

# **Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 369**

**bast**

# Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen

von

Fritz Busch  
Georgios Grigoropoulos  
Heather Kathis

Lehrstuhl für Verkehrstechnik  
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt  
Technische Universität München

Michael M. Baier  
Angelika Reinartz  
Lamia Schuckließ

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

Marek Junghans  
Leonhard Lücken

Institut für Verkehrssystemtechnik  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Berlin

Axel Leonhardt

Hohen Neuendorf

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 369**

**FoPS** | Verbesserung der  
Verkehrsverhältnisse  
der Gemeinden  
FORSCHUNGSPROGRAMM STADTVERKEHR

**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 Kommunikation.

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 Kommunikation.

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

## Impressum

### Bericht zum Forschungsprojekt 70.0925

Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen

Das Projekt wurde im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur im Rahmen des Forschungsprogramms Stadtverkehr (FoPS; [www.fops.de](http://www.fops.de)) durchgeführt.

### Fachbetreuung

Caroline Rose  
Jan Schappacher

### Referat

Verkehrsbeeinflussung und Straßenbetrieb

### Herausgeber

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

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

### 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 978-3-95606-727-3

Bergisch Gladbach, Februar 2023

## Kurzfassung – Abstract

### Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen

Radverkehr ist ein wichtiger Teil eines städtischen Gesamtverkehrskonzepts und Lichtsignalanlagen sind unverzichtbare Einrichtungen in städtischen Straßennetzen zur Steuerung des Verkehrsablaufs. Ziel dieses Forschungsprojekts war es, den Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen zu analysieren und darauf aufbauend praxistaugliche Ergänzungen für das Berechnungsverfahren nach dem HBS 2015 zu entwickeln. Zur Analyse des Verkehrsablaufs wurden empirische Untersuchungen des Fahrverhaltens an ausgewählten Knotenpunkten in Berlin, Freiburg und München durchgeführt. Dazu wurden das Verhalten und insbesondere Fahrprofile von Radfahrern aus Videobeobachtungen mit Verfahren der automatischen Bildverarbeitung erhoben und zu Kenngrößen, wie beispielsweise Beschleunigungsfunktionen und Zeitbedarfswerten, weiterverarbeitet. Diese Kenngrößen waren die Grundlage für die Kalibrierung und die Validierung von mikroskopischen Simulationsmodellen, die zur Erzeugung von weiteren Daten für die Entwicklung der Berechnungsverfahren genutzt wurden. Insgesamt wurden vier Simulationsszenarien untersucht, wobei Radverkehrsstärken, Kfz-Verkehrsstärken, Umlaufzeiten und Freigabezeitanteile systematisch variiert wurden. Auf Basis der Ergebnisse der Empirie und Simulationsuntersuchungen wurden Ergänzungen für das bestehende Berechnungsverfahren abgeleitet. Für den Radverkehr auf eigenen Radverkehrsanlagen wurden Zeitbedarfswerte (zur Ermittlung von Kapazitäten) in Abhängigkeit der Breite der Radverkehrsanlage ermittelt. Für den Kfz-Verkehr wurde der Einfluss des Radverkehrs für folgende Konstellationen formal beschrieben: Behinderung von geradeausfahrenden Kfz durch Radverkehr auf aufgeweiteten Radaufstellstreifen, Belegungszeit der Furt durch Radfahrer bei bedingt verträglich rechtsabbiegenden Kfz und das Durchsetzen von entgegenkommenden Radfahrern durch bedingt verträglich linksabbiegende Kfz.

### Traffic flow at signalised intersections with high bicycle traffic volumes

Bicycling is an important part of an overall urban transport concept and traffic signals are indispensable in urban road networks to control traffic flow. The aim of this research project is to analyse the traffic flow at signalised intersections with a high number of bicyclists and, based on this, to develop practicable additions for the calculation procedure of the HBS 2015. To analyse the traffic flow, empirical studies of bicyclist behaviour were carried out at selected intersections in Berlin, Freiburg and Munich. Trajectories from road users are extracted from video data using of automatic image processing methods and are further processed to calculate parameters such as acceleration and time requirement values. These parameters are the basis for the calibration and validation of microscopic traffic simulation models used to generate further data for the development of the calculation methods. In total, four simulation scenarios were examined with systematic variation of the bicycle traffic volumes, vehicle traffic volumes, cycle times and green time shares. On the basis of the empirical and simulation results, extensions and adjustments to the existing calculation method are derived. For bicycle traffic on bicycle specific facilities, the time requirements (to determine capacities) are determined as a function of the width of the bicycle traffic facility. For the motor vehicle traffic, the influence of bicycle traffic is described for the following configurations: Impeding of straight-moving motor vehicles by bicycle traffic on bicycle boxes, occupancy time of conflict area by bicyclists with partially conflicting right-turning vehicle streams and the crossing of oncoming bicycle traffic streams by partially conflicting left-turning motor vehicle streams.

