 %	67 %	99 %	16 %
WA	7 %	56 %	39 %	12 %	18 %

Tab. 6-17: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 75 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.800 Kfz/h

HS/NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		9 %	7 %	7 %	3 %
AB	22 %	86 %	3 %	20 %	34 %
AN	32 %	9 %	68 %	32 %	26 %
SP	18 %	22 %	21 %	36 %	3 %
WA	3 %	14 %	9 %	4 %	10 %

Tab. 6-14: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 50 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.200 Kfz/h

HS/NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		25 %	24 %	4 %	5 %
AB	19 %	30 %	20 %	15 %	23 %
AN	19 %	14 %	21 %	8 %	28 %
SP	2 %	23 %	17 %	5 %	5 %
WA	5 %	25 %	34 %	6 %	6 %

Tab. 6-18: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 110 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.200 Kfz/h

HS/NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		8 %	10 %	8 %	5 %
AB	160 %	236 %	113 %	157 %	166 %
AN	58 %	23 %	101 %	62 %	51 %
SP	39 %	36 %	47 %	63 %	16 %
WA	4 %	19 %	10 %	8 %	13 %

Tab. 6-15: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 50 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.800 Kfz/h

HS/NS	KO	AB	AN	SP	WA
KO		25 %	23 %	4 %	4 %
AB	23 %	33 %	19 %	20 %	26 %
AN	22 %	19 %	21 %	12 %	31 %
SP	2 %	21 %	15 %	5 %	5 %
WA	6 %	24 %	34 %	7 %	6 %

Tab. 6-19: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 110 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.800 Kfz/h

benstrom, die sich nur sehr langsam oder kaum wieder abbauen kann. Zu erwartende vorteilhafte Kombinationen mit gewissermaßen gegensätzlichen Ganglinienformen, wie Spitze gegenüber

Wannenform, bei denen sich die Phasen stärkerer und schwächerer Belastung ausgleichen sollten, werden durch die Ergebnisse in dieser Logik gestützt.

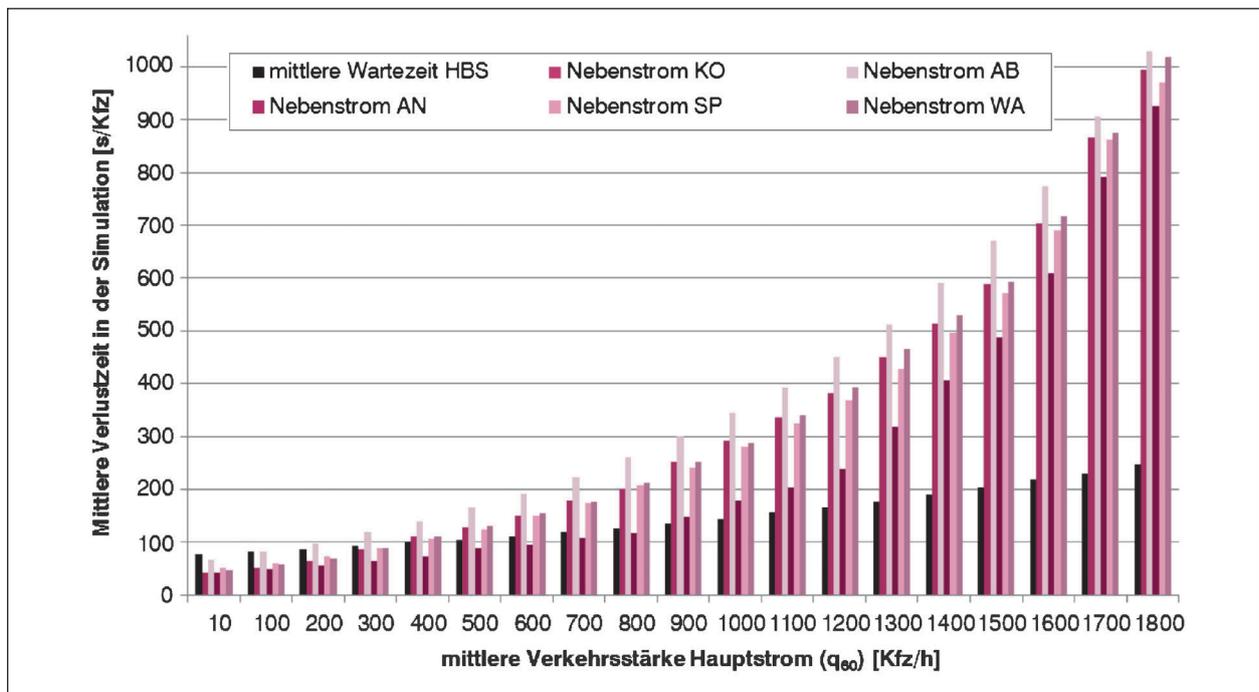


Bild 6-18: Verlustzeiten aus der Simulation bei Hauptstrombelastungen mit Profil „Abfall“ und Nebenauslastungen von 100 %, je Ganglinienprofil

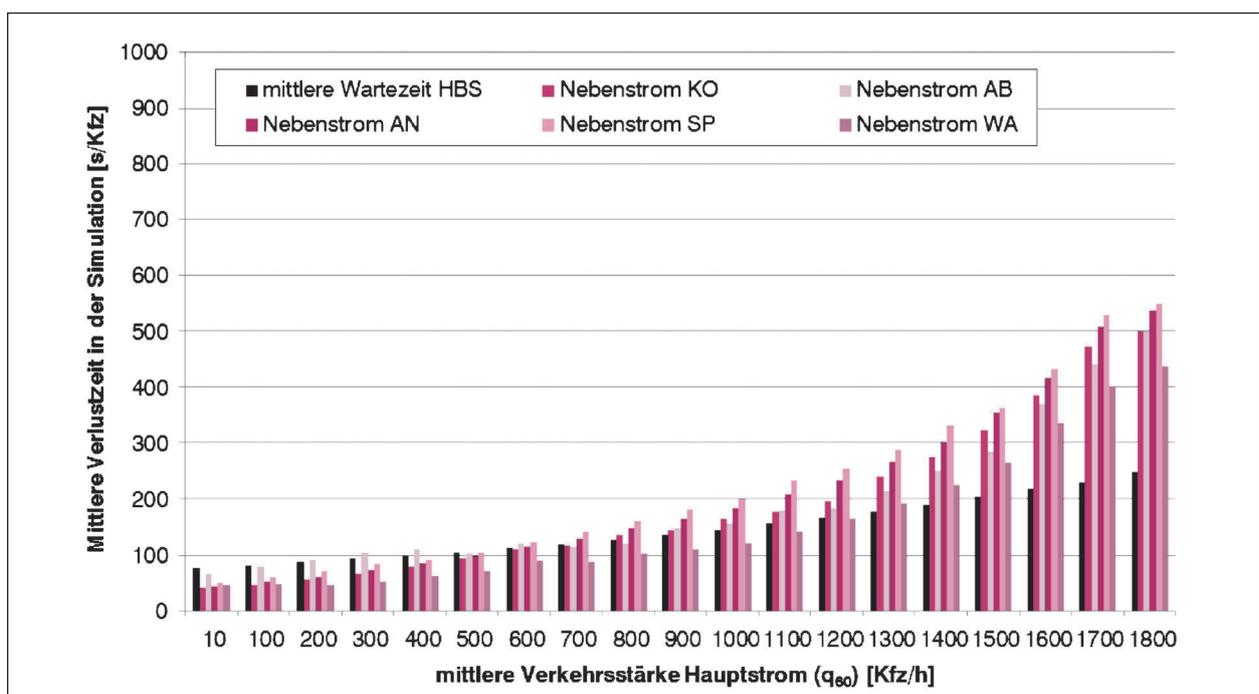


Bild 6-19: Verlustzeiten aus der Simulation bei Hauptstrombelastungen mit Profil „Anstieg“ und Nebenauslastungen von 100 %, je Ganglinienprofil

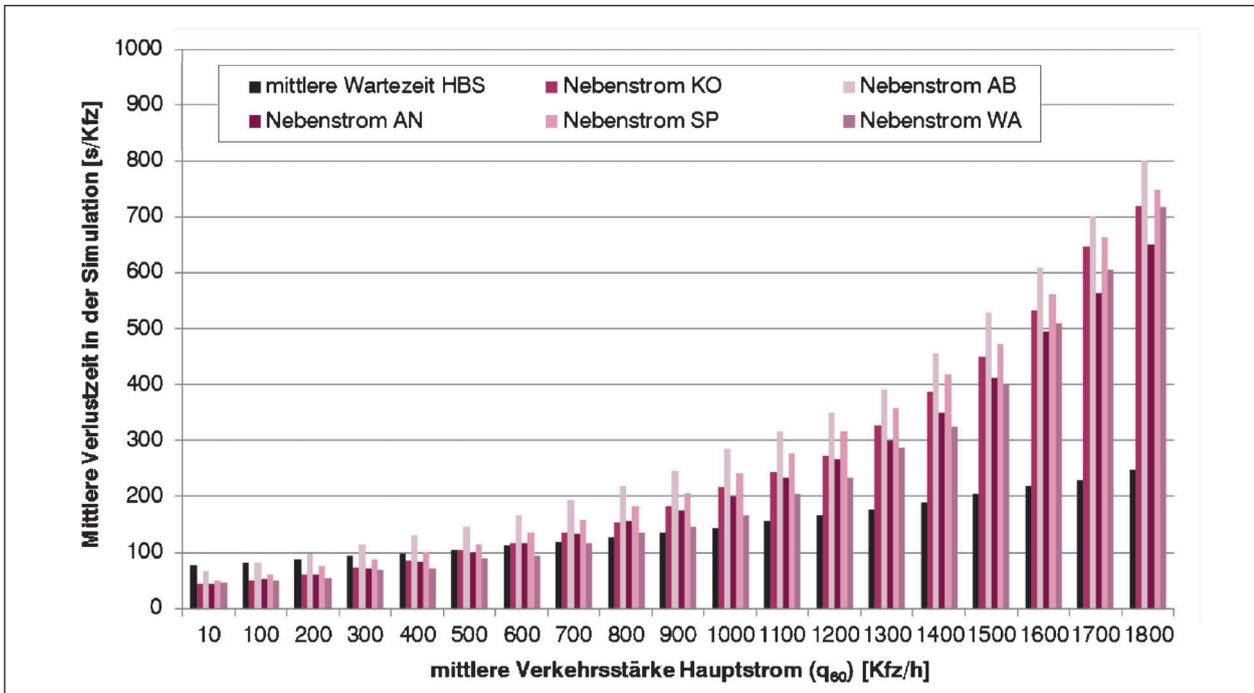


Bild 6-20: Verlustzeiten aus der Simulation bei Hauptstrombelastungen mit Profil „Spitze“ und Nebenauslastungen von 100 %, je Ganglinienprofil

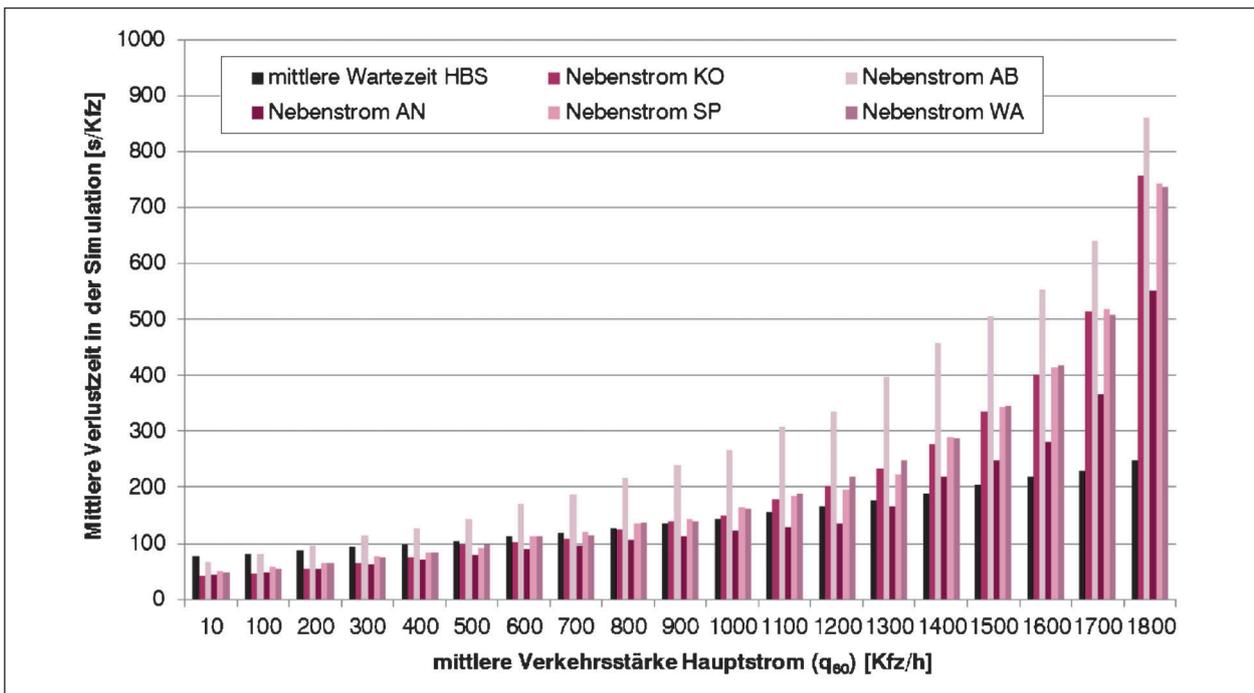


Bild 6-21: Verlustzeiten aus der Simulation bei Hauptstrombelastungen mit Profil „Wanne“ und Nebenauslastungen von 100 %, je Ganglinienprofil

### 6.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

An vorfahrtsregulierten Knotenpunkten, im speziellen der hier untersuchten Einmündung, scheinen sich Instationaritäten sowohl im Hauptstrom als auch im Nebenstrom weniger maßgeblich auszuwirken als im Lichtsignalregulierten Fall. Ein signifikanter Einfluss ist bei hohen Hauptstrombelastungen erkennbar, wobei hier dahingehend zu differenzieren ist, als dass die dann einfahrende Menge an Fahrzeugen aus dem Nebenstrom recht niedrig ist und daher zu stärkeren Schwankungen der Ergebnisse führen kann. Dies impliziert weiterhin, dass bei einer Gesamtbewertung eines solchen Knotens nach HBS (2015) der entsprechende Strom eine eher untergeordnete Rolle im Hinblick auf den Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Knotens spielen dürfte. Bei geringeren Hauptstrombelastungen scheint auch die stündliche Verkehrsstärke hinsichtlich der Auslastung des entsprechenden Nebenstroms einen stärkeren Einfluss zu haben als die möglicherweise darin inbegriffene Instationarität, die durch höhere Auslastungsgrade im Nebenstrom dann gewissermaßen relativiert wird.

## 7 Zusammenfassung und Empfehlungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden einerseits die Warte- und Verlustzeiten an Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage betrachtet, andererseits der Einfluss der Instationarität auf die Warte- bzw. Verlustzeit an solchen Knotenpunkten untersucht.

Die empirische Basis des Projekts waren Videomessungen zahlreicher Knotenpunkte, aus denen in einem weitgehend manuellen Vorgang für jedes beobachtete Fahrzeug mehrere Zeitstempel extrahiert wurden, die z. B. die Ankunft des Fahrzeugs am Warteschlangenanfang, an der Haltlinie oder das Verlassen des Knotenpunkts markieren. Ergänzt wurden die Messungen durch Simulationsrechnungen, um weitere Belastungsfälle zu betrachten als die bei den Messungen aufgetretenen.

Ein großer Aufwand war bei der Kalibrierung der Simulationsmodelle erforderlich. Die Knotenpunkte wurden zunächst in VISSIM als Netzmodelle aufgebaut und mit den Festzeitprogrammen versorgt, die zum Messzeitpunkt aktiv waren. Dann wurde die bei der Messung erhobene Belastungssituation,

also der Verkehrsstärkeverlauf über den Messzeitraum in 5-Minuten-Intervallen für jeden Strom nachgebildet.