## Summary

### Traffic flow at signalised intersections with high bicycle traffic volumes

#### 1 Introduction

Bicycling is an important part of an urban transportation system and traffic signals are indispensable in urban road networks to control traffic flow. Depending on the type of bicycle infrastructure and the volume of bicycle traffic, the capacity and traffic quality for all types of road users can be influenced to varying degrees at signalised intersections.

In general, bicycle infrastructure can be categorised into four groups; bicycle traffic in the mixed traffic on the road with or without protective lane markings, bicycle lanes on the roadway, separated bicycle lanes and shared bicycle and pedestrian facilities (or pedestrian facilities that are open to bicyclists). The last two categories are not relevant with regard to high volumes of bicycle traffic as they should only be used in situations with low traffic demand.

The traffic quality at signalised intersections is assessed using the “Manual for the Design of Road Traffic Facilities” (HBS<sup>1</sup>). The quality indicator is the waiting time. This indicator is, however, not used uniformly for motor vehicle and bicycle traffic. While the average waiting time on a traffic lane is decisive for motor vehicle traffic, the maximum waiting time for a complete crossing is used for bicyclists (and pedestrians). This also applies to bicycle traffic when bicyclists ride on the road together with the motor vehicle traffic.

Overall, several points for further investigation and additions to the current calculation method are noted in the HBS, including:

- Time requirements and capacities for bicycle traffic on bicycle specific facilities (bicycle paths and bicycle lanes)
- Use of bicycle boxes
- On road bicycle traffic with mixed streams with and without protective lane markings

- Partially compatible left turn (motor vehicle traffic parallel with bicycle traffic, motor vehicle crossing bicycle traffic)
- Indirect left turn of bicyclists

The aim of this research project is to analyse the traffic flow at signalised junctions with large volumes of bicycle traffic and, based on the results, to develop practicable additions for the calculation method in the HBS 2015. Furthermore, the application limits of various infrastructure forms and signalisation methods are to be determined and demonstrated.

#### 2 Methodology

As part of the initial analyses, a review of research examining the behaviour of bicyclists, in particular at intersections, was carried out. The research encompasses the most important findings from the scientific literature regarding the operational and tactical behaviour of bicyclists. Study cases are then defined based on German guideline including the “Guidelines for Urban Road Design” (RASt), the “Recommendations for Bicycle Facilities” (ERA), the “Guidelines for Traffic Signals” (RiLSA) and “Recommendations for Bicycle Traffic Control” (HSRa) as well as knowledge gained from practical experience and through the literature review.

For the analysis of the traffic flow, empirical studies of bicyclist behaviour are carried out at eight intersections (two in Berlin, two in Freiburg and four in Munich). The trajectories of bicyclists are extracted from video data using automatic image processing methods and are further processed to calculate the following parameters:

- Desired speed
- Acceleration profiles
- Dissipation and start up times
- Queue density
- Occupancy times of approaches and bicycle boxes
- Queuing behaviour

These findings provide the basis for the calibration and validation of microscopic traffic simulation

<sup>1</sup> Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen

models used to generate data for the development of the calculation methods.

The simulations were carried out with the microscopic traffic simulation software PTV Vissim. The driving behaviour of the simulated bicyclists was calibrated and validated using the results from the empirical studies and additionally on the basis of externally obtained findings (literature). In a first step, the acceleration behaviour, the desired speeds and the queue behaviour (lateral position) were parameterised according to the collected data. The validation of the bicyclist behaviour was performed based on the empirically determined queue densities, the mean dissipation and start-up times and the occupancy time. The motor vehicle traffic was calibrated to reproduce the time requirements and the capacities for a given signal plan according to the HBS for vehicles turning right, turning left and crossing straight. In this way, an HBS-compliant simulation without bicycle traffic serves as a base case. Finally, the empirically observed influence of bicycle traffic on motor vehicle traffic was taken into account for the partially conflicting right turn of motor vehicles crossing a bicycle stream. This was accomplished using the average dissipation time of the first vehicle turning right for the validation of the simulation models.

A total of four simulation scenarios were examined, with the systematic variation of bicycle traffic volumes, vehicle traffic volumes, cycle times and green time shares. The examined parameter was the capacity, since this parameter is also decisive for determining saturation, waiting time, queue length and the level of service in the HBS.

### 3 Results

The simulation results show the relationship between bicycle traffic volume on one hand and capacities for the impacted vehicle flows on the other hand.

#### **Scenario 1: Capacity of right-turning motor vehicles with a parallel crossing bicycle traffic stream**

The capacity of right-turning vehicle streams is expected to decrease with increasing volumes of bicycle traffic, but to a lesser extent at high bicycle traffic volumes. With regard to signal control, the capacity is mainly influenced by the green time share. However, it can also be observed that the

cycle time has an influence on the capacity with increasing bicycle traffic volumes. The influence of the cycle time is dependent on the amount of space between stop line and bicycle crossing because waiting vehicles can complete their manoeuvres during the phase change.

#### **Scenario 2: Capacity of partially conflicting left-turning motor vehicles with oncoming motor vehicle and bicycle traffic stream**

The capacity of the vehicle traffic turning left is strongly impacted by the oncoming bicyclist and motor vehicle traffic travelling straight across the intersection. Comparison of the simulation results shows that the green time share has a major influence on the capacity. The cycle time also has an effect that increases with increasing traffic of oncoming motorists and bicyclists. The longer the cycle time, the lower the capacity is for the same green time share (the phase change has a large influence on the capacity).

#### **Scenario 3: Capacity of crossing motor vehicles with a crossing bicycle traffic stream using a bicycle box**

Results show that the capacity of the motor vehicle stream is relatively independent of the volume of bicyclists riding straight. This result is due to bicyclists' (observed and thus simulated) driving behaviour, in which bicyclists riding straight mainly position themselves on the right side of the bicycle box. For this reason, vehicle traffic is generally affected minimally. In the event of high bicycle traffic volumes, the bicyclists on the right side of the bicycle box form a queue, preventing additional bicyclists from entering the bicycle box and avoiding additional bicyclist-related influence on motor vehicle traffic.

#### **Scenario 4: Capacity of partially conflicting left-turning motor vehicles over a bicycle box with a partially conflicting left-turning bicycle traffic stream**

The capacity of the motor vehicle streams decreases as the number of left-turning bicyclists increases. Since the left-turning bicyclists position themselves in front of the vehicles in the bicycle box, the capacity of the left-turning vehicle depends on the time-gap acceptance of the left-turning cyclists. Thus, with increasing volumes of the oncoming traffic, smaller time gaps are expected leading to an additional reduction in capacity.

### 3 Conclusions for practical application

The aim of this research project is to investigate the traffic flow at signalised intersections with high volumes of bicycle traffic and, based on this, to review the existing calculation methods for determining the traffic quality and, where appropriate, to adapt or supplement this method.

Simulation models were used to generate data for adapting and extending the calculation methods because empirical studies could not cover all situations or the entire range of relevant vehicle and bicycle traffic volumes. Microscopic traffic simulation has proved to be a very useful tool for generating data for the adaptation and extension of the existing calculation methods. On one hand, the driving behaviour of the simulated bicyclists and the motor vehicles can be parameterised in detail. On the other hand, the data required for the calculation methods can be generated and output relatively directly. Future empirical findings can be used to further calibrate the simulation models. While detailed information is available for the speed, acceleration profile, and the queuing and dispersion behaviour of bicyclists, there is still a lack of knowledge concerning the time gap acceptance (bicyclists moving through motor vehicle traffic and vice versa).

Based on the empirical and simulation results, approaches for several additions and / or adjustments of the calculation procedure in the HBS are provided. Procedural adjustments or additions are derived for the following aspects:

- Bicycle traffic on bicycle specific facilities (bicycle paths and bicycle lanes)
- Consideration of the influence of queued or crossing bicyclists using a bicycle box in front of motor vehicles
- Consideration of the influence of bicyclists traveling directly next to motor vehicle traffic on the capacity of the right-turning motor vehicle traffic stream
- Consideration of the influence of bicyclists in oncoming traffic on the capacity of the left turning motor vehicle traffic stream.