Als erste Ergebnisgröße der Simulation wurde die Durchfahrtszeit für jeden Strom betrachtet. Berücksichtigt wurden nur Durchfahrten ohne Wartezeiten oder Behinderungen, enthaltene Zeitverluste sind also nur dem sogenannten geometric delay zuzurechnen. Die Durchfahrtszeiten wurden in der Simulation mithilfe sogenannter Langsamfahrbereiche eingestellt. Dies sind kurze Streckenabschnitte, auf denen die simulierten Fahrzeuge ihre Wunschschnelligkeit reduzieren. Es konnte eine sehr gute Reproduktion der freien Durchfahrtszeiten erreicht werden.

Die nächste kalibrierte Größe ist die für die Kapazität eines Fahrstreifens ausschlaggebende Zeitbedarfswert. Die Zeitbedarfswerte wurden differenziert nach Fahrstreifen und nach Warteposition des Fahrzeugs in der Warteschlange kalibriert. Dies ist bei den meisten Knotenpunkten gut gelungen. Zur Beurteilung der Kalibrierungsgüte insgesamt wurden dann die Gesamtdurchfahrtszeiten (mit Wartezeiten) zwischen Messung und Simulation für die einzelnen Fahrstreifen verglichen. Auch hier ergab sich im Mittel eine gute Übereinstimmung.

Bei der Analyse der Zeitbedarfswerte fiel auf, dass die Zeit, die das erste Fahrzeug vor der Haltlinie zum Anfahren bei Grünbeginn benötigt, sich zwar in der Simulation im Mittel gut einstellen lässt, in der Realität aber viel stärker streut als in der Simulation. Es wurde deshalb an zwei zusätzlichen Knotenpunkten speziell das Anfahrverhalten bei Grünbeginn gemessen. Die so ermittelten Verteilungen des Zeitbedarfs des ersten Fahrzeugs wurden dem Hersteller des Simulationswerkzeugs zur Verfügung gestellt, der daraufhin eine benutzerdefinierte Anfahrzeitverteilung ins Produkt aufgenommen hat.

An Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage hat die Gegenüberstellung der aufgetretenen Wartezeiten aus Messung und Simulation bei der gemessenen Belastungssituation mit den durch das Verfahren des HBS (2015) berechneten mittleren Wartezeiten gezeigt, dass hier Differenzen bestehen, auch wenn man berücksichtigt, dass ein Vergleich von stark mit zufälligen Schwankungen behafteten Messungen mit den mittelwertorientierten Ergebnissen einer HBS-Berechnung mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Abweichungen der Berechnungsergebnisse nach dem HBS (2015) und den Ergebnissen aus

Messungen können im Einzelfall erheblich sein, jedoch liegen die mittleren Wartezeiten meist in der gleichen Größenordnung. Der Verlauf der Wartezeit in Abhängigkeit von der Auslastung im HBS (2015) stimmt hinsichtlich der Form gut mit den Ergebnissen der Simulation überein, allerdings liegen die nach dem HBS (2015) berechneten Wartezeiten fast immer über den simulierten Werten, wenn im HBS (2015) genau die in der Simulation verwendeten Zeitbedarfswerte eingesetzt werden. Insbesondere sind die Streuungen der Verlustzeiten an realen Knotenpunkten und die Unterschiede zwischen nach HBS (2015) berechneten und gemessenen Wartezeiten deutlich größer als die aus der Knotenpunktform resultierenden Verlustzeitkomponenten.

Der differenzierte Vergleich der berechneten mittleren Wartezeit nach dem HBS (2015) und der simulativ ermittelten mittleren Wartezeit zeigt, dass in der Simulation die Wartezeiten bei hohen Auslastungsgraden deutlich höher sind. Ebenfalls hat sich hinsichtlich der Rückstaulänge bei Freigabezeiten gezeigt, dass diese bei hohen Auslastungsgraden in der Simulation deutlich größer ist als die nach dem HBS (2015) berechnete Rückstaulänge. Die simulativ ermittelten Rückstaulängen sind in einzelnen Fällen bis zu 3,5-mal länger als die berechnete Rückstaulänge bei Freigabezeitende, wodurch die festgestellten Unterschiede zwischen der simulativ ermittelten mittleren Wartezeit und der berechneten mittleren Wartezeit zu erklären sind. Der nahezu sprunghafte Anstieg der Rückstaulänge in der Simulation bei hohen Auslastungsgraden legt nahe, dass der ursprüngliche Ansatz des HBS (2001), die Rückstaulänge bei Freigabezeitende in Abhängigkeit des Auslastungsgrads in Stufen zu berechnen, durchaus sinnvoll erscheint. Die Überführung in eine durchgängige Funktion ist zwar anwenderfreundlicher, führt aber bei hoch ausgelasteten Fahrstreifen anscheinend zu deutlichen Unterschätzungen der Rückstaulänge bei Freigabezeitende und damit der mittleren Wartezeit. Hier sind vertiefende Untersuchungen erforderlich.

Beim Vergleich von HBS-Berechnung und Messung bzw. Simulation wurden außerdem in einzelnen Situationen Beobachtungen gemacht, die im Rahmen der Fortschreibung des HBS vertieft berücksichtigt bzw. noch vertieft untersucht werden sollten:

- Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Einfluss der Längsneigung auf die Sättigungsverkehrsstärke im HBS (2015) stark überschätzt wird. Zwar war nur ein Knotenpunkt mit signifi-

kanter Steigung enthalten, aber die Überschätzung war deutlich. Vermutlich beruhen die im HBS (2015) genannten Einflussfaktoren noch auf veralteter Fahrzeugtechnik und sollten erneuert werden, da die heutigen Fahrzeuge über stärkere Motorisierung und Anfahrhilfen an Steigungen verfügen.

- Weiterhin wurde der Einfluss bevorrechtigter Fußgänger- bzw. Radfahrerströme auf die Wartezeit von Abbiegern betrachtet. Im HBS (2015) ist eine Funktion vorgegeben, die in Abhängigkeit von der Anzahl bevorrechtigter Personen eine zusätzliche Wartezeit für Abbieger festlegt. Zur Überprüfung wurden an vier Knotenpunkten Videomessungen speziell hinsichtlich des Konflikts von Abbiegern mit Fußgänger- und Radfahrerfurten durchgeführt. In der Auswertung wurde bestimmt, wie lange die Furt tatsächlich für die Abbieger blockiert war. Als Ergebnis wird eine Funktion mit etwas anderem Verlauf vorgeschlagen, der bei wenigen Personen höhere Blockierzeiten vorsieht, dann aber flacher verläuft als die ursprüngliche Kurve.

An Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage hat sich durch den Vergleich der berechneten mittleren Wartezeit nach dem HBS (2015) und der simulativ ermittelten mittleren Wartezeit gezeigt, dass die nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten bei hohen Kapazitäten eher überschätzt und bei niedrigen eher unterschätzt werden. Als Folge daraus wird eine geringfügige Modifikation der Wartezeitgleichung des HBS (2015) vorgeschlagen (siehe Gleichung 5-4).

Im Hinblick auf die mittleren Verlustzeiten (gegenüber der freien Durchfahrt ohne Knotenpunkt) lässt sich festhalten, dass diese – über alle Stromkonstellationen und Belastungsfälle betrachtet – im Mittel um etwa 6 s höher sind als die mittleren Wartezeiten, die in der Simulation bestimmt wurden. Damit liegt die Differenz zwischen Verlust- und Wartezeit in etwa in der Größenordnung, wie sie u. a. auch schon BRILON (2003) für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage allgemein angegeben hat. Zudem passt diese Größenordnung auch zu den zusätzlichen Zeitverlusten vor und hinter Einmündungen und Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage, die von BAIER et al. (2012) abgeleitet wurden und im HBS (2015) für die anlagenübergreifende Betrachtung von Netzabschnitten angegeben sind.

Um den Einfluss der Instationarität an signalisierten Knotenpunkten zu betrachten, wurde eine festzeit-

gesteuerte Zufahrt bei unterschiedlichen Umlaufzeiten, Grünzeitanteilen und Auslastungsgraden simuliert. Die Zufahrt wurde eine Stunde mit der immer gleichen Gesamtmenge an Fahrzeugen, aber verteilt auf die Stunde gemäß den verschiedenen Instationaritätsprofilen belastet. Als Ergebnis wurden die Verlustzeiten aller Fahrzeuge bestimmt. Das Modell wurde grundlegend so kalibriert, dass im Fall stationären Zuflusses diese Verlustzeiten mit den mittleren nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten übereinstimmen.