The findings from the empirical and the simulation studies were taken into account in the development of the calculation method. Several additions and / or

adjustments were made to the calculation method of the HBS.

#### **Time requirements of bicycle traffic on bicycle specific infrastructure**

The capacity of a bicycling facility can be determined analogous to the capacity of motor vehicle traffic with unobstructed outflow based on the time requirement values and green time share. This is important because at high volumes of bicycle traffic, it is possible that a queue of bicyclist sat the end of the green phase. On the basis of the empirical data, the mean time requirement values and adaptation factors were determined as a function of the width of the bicycle facility.

#### **Obstruction of motor vehicles crossing straight by bicyclists on a bicycle box**

If a bicycle box is present, a small effect of the capacity of the motor vehicle traffic first appears at a bicycle traffic volume of 100 bicycles/h. As a derived approach, it is proposed to set a time reduction of -1 s for bicycle traffic volumes >100 bicycles/h (no reduction for bicycle traffic volumes ≤100 bicycles/h).

#### **Occupancy time of the conflicting area by bicyclists with partially conflicting right-turning motor vehicle streams**

The simulation results show that the capacity of the motor vehicle traffic depends on the bicycle traffic volume on the adjacent facility as well as the green time share for the motor vehicle traffic. A factor for the reduction of the capacity of the motor vehicle traffic with unobstructed outflow was derived based on this result.

#### **Effect of oncoming bicyclists on partially conflicting left-turning vehicle traffic**

As the simulation results show, the motor vehicle and bicycle traffic volumes in oncoming traffic have a considerable influence on the capacity of the partially conflicting left-turning motor vehicle traffic stream. Therefore, the capacity reduction for motor vehicle traffic by motorists and bicyclists in oncoming traffic is directly dependent on these two traffic volumes. For this purpose, a conversion into car units with 0.75 bicycle = 1 car unit takes place. The reduction factor is derived from the traffic volume in oncoming traffic and depending on the green time share.

No concrete recommendation for the extension or revision of the calculation method could be made concerning:

- Bicycle traffic in the mixed traffic with and without protective road marking and effects of bicyclists passing the motor vehicle queue on the right side
- The influence of pedestrians on the flow of right and left turning bicycle traffic streams.
- Indirect left turning manoeuvres of bicyclist

Here, only hints could be given that can be examined further in future research project.





## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	11	3.3.8	Belegungszeit Aufstellbereich für indirekt linksabbiegende .....	38
1.1	Ausgangslage .....	11	3.3.9	Einfluss bedingt verträglich linksabbiegender Radfahrer auf bedingt verträglich linksabbiegende Kfz .....	38
1.2	Zielsetzung.....	12	3.3.10	Taktisches Verhalten .....	39
1.3	Vorgehensweise .....	12	<b>4</b>	<b>Mikroskopische Verkehrssimulation</b> .....	42
<b>2</b>	<b>Grundlagenanalyse</b> .....	12	4.1	Vorgehen.....	42
2.1	Stand der Technik .....	13	4.1.1	Simulationsmodelle.....	42
2.1.1	Wunschgeschwindigkeiten.....	13	4.1.2	Kalibrierung und Validierung des Modells .....	43
2.1.2	Beschleunigung .....	14	4.1.3	Validierung des Kfz-Verkehrs.....	48
2.1.3	Taktisches Fahrverhalten .....	15	4.1.4	Simulationsszenarien.....	48
2.1.4	Akzeptanz von Zeitlücken .....	17	4.2	Ergebnisse .....	50
2.2	Untersuchungsfälle .....	18	<b>5</b>	<b>Berechnungsverfahren</b> .....	54
2.3	Analyse des bestehenden Berechnungsverfahrens im HBS.....	19	5.1	Führung des Radverkehrs auf eigenen Radverkehrsanlagen .....	54
<b>3</b>	<b>Empirische Untersuchungen</b> .....	21	5.2	Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen .....	55
3.1	Untersuchungsknotenpunkte .....	21	5.3	Anordnung von aufgeweiteten Radaufstellstreifen .....	56
3.1.1	Auswahl der Untersuchungsknotenpunkte .....	21	5.4	Bedingt verträgliche Rechtsabbiegerströme.....	56
3.1.2	Beschreibung der Untersuchungsknotenpunkte .....	22	5.4.1	Rechtsabbiegender Radverkehr .....	56
3.2	Datenerhebung .....	27	5.4.2	Rechtsabbiegender Kfz-Verkehr .....	56
3.2.1	Allgemeine Randbedingungen.....	27	5.5	Bedingt verträgliche Linksabbiegerströme .....	58
3.2.2	Durchführung der Erhebungen .....	27	5.5.1	Linksabbiegender Radverkehr .....	58
3.2.3	Extraktion von Trajektorien aus dem Videomaterial .....	29	5.5.2	Linksabbiegender Kfz-Verkehr .....	58
3.2.4	Vorgehensweise zur Ermittlung verkehrsablaufbezogener Kenngrößen.....	29	5.6	Indirektes Linksabbiegen von Radfahrern .....	59
3.3	Datenauswertung.....	30	5.6.1	Linksabbiegender Radverkehr .....	60
3.3.1	Beschleunigungsverhalten .....	30	5.6.2	Abfluss des kreuzenden bzw. einbiegenden Kfz-Verkehrs .....	60
3.3.2	Mittlere Maximale Geschwindigkeit.....	32	<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	60
3.3.3	Dichte im Stand.....	33			
3.3.4	Mittlerer Zeitbedarfswert der Radfahrer ....	34			
3.3.5	Zeitbedarfswerte des ersten abfließenden Radfahrers .....	35			
3.3.6	Belegungszeit Radfahrerfurt .....	36			
3.3.7	Belegungszeit ARAS.....	37			