Die in der Simulation der verschiedenen Ganglinienprofile bestimmten Verlustzeiten wurden dann miteinander und mit den nach dem HBS (2015) berechneten Wartezeiten verglichen. Dabei wurde für jedes Profil der Instationaritätsfaktor wie im HBS (2015) definiert berechnet und verwendet. In der Regel ergaben sich deutliche Unterschiede in der Verlustzeit. Das ist auch plausibel, weil der im HBS verwendete Instationaritätsfaktor nur das Verhältnis von höchstbelastetem 15-Minuten-Intervall und Stundenwert betrachtet und nicht berücksichtigt, ob der Belastungsverlauf innerhalb der Stunde fallend oder steigend ist. Die Simulationsrechnungen zeigen jedoch, dass dies für die Wartezeiten im Bereich hoher Auslastungen ein großer Unterschied ist.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen wird ein erweiterter Instationaritätsfaktor vorgeschlagen (siehe Gleichung 6-2), um den Einfluss der Instationarität an signalisierten Knotenpunkten genauer berücksichtigen zu können. Dieser ist abhängig vom Auslastungsgrad und enthält darüber hinaus eine Variable, die beschreibt, ob die Belastung innerhalb der Stunde ansteigt, fällt, symmetrisch oder konstant ist. Ob die damit erreichte höhere Genauigkeit der Wartezeitberechnung die höhere Komplexität, die dadurch in das Verfahren kommt, rechtfertigt, muss bei der Fortschreibung des HBS abgewogen werden.

Eine Instationarität an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage kann im vorfahrtsberechtigten oder im wartepflichtigen Strom auftreten. Insgesamt konnte jedoch bei mit Verkehrszeichen vorfahrtgeregelten Einmündungen und Kreuzungen kein signifikanter Einfluss der Instationarität ermittelt werden.

Abschließend wurde noch betrachtet, wie die einzelnen Komponenten der Verlustzeit in den Berechnungsverfahren berücksichtigt werden, insbesondere, ob der „geometric delay“ behandelt wird. Dazu betrachten wir einen sogenannten knotenpunkt-

typspezifischen Grundzeitverlust  $t_{W,G}$ , der durch das reine Vorhandensein des Knotenpunktes entsteht, ohne dass eine Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer vorhanden ist. Der Teil dieses zusätzlichen Zeitverlusts, der durch das Verzögern vor und das notwendige Beschleunigen hinter dem Knotenpunkt entsteht, ist im HBS in Kapitel S6 „Netzabschnitte“ für die verschiedenen Knotenpunkttypen beschrieben. Daneben ergibt sich bei der Berechnung der Wartezeit nach Kapitel S4 und S5 ein knotenpunkttypspezifischer Grundzeitverlust, wenn die Bewertung mit einer Belastung gegen 0 für den untersuchten Strom bzw. Fahrstreifen durchgeführt wird.

Für den Grundzeitverlust an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage gilt für einen Auslastungsgrad  $x = 0$  und mit der Vereinfachung  $t_U = t_A + t_S$  dabei eine Wartezeit von  $t_{W,G} = t_S^2 / (2t_U)$ , das ist die Wartezeit, die dadurch entsteht, dass ein zufällig ankommendes Fahrzeug während der Sperrzeit eintrifft und bis zum Freigabebeginn warten muss. Nach Kapitel S6 sind zur Beurteilung der Verlustzeit abhängig von der Wartezeit zusätzlich zwischen 1,5 s und 2 s hinzuzuaddieren. Anhand der kalibrierten Simulationsmodelle zu den Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage lässt sich diese Gesamtverlustzeit ebenfalls analysieren. Dazu wurden die Simulationsläufe mit sehr geringer Belastung betrachtet und man erhält, abhängig von der Umlauf- und Freigabezeit sehr ähnliche Verlustzeiten. Die Verlustzeit wurde dabei im Vergleich zur Simulation mit Fahrzeugen bestimmt, die nicht durch eine Lichtsignalanlage beeinflusst werden.

Für den Grundzeitverlust an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage ergibt sich bei einer Belastung von 0 Fz/h im Hauptstrom genau die Folgezeitlücke  $t_{W,G} = t_F$ . Zusätzlich werden nach Kapitel S6 2,0 s für Knotenpunkte mit Zeichen 205 StVO und 8,5 s mit Zeichen 206 StVO addiert, um einen Netzabschnitt bewerten zu können. Es wurden ebenfalls Simulationen der kalibrierten Modelle für Knotenpunkte mit Zeichen 205 StVO mit sehr geringer Nebenstrombelastung durchgeführt, wobei im Hauptstrom kein Verkehr erzeugt wurde. Diese Simulationsstudien ergeben eine Verlustzeit von etwa 6 s. Die Vergleichsgröße waren ebenfalls Fahrzeuge, die durch ein von Konfliktflächen unbeeinflusstes Netz der gleichen Geometrie gefahren sind. Da die Folgezeitlücken in der Größenordnung von 3 s bis 4 s liegen, ergeben sich hier übereinstimmende Ergebnisse zwischen HBS und Simulation. Für Knotenpunkte mit Zeichen 206 StVO lassen sich keine

vergleichbaren Ergebnisse mithilfe von Simulationsmodellen erzielen, da die Standzeit an der Stopplinie eine direkte Einstellgröße in VISSIM darstellt. Es ist allerdings davon auszugehen, dass die für Kapitel S6 empirisch ermittelten Größen anwendbar sind und zu plausiblen Ergebnissen führen.

Für den Grundzeitverlust an Kreisverkehrsplätzen gelten sowohl für die Simulation wie auch für das Berechnungsverfahren nach HBS die gleichen Rahmenbedingungen wie für Knotenpunkte mit Zeichen 205 StVO. Ausschließlich die Abhängigkeit von der Fahrtbeziehung wurde bisher nicht näher betrachtet und fehlt im Bewertungsverfahren. Da die Fahrtbeziehung maßgeblich bestimmt, wie viel Strecke auf der Kreisfahrbahn zurückzulegen ist, bestimmt dies auch die Verlustzeit im Gegensatz zu einer Geometrie, die ein direktes Abbiegen ohne Kreisfahrbahn ermöglicht.

Aus den Ergebnissen ergeben sich zusammenfassend folgende Empfehlungen: Die Verfahren des HBS zur Wartezeitberechnung an Knotenpunkten geben die Wartezeiten in Abhängigkeit der Belastung grundsätzlich gut wieder; bei einzelnen Komponenten dieser Verfahren bestehen Verbesserungsmöglichkeiten:

- Der Einfluss der Instationarität an Knotenpunkten mit Lichtsignalsteuerung sollte mit dem erarbeiteten neuen Instationaritätsfaktor abgebildet werden, um auch unsymmetrische Belastungsverläufe in der Bemessungsstunde korrekt zu behandeln.
- Die Wartezeitberechnung bei unsignalisierten Knotenpunkten sollte geringfügig modifiziert werden, um den Einfluss der Kapazität besser abzubilden.
- Der Einfluss der Längsneigung auf die Sättigungsverkehrsstärke sollte vertieft untersucht werden; das aktuelle Verfahren überschätzt den Einfluss wahrscheinlich deutlich.
- Der Einfluss bedingt verträglicher Fuß- und Radfahrerströme auf die Kapazitäten der abbiegenden Fahrzeugströme sollte vertieft untersucht werden.

Außerdem sollten zur Verbesserung der Simulationspraxis Hinweise zur HBS-konformen mikroskopischen Simulation von Knotenpunkten erarbeitet und als Regelwerk zur Verfügung gestellt werden.

## Literatur

- AKÇELIK, R.: Time-Dependent Expressions for Delay, Stop Rate and Queue Length at Traffic Signals. Internal Report AIR 367-1, Australian Road Research Board, Vermont South, Australia, 1980
- AKÇELIK, R.; ROUPHAIL, N. M.: Estimation of Delays at Traffic Signals for variable Demand Conditions. In: Transportation Research Part B, Vol. 27B, No. 2, pp. 109-131, 1993
- AKÇELIK, R.; TROUTBECK, R.: Implementation of the Australian roundabout analysis method in SIDRA. In: Highway Capacity and Level of Service – Proceedings of the International Symposium on Highway Capacity; pp. 17-34, A.A. Balkema, Karlsruhe, 1991
- ARENS, A.; AUGE, B.: Warteschlangentheorie – Seminararbeit Datenverarbeitung WS 2004/2005. RWTH Aachen, 2004
- BAIER, M. M.; SCHUCKLISS, W.; MAIER, R.; SCHMOTZ, M.: Qualitätsstufenkonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V264, Bergisch Gladbach, 2015
- BANSI, C.: Untersuchung des Knotenpunkteinflusses auf den Verkehrsablauf in einem zweistreifigen Landstraßenzug mit Kreisverkehren anhand einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, RWTH Aachen, Aachen, 2004
- BOLTZE, M.; STEPHAN, R.: Kapazität und Verkehrssicherheit von Knotenpunkten mit der Regelungsart „rechts vor links“. Schriftenreihe Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 872. Bonn, 2003
- BRILON, W.: Delay at unsignalized intersections. In: Transportation Research Record, No. 2071, pp. 98-108, 2008
- BRILON, W.: Wartezeiten an überlasteten Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 11, 1995, S. 531-539, 1995

- BRILON, W.: Vorfahrt im HBS – Ein Kommentar zum Kapitel 7. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 9, 47, S. 21-26, 2003
- BRILON, W.; AKÇELIK, R.; KYTE, M.; ROUPHAIL, N. M.: Review of international Practices used to evaluate unsignalized intersections – Transportation Research Circular No. 468. Transportation Research Board, Washington D.C., 1997
- BRILON, W.; BÄUMER, H.: Überprüfung von Kreisverkehren mit zweistreifig markierter oder einstreifig markierter, aber zweistreifig befahrbarer Kreisfahrbahn. Schriftenreihe Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 876. Bonn, 2004
- BRILON, W.; GROßMANN, M.; BLANKE, H.: Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs auf Straßen. Schriftenreihe Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 669. Bonn-Bad Godesberg, 1994
- BRILON, W.; REICHARDT, G.; WEISER, F.; WESTPHAL, S.; WU, N.: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 02.171 R96A, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1999
- BRILON, W.; SCHNABEL, W.: Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 1, 47, S. 21-26, 2003
- BRILON, W.; WEINERT, A.: Ermittlung aktueller Grenz- und Folgezeitlücken für Außerortsknoten ohne Lichtsignalanlage. Schriftenreihe Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 828. Bonn, 2001
- CATLING, I.: A time-dependent approach to junction delays. In: Traffic Engineering & Control, Volume 18, Issue 11, pp. 520-523, 526, 1977
- FGSV: Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, 2006
- HBS: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2001, Fassung 2005, Köln, 2001/2005
- HBS: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, fortgeschriebene Fassung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2015
- HCM: Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, Washington D.C., 2010
- HCM: Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, Washington D.C., 2000
- HELLER, W.-D.; LINDENBERG, H.: Stochastische Systeme – Markoffketten, Stochastische Prozesse, Warteschlangen. De Gruyter Lehrbuch, Berlin, 1978
- JACOBS, F.: Ein Stationaritätstest für Zeitlückenfolgen. Universität Stuttgart, Arbeitsblätter zum Straßen- und Verkehrswesen, Stuttgart, 1979
- KIMBER, R. M.; HOLLIS, E. M.: Traffic queues and delays at road junctions. TRRL Laboratory Report, LR 909, Crowthorne, 1979
- KIMBER, R. M.; HOLLIS, E. M.: Peak-period traffic delays at road junctions and other bottlenecks. In: Traffic Engineering & Control, Volume 19, Issue 10, pp. 442-446, 1978
- KIMBER, R. M.; MARLOW, M.; HOLLIS, E. M.: Flow/delay relationships for major/minor priority junctions. In: Traffic Engineering & Control, Volume 18, Issue 11, pp. 516-519, 1977
- KIMBER, R. M.; SUMMERSGILL, I.; BURROW, I. J.: Delay Processes at Unsignalised Junctions: The Interrelation between Geometric and Queuing Delay. In: Transportation Research Part B, Vol. 20, Issue 6, pp. 457-476, 1986
- LITTLE, J. D.: A Proof of the Queuing Formula  $L = W \cdot \lambda$ . In: Operations Research, Volume 9, Issue 3, pp. 383-387, 1961
- McDONALD, M.; HOUNSELL, N. B.; K., K. R.: Geometric Delay at non-signalised Intersections. Berkshire, 1984
- McNEIL, D. R.: A Solution to the Fixed-Cycle Traffic Light Problem for Compound Poisson Arrivals. In: Journal of Applied Probability, Vol. 5, No. 3, pp. 624-635, 1968
- RODEGERDTS, L. A.: Geometric delay estimation for Roundabouts. In: Transportation Research Board, 2006

- ROUPHAIL, N. M.; TARKO, A.; LI, J.: Traffic Flow at Signalized Intersections. In: Traffic Flow Theory – A State-of-the-Art Report – Revised 2001; Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics, 2001
- SCHUCKLISS, W.; BAIER, M. M.; BAUER, O.: Maß für die Qualität des Verkehrsablaufs an Kreisverkehren – Wartezeit, Haltezeit oder Verlustzeit? Perspektiven für das Straßenwesen, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Nr. 43. Aachen, 2003
- SIERZEGA: <http://www.sierzega.com/Produkte/Verkehrserfassung/SR4/tabid/69/language/de-DE/Default.aspx> (6. Juni 2012)
- STEINAUER, B.; SCHUCKLISS, W.; BECHER, T.: Übergreifende Bewertung von Streckenabschnitten und Knotenpunkten auf Landstraßen. Schriftenreihe Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1004. Bonn, 2008
- TRACZ, M.; CHODUR, J.: Quality of traffic performance assessment for priority type intersection with non-stationary traffic flow demands. Transportation Research Part C, Volume 19, Issue 2, pp. 307-319, 2011
- TRC: Review of international practices used to evaluate unsignalized intersections – Transportations Research Circular No. 468. Washington D.C., 1997
- VLAHOGIANNI, E. I.; KARLAFTIS, M. G.; GOLIAS, J. C.: Statistical methods for detecting nonlinearity and non-stationarity in univariate short-term time-series of traffic volume. In: Transportation Research Part C, Volume 14, Issue 5, pp. 351-367, 2006
- WASHINGTON, S. P.; KARLAFTIS, M. G.; MANNERING, F. L.: Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis. Chapman&Hall/CRC, Boca Raton, 2011
- WEBSTER, F. V.: Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper No. 39, London, 1958
- WU, N.: Wartezeit und Leistungsfähigkeit von Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung von Instationarität und Teilgebundenheit des Verkehrs. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 8, Bochum, 1990
- YI, P.; WOLFENBARGER, J.; RAAVI, V. S.; YU, L.: Investigation of Peak Flow Variations – Preliminary Field Studies. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2130, pp. 75-82, 2009

## Bilder

- Bild 1-1: Schematische Darstellung des Projekt- ablaufs
- Bild 2-1: Schematische Darstellung eines Be- diensystems (Quelle: ARENS und AUGÉ (2004))
- Bild 2-2: Einfaches Modell einer Kreuzung zweier Einbahnstraßen ohne Lichtsignalanlage
- Bild 2-3: Darstellung der Koordinatentransforma- tion nach KIMBER und HOLLIS (1979)
- Bild 2-4: Entwicklung der Verkehrsstärke und der Warteschlangenlänge in einem D/D/1- System (Quelle: BRILON (2008))
- Bild 2-5: Betrachtungsfälle zur Bestimmung der Summe der Wartezeiten  $SW_{q,D}$  (Quelle: BRILON (2008))
- Bild 2-6: Darstellung des Auf- und Abbaus einer Warteschlange durch den reinen Ab- lauf eines Signalprogramms (determi- nistische Betrachtung) (Quelle: WU (1990))
- Bild 2-7: Anschauliche Erklärung des Instatio- naritätsfaktors anhand einer Ganglinie in Parabelform (verändert nach WU (1990))
- Bild 2-8: Modellierung von Verkehrsstärke-Gang- linien nach dem High-Definition- und Low-Definition-Ansatz (nach KIMBER und HOLLIS (1979))
- Bild 2-9: Ganglinienformen, die WU (1990) für seine Berechnungen verwendet (Quelle: WU (1990))
- Bild 2-10: Grafische Darstellung der ganglinienf- ormabhängigen Parameter für die Berechnung der Rückstaulänge nach WU (1990) (Quelle: WU (1990))