6.1	Vorgehensweise .....	60
6.2	Ergebnisse .....	62
6.3	Offene Punkte .....	62
	<b>Literatur</b> .....	63
	<b>Bilder</b> .....	64
	<b>Tabellen</b> .....	67
	<b>Anhang</b> .....	69

# 1 Einführung

## 1.1 Ausgangslage

Radverkehr ist ein wichtiger Teil eines städtischen Gesamtverkehrskonzepts und Lichtsignalanlagen sind unverzichtbare Einrichtungen in städtischen Straßennetzen zur Steuerung des Verkehrsablaufs an plangleichen Knotenpunkten. In Abhängigkeit von Führung und Stärke des Radverkehrs können die Kapazität und Verkehrsqualität aller Verkehrsarten an signalisierten Knotenpunkten unterschiedlich stark beeinflusst werden. Die Einbindung des Radverkehrs an signalisierten Knotenpunkten erfolgt dabei auf der Basis der RiLSA (FGSV, 2015b) ergänzt durch die HSRa (FGSV, 2005). Die möglichen (entwurfstechnischen) Fälle der Radverkehrsführung im Bereich von Knotenpunkten, d. h. in den Knotenpunktzufahrten, im Knotenpunktinnenbereich und auch in den Knotenpunktausfahrten, sind in den RASt (FGSV, 2006b) bzw. den ERA (FGSV, 2010) geregelt.

Grundsätzlich zu differenzieren sind Führungen des Radverkehrs im Mischverkehr auf der Fahrbahn mit und ohne Schutzstreifen, auf Radfahrstreifen, auf (fahrbahnbegleitenden) Radwegen, auf gemeinsamen Geh- und Radwegen sowie auf Gehwegen mit Freigabe für den Radverkehr (Radfahrer frei). Die beiden letztgenannten Fälle sind im Hinblick auf ein hohes Radverkehrsaufkommen nicht relevant, da sie nur in Situationen mit geringer Radverkehrsbelastung zum Einsatz kommen sollen (FGSV, 2006b). Bei Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen wird der Radverkehr gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr signalisiert. Bei Führung auf Radfahrstreifen ist sowohl eine Signalisierung mit dem Kfz-Verkehr als auch eine gesonderte Signalisierung für Radfahrer möglich. Bei Führung des Radverkehrs auf Radwegen sind eigene Signale für Radfahrer oder eine gemeinsame Signalisierung mit Fußgängern möglich.

Die Beurteilung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage erfolgt mit dem Verfahren des HBS (FGSV, 2015a). Als Qualitätskriterium dient dabei die Wartezeit, wobei diese allerdings nicht einheitlich für Kfz- und Radverkehr zugrunde gelegt wird. Während für den Kfz-Verkehr die mittlere Wartezeit auf einem Fahrstreifen maßgebend ist, gilt für den Radverkehr (wie auch für Fußgänger) als Kriterium die maximale Wartezeit, die auf die vollständige Querung einer Zufahrt bezogen ist. Dies gilt für den Radverkehr auch dann,

wenn er auf der Fahrbahn gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr geführt wird. Dieser Bewertungsansatz stellt eine wesentliche Änderung gegenüber dem HBS (FGSV, 2001) dar, indem auch für den Radverkehr die mittlere Wartezeit zugrunde gelegt wurde.