- Bild 2-11: Tabelle mit den ganglinienabhängigen Parametern für die Berechnung der Rückstaulänge nach WU (1990) (Quelle: WU (1990))
- Bild 2-12: Weg-Zeit-Linien der freien Durchfahrt nach SCHUCKLISS et al. (2003)
- Bild 2-13: Vergleich des realen Fahrverlaufes an einem Knotenpunkt mit verschiedenen Ansätzen zur modellhaften Nachbildung nach BRILON et al. (1994)
- Bild 2-14: Einflussbereich eines Knotenpunkts nach SCHUCKLISS et al. (2003)
- Bild 2-15: Zusammenhang zwischen dem Sättigungsgrad der Zufahrt (Traffic Intensity) und der Verlustzeit (Delay) an einem Kreisverkehr (Quelle: übersetzt nach KIMBER et al. (1986))
- Bild 2-16: Ermittelte Pkw-Fahrzeiten mit den zugehörigen Standardabweichungen unterschiedlicher Verkehrsströme durch Einflussbereiche von Knotenpunkten nach STEINAUER et al. (2008)
- Bild 2-17: Mittlere Pkw-Fahrgeschwindigkeit bei der Durchfahrt des Einflussbereichs von 800 m bei Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage in Abhängigkeit der Fahrbeziehung und der mittleren Wartezeit nach HBS (2001) für den betrachteten Verkehrsstrom nach STEINAUER et al. (2008)
- Bild 2-18: Ansatz zur Bestimmung der geometrischen Verlustzeit (Quelle: übersetzt nach RODEGERDTS (2006))
- Bild 2-19: Zusammenhang zwischen der Ausgangsgeschwindigkeit und der geometrischen Verlustzeit unter gleichbleibenden geometrischen Randbedingungen nach BAIER et al. (2015)
- Bild 3-1: Aufstellort der Videokamera in der untergeordneten Zufahrt
- Bild 3-2: Kamerabild am Beispiel eines Minikreisverkehrs
- Bild 3-3: Hochstativ, auf 12 m Höhe vollständig ausgefahren
- Bild 3-4: Befestigung einer Kamera an einem Lichtmast
- Bild 3-5: Kamera am Lichtmast aus einiger Entfernung
- Bild 3-6: Geschwindigkeitsprofil aus Floating-Car-Data am Beispiel eines LSA-Knotens (Skizze)
- Bild 3-7: Befestigung des Seitenradars an einem Schilderpfosten (Quelle: SIERZEGA (2012))
- Bild 3-8: Ablauf der empirischen Untersuchungen
- Bild 3-9: Auszuwertende Zeitstempel der Fahrzeuge an einem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage
- Bild 3-10: Auszuwertende Zeitstempel der Fahrzeuge an einer Einmündung ohne Lichtsignalanlage
- Bild 3-11: Auszuwertende Zeitstempel der Fahrzeuge an einem Kreisverkehrsplatz
- Bild 3-12: Videoauswertungstool auf der Basis von Excel
- Bild 3-13: Blick aus der Späthstraße auf den Knotenpunkt
- Bild 3-14: Blick auf die östliche Zufahrt (Zeppelinstraße) des Knotenpunkts
- Bild 3-15: Blick in Richtung der einmündenden Raoul-Wallenberg-Straße
- Bild 3-16: Blick aus Süden (Nordstraße) auf den Knotenpunkt
- Bild 3-17: Blick auf die Einmündung aus südöstlicher Richtung
- Bild 3-18: Blick auf die einmündende Neuwiesenstraße
- Bild 3-19: Mittlere Anfahrzeit an den erhobenen Knotenpunkten
- Bild 3-20: Verteilung der Anfahrzeit am Knotenpunkt Tullastraße/Haid-und-Neu-Straße
- Bild 3-21: Verteilung der Anfahrzeit am Knotenpunkt Karlsruher Str./L 560
- Bild 3-22: Vergleich der Anfahrzeitverteilung aus den Messungen mit der Simulation ohne Anfahrzeitverteilung
- Bild 3-23: Vergleich der Anfahrzeitverteilung aus den Messungen mit in VISSIM eingestellter Anfahrzeitverteilung

- Bild 3-24: Belegungszeit einer Fußgängerfurt pro Umlauf nach HBS (2015)
- Bild 3-25: Belegungszeiten: Einzelmesswerte, Mittelwerte und Funktion nach HBS (2015)
- Bild 3-26: Belegungszeiten, unterschieden nach Fußgänger- oder Radfahreranzahl pro Phase
- Bild 3-27: Blockierungszeit und Belegungszeit auf Basis der Messungen und Belegungszeitkurve nach HBS (2015)
- Bild 3-28: Annäherungskurven der gemessenen Blockierungszeit von Furten kürzer bzw. länger als 10 m im Vergleich zur Belegungszeit-Kurve des HBS (2015)
- Bild 4-1: Screenshot aus VISSIM zur Veranschaulichung des Modellaufbaus der Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage
- Bild 4-2: Auszug aus einem Fahrzeugprotokoll
- Bild 4-3: Originales Signalprogramm am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe
- Bild 4-4: Belastung in der Spitzenstunde pro Strom am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neu-Straße in Karlsruhe in 5-Minuten-Intervallen (Grün: Messung, Rot: Simulation)
- Bild 4-5: Signalprogramm der Einmündung Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe im VISSIM-LSA-Editor
- Bild 4-6: Auszug aus den erhobenen Messdaten am Knotenpunkte Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe
- Bild 4-7: Auszug aus dem aufbereiteten Fahrzeugprotokoll des Simulationsmodells des Knotenpunkts Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe
- Bild 4-8: Relative Verteilung der Durchfahrzeit durch den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (ohne Langsamfahrbereiche, unkalibriert)
- Bild 4-9: Relative Verteilung der Durchfahrzeit durch den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (kalibrierte Langsamfahrbereiche)
- Bild 4-10: Relative Verteilung der Durchfahrzeit durch den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe (ohne Langsamfahrbereiche, unkalibriert)
- Bild 4-11: Relative Verteilung der Durchfahrzeit durch den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe (kalibrierte Langsamfahrbereiche)
- Bild 4-12: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (ohne Langsamfahrbereiche, unkalibriert)
- Bild 4-13: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/ Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (kalibrierte Langsamfahrbereiche)
- Bild 4-14: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe (kalibrierte Langsamfahrbereiche)
- Bild 4-15: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe (kalibrierter Stillstandabstand zu statischen Hindernissen)
- Bild 4-16: RMSPE der Zeitbedarfswerte in Abhängigkeit von CC0 und CC1 am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe
- Bild 4-17: Abweichung des mittleren Zeitbedarfswerts in Abhängigkeit von CC0 und CC1 am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe
- Bild 4-18: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe (kalibriert)
- Bild 4-19: Zeitbedarfswerte am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (kalibriert)
- Bild 4-20: Relative Verteilung der Durchfahrzeit durch den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (kalibriert)

- Bild 4-21: Relative Verteilung der Wartezeit (Standzeit in der Warteschlange + Durchfahrzeit) am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe je Fahrstreifen (kalibriert)
- Bild 4-22: Screenshot aus VISSIM zur Veranschaulichung des Modellaufbaus der Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage
- Bild 4-23: Gemessene Zeitlückenverteilungen in fünf Hauptströmen verschiedener Knotenpunkte im Vergleich zur theoretischen Annahme des HBS
- Bild 4-24: Einstellung A: VISSIM-Ergebnisse ohne Kalibrierung im Vergleich zur nach HBS (2015) berechneten Grundkapazität für den rechts einbiegenden Strom 6 an einer Einmündung innerorts
- Bild 4-25: Einstellung B: Zeitlicher Abstand CC1 des W99-Fahrverhaltens auf 1,2 s gesetzt (zum Vergleich: 1,3 s dunklere Kurve)
- Bild 4-26: Einstellung C: Zusätzlich den Parameter „Sichtbarkeit der Strecke“ für die Vorfahrtstraße auf 6 m angepasst
- Bild 4-27: Einstellung D: Nächste Anpassung: Faktor Sicherheitsabstand der Konfliktfläche und Abstimmung der Vorlaufstrecken
- Bild 4-28: Einstellung E: Letzter Anpassungsschritt – leichte Erhöhung der Bandbreite der Wunschgeschwindigkeitsverteilung von 48 km/h bis 58 km/h auf 45 km/h bis 58 km/h
- Bild 4-29: Ergebnis der Kalibrierung in der dem HBS (2015) entsprechenden Darstellung bis zu einer Hauptstrombelastung von 1.600 Kfz/h
- Bild 4-30: Zeitlückenverteilung bei verschiedenen Verkehrsstärken in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (CC1 = 1,3 s)
- Bild 4-31: Zeitlückenverteilung bei verschiedenen Verkehrsstärken in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (CC1 = 0,6 s)
- Bild 4-32: Zeitlückenverteilung bei verschiedenen Verkehrsstärken in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (CC1 = 0,6 s, ohne Verteilung der Geschwindigkeit)
- Bild 4-33: Zeitlückenverteilung bei verschiedenen Verkehrsstärken in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (CC1 = 0,6 s, ohne Verteilung der Geschwindigkeit, zwei sich ergänzende Zuflüsse)
- Bild 4-34: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Konfliktfläche mit Standardparametern; Strom 6 und 7 zu Strom 2)
- Bild 4-35: Abhängigkeit der maximalen Kapazität eines Nebenstroms von der Einstellung „Sichtbarkeit der Strecke“ in VISSIM
- Bild 4-36: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Einstellung der „Sichtbarkeit“ der Konfliktfläche)
- Bild 4-37: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (mit  $t_{\text{queren}} = 2,0$  s)
- Bild 4-38: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (mit  $t_{\text{queren}} = 2,5$  s)
- Bild 4-39: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (mit  $t_{\text{queren}} = 3,0$  s)
- Bild 4-40: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (mit dem als optimal ermitteltem Wert für  $t_{\text{queren}}$  von 2,5 s bzw. 2,9 s)
- Bild 4-41: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Str. 7 zu 3)
- Bild 4-42: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Str. 7 zu 2 und 3)
- Bild 4-43: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Strom 4 zu 2)
- Bild 4-44: Kapazität in der Simulation im Vergleich mit der theoretischen Annahme des HBS (Strom 4 zu Strom 2 und 8)

- Bild 5-1: Vergleich der Wartezeiten zwischen HBS-Verfahren, Simulation und Erhebung am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustr. in Karlsruhe
- Bild 5-2: Vergleich der mittleren Warte- und Verlustzeit aus der Simulation mit der berechneten mittleren Wartezeit nach HBS (2015) am Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neustraße in Karlsruhe
- Bild 5-3: Rückstaulängen bei Freigabezeitende aus Simulation und aus Berechnung nach dem HBS (2015) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads
- Bild 5-4: Definition der Lastfälle in Abhängigkeit des Auslastungsgrades für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage
- Bild 5-5: Vergleich der Wartezeiten zwischen HBS-Verfahren und Erhebung am Knotenpunkt Radeberger Straße/Stolpener Straße in Dresden
- Bild 5-6: Vergleich zwischen berechneter mittlerer Wartezeit nach HBS (2015) und mittlerer Zeit in Warteschlange aus Simulation sowie mittlerer Verlustzeit aus Simulation
- Bild 5-7: Vergleich zwischen berechneter mittlerer Wartezeit nach HBS (2015) und mittlerer Wartezeit aus Simulation in Abhängigkeit der Kapazität für die Stromkonstellation „Strom 6 zu Strom 2“
- Bild 5-8: Vergleich zwischen berechneter mittlerer Wartezeit nach HBS (2015) und mittlerer Wartezeit aus Simulation in Abhängigkeit der Kapazität für die Stromkonstellation „Strom 7 zu Strom 2“
- Bild 5-9: Vergleich zwischen berechneter mittlerer Wartezeit nach HBS (2015) und mittlerer Wartezeit aus Simulation in Abhängigkeit der Kapazität für die Stromkonstellation „Strom 7 zu Strom 2 und 3“
- Bild 5-10: Anpassung der Wartezeitgleichung mit zwei freien Variablen a und b für die Stromkonstellation „Strom 6 zu Strom 2“ bei einer Kapazität von 1.200 Fz/h
- Bild 5-11: Variable a bei Anpassung der Wartezeitgleichung mit zwei freien Variablen a und b in Abhängigkeit der Kapazität
- Bild 5-12: Variable b bei Anpassung der Wartezeitgleichung mit zwei freien Variablen a und b in Abhängigkeit der Kapazität
- Bild 5-13: Anpassung der Wartezeitgleichung mit einer freien Variablen b für die Stromkonstellation „Strom 6 zu Strom 2“ bei einer Kapazität von 1.200 Fz/h
- Bild 5-14: Variable b bei Anpassung der Wartezeitgleichung mit der freien Variablen b in Abhängigkeit der Kapazität
- Bild 5-15: Vergleich der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs aus berechneter mittlerer Wartezeit nach HBS (2015) und aus berechneter mittlerer Wartezeit nach angepasster Wartezeitgleichung in Bezug zu Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs aus mittlerer Wartezeit aus Simulation
- Bild 6-1: Lage der Pegelzählstellen im Stadtgebiet Dresden (Kartenmaterial: © OpenStreetMap-Mitwirkende)
- Bild 6-2: Kompakte Darstellung der Spitzenstundenganglinien einzelner Pegelzählstellen in 15-Minuten-Intervallen
- Bild 6-3: Kompakte Darstellung aller Ganglinien für die Laborbeispiele in 15-Minuten-Intervallen
- Bild 6-4: Spitzenstundenganglinien in verschiedenen Aggregationsstufen der PZS 0506N und 0522N
- Bild 6-5: Häufigkeit der Spitzenstunden im Tagesverlauf, nach stationärem und instationärem Zufluss (Daten Berlin)
- Bild 6-6: Häufigkeit der Profile innerhalb der Spitzenstunden (Daten Berlin)
- Bild 6-7: Skizze des Modellaufbaus der Laborbeispiele
- Bild 6-8: Ganglinien für die Laborbeispiele in 5-Minuten-Intervallen (Rot) und 15-Minuten-Intervallen (Grün) mit Darstellung der stündlichen Verkehrsstärke (Schwarz)

Bild 6-9: Abweichungen der Simulationsergebnisse von den nach HBS (2015) berechneten mittleren Wartezeiten insgesamt

Bild 6-10: Abweichungen der Simulationsergebnisse gegenüber der berechneten Wartezeiten nach HBS (2015) für ausgewählte Beispielganglinien

Bild 6-11: Abweichungen der Instationaritätsfaktoren nach Ganglinie

Bild 6-12: Kurven der sich aus den Simulationsergebnissen ergebenden Grundkapazitäten für die verschiedenen Ganglinienprofile im Hauptstrom

Bild 6-13: Mittlere Verlustzeiten aus der Simulation für die verschiedenen Ganglinienprofile des Hauptstroms im Vergleich

Bild 6-14: Verlustzeiten aus der Simulation bei konstanten Hauptstrombelastungen und Instationarität im Nebenstrom für Nebenstromauslastungen von 100 %, je Ganglinienprofil

Bild 6-15: Verlustzeiten aus der Simulation bei konstanten Hauptstrombelastungen und Instationarität im Nebenstrom für Nebenstromauslastungen von 75 %, je Ganglinienprofil

Bild 6-16: Verlustzeiten aus der Simulation bei konstanten Hauptstrombelastungen und Instationarität im Nebenstrom für Nebenstromauslastungen von 50 %, je Ganglinienprofil

Bild 6-17: Verlustzeiten aus der Simulation bei konstanten Hauptstrombelastungen und Instationarität im Nebenstrom für Nebenstromauslastungen von 110 %, je Ganglinienprofil

Bild 6-18: Verlustzeiten aus der Simulation bei Hauptstrombelastungen mit Profil „Abfall“ und Nebenstromauslastungen von 100 %, je Ganglinienprofil

Bild 6-19: Verlustzeiten aus der Simulation bei Hauptstrombelastungen mit Profil „Anstieg“ und Nebenstromauslastungen von 100 %, je Ganglinienprofil

Bild 6-20: Verlustzeiten aus der Simulation bei Hauptstrombelastungen mit Profil „Spitze“ und Nebenstromauslastungen von 100 %, je Ganglinienprofil

Bild 6-21: Verlustzeiten aus der Simulation bei Hauptstrombelastungen mit Profil „Wanne“ und Nebenstromauslastungen von 100 %, je Ganglinienprofil