Die mittlere Wartezeit im Kfz-Verkehr setzt sich zusammen aus der Grundwartezeit, die aus dem periodischen Wechsel zwischen Freigabezeit und Sperrzeit resultiert und der Rückstauwartezeit, die aus dem Rückstau resultiert (Fahrzeuge, die bis zum Ende der Freigabezeit nicht abfließen können). Die maximale Wartezeit des Radverkehrs entspricht seiner Sperrzeit.

Damit kann bei der Betrachtung der Verkehrsqualität an einem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage das Radverkehrsaufkommen für die Bewertung der Verkehrsqualität maßgebend werden. So sind bei der Anwendung der neuen Qualitätsbewertung nach dem HBS (FGSV, 2015a) in der Praxis bereits Fälle aufgetreten, dass an einem Knotenpunkt die Verkehrsqualität insgesamt mit einer nicht ausreichenden Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs (QSV) bewertet wurde. Für den Kfz-Verkehr konnte durch Optimierung der Signalsteuerung zwar für alle Ströme eine QSV D (entspricht einer ausreichenden Verkehrsqualität) oder besser erreicht werden, für den Radverkehr aber nur die QSV E (entspricht einer nicht ausreichenden Verkehrsqualität). Hintergrund ist, dass für den Radverkehr bei einer Umlaufzeit von 90 s mindestens eine Freigabezeit von 20 s erforderlich ist, um die QSV D zu erreichen. Dies ist selbst bei einer gemeinsamen Signalisierung mit dem Kfz-Verkehr oftmals nicht realisierbar, insbesondere in (bezogen auf den Kfz-Verkehr) geringer belasteten Zufahrten.

Zudem sind im Berechnungsverfahren des HBS (FGSV, 2015a) auch nicht alle nach den RASt (FGSV, 2006b) bzw. den ERA (FGSV, 2010) vorgesehenen Fälle der Radverkehrsführung enthalten und das vorhandene Verfahren ist nicht für hohes Radverkehrsaufkommen ausgelegt. Aufgeweitete Radaufstellstreifen (ARAS) werden gar nicht behandelt. Für den Mischverkehr auf der Fahrbahn wird kein klares Verfahren vorgegeben, da die Verkehrsstärke des Radverkehrs im Mischstrom nicht berücksichtigt wird. Dadurch können die Kapazität und die Wartezeiten der einzelnen Verkehrsströme nicht genau geschätzt werden. Die Bemessung und Verkehrsqualitätsbewertung von signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen sind demnach nicht möglich.

## 1.2 Zielsetzung

Berechnungsverfahren sind erforderlich, mit denen sowohl die Kapazität von lichtsignalgeregelten Knotenpunkten mit hohen Radverkehrsstärken ermittelt als auch die Verkehrsqualität (des Kfz- und des Radverkehrs) für unterschiedliche Radverkehrsführungen und Signalisierungen (FGSV, 2015a) für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage für hohes Radverkehrsaufkommen angepasst bzw. erweitert werden. Für einige Radverkehrsführungs- und Signalisierungsformen müssen dabei neue Ansätze entwickelt werden, mit denen der Radverkehr bei der Berechnung z. B. der Sättigungsverkehrsstärke und in folgedessen auch der Kapazität und der Wartezeit genauer behandelt werden kann.

Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, im Ergebnis entsprechende praxistaugliche Berechnungsverfahren für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage bereitzustellen. Des Weiteren sind die Einsatzgrenzen verschiedener Führungs- und Signalisierungsformen zu ermitteln und aufzuzeigen. Die Anpassung bzw. Ergänzung des Verfahrens zur Bemessung und Verkehrsqualitätsbewertung von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage erfolgt auf der Grundlage von empirischen Untersuchungen und Simulationsuntersuchungen.