## Tabellen

Tab. 2-1: Kendall-Symbolik (Quelle: HELLER und LINDENBERG (1978))

Tab. 2-2: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage der Straßenkategorie LS in Abhängigkeit von der mittleren Wartezeit des betroffenen Fahrstreifens (Signalgruppe) und der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))

Tab. 2-3: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einer Kreuzung bzw. Einmündung ohne Lichtsignalanlage der Straßenkategorie LS in Abhängigkeit von der Art der Vorfahrtregelung der betroffenen Zufahrt und der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))

Tab. 2-4: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einem Kreisverkehr der Straßenkategorie LS in Abhängigkeit von der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))

Tab. 2-5: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage der Straßenkategorie HS und VS in Abhängigkeit von der mittleren Wartezeit des betroffenen Fahrstreifens (Signalgruppe) und der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))

- Tab. 2-6: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einer Kreuzung bzw. Einmündung ohne Lichtsignalanlage der Straßenkategorie HS und VS in Abhängigkeit von der Art der Vorfahrtregelung der betroffenen Zufahrt und der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))
- Tab. 2-7: Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einem Kreisverkehr der Straßenkategorie HS und VS in Abhängigkeit von der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke vor bzw. hinter dem Knotenpunkt (Quelle: BAIER et al. (2015))
- Tab. 3-1: Erhobene Knotenpunkte nach Typ (ohne Nacherhebung)
- Tab. 4-1: Belastung in der Spitzenstunde für den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neu-Straße in Karlsruhe
- Tab. 4-2: Zuflüsse in VISSIM für die erste halbe Stunde für den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neu-Straße
- Tab. 4-3: Routen in VISSIM für die erste halbe Stunde für den Knotenpunkt Ostring/Haid-und-Neu-Straße
- Tab. 4-4: Abweichungen der Grundkapazitätskurven im Kalibrierungsprozess von der nach HBS (2015) berechneten Kurve der Grundkapazität für einen rechtseinbiegenden Nebenstrom an einer Einmündung innerorts
- Tab. 5-1: Vergleichbare Kenngrößen für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage
- Tab. 6-1: Daten der Pegelzählstellendaten Dresden
- Tab. 6-2: Simulationsvarianten für die Laborbeispiele
- Tab. 6-3: Prozentuale Abweichungen der mittleren Wartezeiten in [s/Fz], berechnet nach HBS (2015) in Relation zu den in der Simulation gemessenen Verlustzeiten für die Laborbeispiele
- Tab. 6-4: Kenngrößen der 4 Kombinationen (additive Variante) mit den niedrigsten Abweichungen
- Tab. 6-5: Quadratesummen über die mittleren Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den nach der entsprechenden, zu prüfenden Kombination berechneten Wartezeiten für die verschiedenen Signalprogramm-Zuflussvarianten
- Tab. 6-6: Abweichungen der nach HBS (2015) mit dem Instationaritätsfaktor nach HBS (2015) bzw. dem neu ermittelten Instationaritätsfaktor berechneten mittleren Wartezeiten gegenüber den per Simulation ermittelten in Prozent
- Tab. 6-7: Kenngrößen und Ergebnisse für alle Laborbeispiele, sortiert nach Beispielganglinien
- Tab. 6-8: Abweichungen der aus den Simulationsergebnissen berechneten Grundkapazitätskurven zur HBS-Grundkapazitätskurve nach Ganglinienprofil
- Tab. 6-9: Abweichungen verschiedener Ganglinienprofile im Hauptstrom auf Basis der Ergebnisse konstanten Zuflusses
- Tab. 6-10: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses
- Tab. 6-11: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten aus der Simulation gegenüber den nach HBS berechneten Wartezeiten
- Tab. 6-12: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 100 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.200 Kfz/h
- Tab. 6-13: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 100 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.800 Kfz/h

---

Tab. 6-14: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 50 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.200 Kfz/h

Tab. 6-15: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 50 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.800 Kfz/h

Tab. 6-16: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 75 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.200 Kfz/h

Tab. 6-17: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 75 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.800 Kfz/h

Tab. 6-18: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 110 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.200 Kfz/h

Tab. 6-19: RMSPE der einzelnen Abweichungen der Verlustzeiten der Ganglinienprofile gegenüber dem Fall konstanten Nebenstromzuflusses bei 110 % Nebenstrombelastung über die Spanne der Hauptstrombelastungen bis 1.800 Kfz/h

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2016

#### 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, Vettters, 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

#### V 290: Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 19,00

#### V 291: Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 18,50

#### V 292: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw

Burg, Schrempp, Röhling, Klaas-Wissing, Schreiner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 293: Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen

Geistefeldt, Hohmann, Estel  
Unterauftragnehmer: Manz € 17,50

#### V 294: Wirtschaftlichkeitsbewertung besonderer Parkverfahren zur Lkw-Parkkapazitätserhöhung an BAB

Maibach, Tacke, Kießig € 15,50

#### V 295: Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss

Grotehusmann, Lambert, Fuchs, Graf € 16,50

#### V 296: Parken auf Rastanlagen mit Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Übergröße

Lippold, Schemmel, Kathmann, Schroeder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 297: Sicherheitstechnische Überprüfung von Elementen plangleicher Knotenpunkte an Landstraßen

Zimmermann, Beeh, Schulz, Roos

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 298: Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalysensysteme

Balck, Schüller, Balmberger, Rossol

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 299: Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen

Schwietering, Neumann, Volkenhoff, Fazekas, Jakobs, Oeser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

#### V 300: Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten

Werkenthin, Kluge, Wessolek

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 301: Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung

Kemper, Sümmermann, Baier, Klemps-Kohnen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 302: Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB

Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 303: Psychologische Wirkungen von Arbeitsstellenlängen, -staffelung und -gestaltung auf die Verkehrsteilnehmer

Scotti, Kemper, Oeser, Haberstroh, Welter,

Jeschke, Skottke € 19,50

V 304: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015**  
Fitschen, Nordmann € 31,00  
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter:  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de) heruntergeladen werden. € 15,00

V 305: **Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen**  
Hartmann, Londong € 16,00

V 306: **Anpassung des bestehenden Straßennetzes an das Entwurfskonzept der standardisierten Straßen – Pilotprojekt zur Anwendung des M EKLBest**  
Lippold, Wittig  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 307: **Evaluation des Sicherheitsaudits von Straßen in der Planung**  
Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Bark, Beaulieu, Theis € 17,50

V 308: **Überarbeitung und Aktualisierung des Merkblattes für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 1999)**  
Gerstenberger, Hösch, Listl, Schwietering  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 309: **Photokatalytische Oberflächen zur Minderung von Stickoxidbelastungen an Straßen – TiO<sub>2</sub>-Pilotstudie Lärmschutzwand**  
Baum, Lipke, Löffler, Metzger, Sauer € 16,50

V 310: **Umweltfreundlicher Straßenbelag – photokatalytischer Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie**  
Wang, Oeser, Steinauer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 311: **Feldversuch mit Lang-Lkw**  
Irzik, Kranz, Bühne, Glaeser, Limbeck, Gail, Bartolomaeus, Wolf, Sistenich, Kaundinya, Jungfeld, Ellmers, Kübler, Holte, Kaschner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 312: **Sicherheitswirkung, Dauerhaftigkeit und Lärmemission von eingefrästen Rüttelstreifen**  
Hegewald, Vesper, Irzik, Krautscheid, Sander, Lorenzen, Löffler, Ripke, Bommert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2019

V 313: **Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen**  
Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50

V 314: **Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten**  
Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50

V 315: **Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung**  
Kappich, Westermann, Holst € 15,50

V 316: **Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände**  
Lindner, Hartmann, Schulze, Hübelt € 18,50

V 317: **Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen**  
Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Walther € 22,00

V 318: **Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen**  
Wolf, Berger, Bärwolff 15,50

V 319: **Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen**

Lippold, Veters, Ressel, Alber  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 320: **Einsatzbereiche und Entwurfs Elemente von Rad-schnellverbindungen**  
Malik, Lange, Andriesse, Gwiasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden € 18,00

V 321: **Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**  
Diegmann, Wursthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner in Vorbereitung

V 322: **Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren**  
Hausmann € 18,00

V 323: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2016**  
Fitschen, Nordmann € 31,50  
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter:  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de) heruntergeladen werden. € 15,00

## 2020

V 324: **Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA**  
Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckließ, Schimpf, Schmotz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.