## 1.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise gliedert sich wie folgt:

- Grundlagenanalyse (Kapitel 2): Recherche des Stands von Wissenschaft und Technik zu empirischen Untersuchungen des Fahrverhaltens von Radfahrern.
- Empirische Untersuchungen (Kapitel 3): Auswahl von Untersuchungsknotenpunkten, Verfahren zur Videodatenerhebung, Auswahl der maßgebenden Kenngrößen und Auswertung der empirischen Daten.
- Simulationsuntersuchungen (Kapitel 4): Vorgehen und Auswertung der Simulationsergebnisse.
- Ansätze zur Anpassung und Ergänzung der Berechnungsverfahren (Kapitel 5): Aufzeigen von Ansätzen für Anpassungen und/oder Ergänzungen des Verfahrens aufbauend auf den empirischen Erkenntnissen und den Simulationsergebnissen mit Hinweisen zur Integration in das HBS.

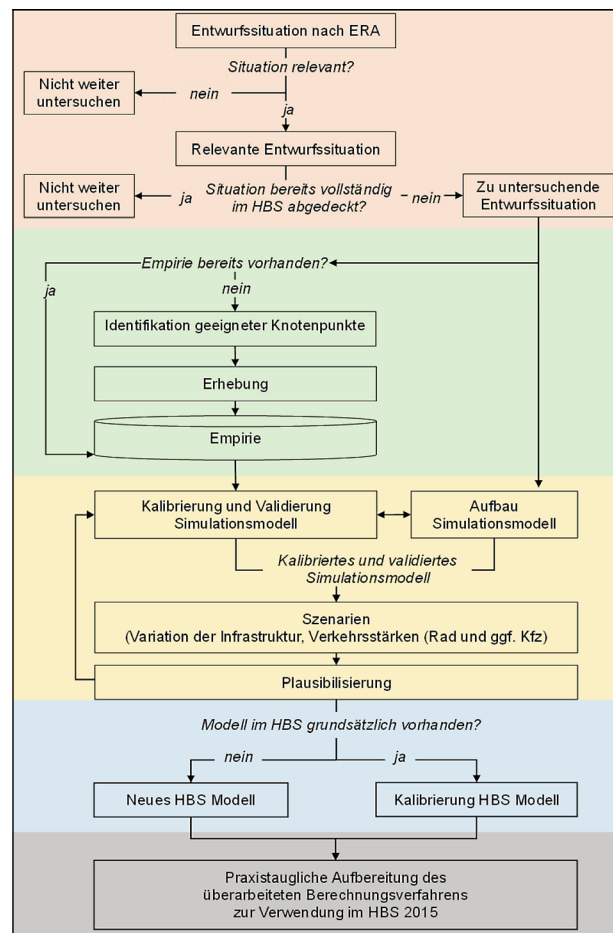


Bild 1-1: Methodische Vorgehensweise und Arbeitsschritte

Die sich hieraus ergebenden erforderlichen Arbeitsschritte sind in Bild 1-1 im Zusammenhang dargestellt.

Abschließend erfolgt eine bewertende Zusammenfassung und es wird der weitere Untersuchungsbedarf aufgezeigt (Kapitel 6).

## 2 Grundlagenanalyse

Im Rahmen der Grundlagenanalyse erfolgte zunächst eine Recherche des Stands von Wissenschaft und Technik zu empirischen Untersuchungen des Fahrverhaltens von Radfahrern, insbesondere an Knotenpunkten (Kapitel 2.1).

Kapitel 2.2 beschreibt die Aufbereitung und Darstellung der möglichen Radverkehrsführungen und -signalisierungen auf Grundlage der entwurfstechnischen Lösungen der RAS<sub>t</sub> (FGSV, 2006b) und der ERA (FGSV, 2010) sowie den signaltechnischen Lösungen der RiLSA (FGSV, 2015b) und der HSRa (FGSV, 2005). Ergänzend werden realisierte Bei-

Studie	Median ( $V_{50}$ )	Perzentile	Ort	Einflussgröße
ANGENENDT, BLASE & KLÖCKNER, 2005	18 km/h	$V_{10} = 12$ km/h $V_{90} = 24$ km/h	verschiedene Städte in Deutschland	-
COWI, 2013	22 km/h	$V_{10} = 17$ km/h $V_{90} = 29$ km/h	Kopenhagen (Dänemark)	Längsneigung, Fahrradtyp, Kurvenfahrt
FLEISCHMANN, 1983	17 km/h	$V_{10} = 12$ km/h $V_{90} = 25$ km/h	unbekannt	Verkehrszweck, Alter
OHM et al. , 2010	20 km/h	$V_{10} = 15$ km/h $V_{90} = 25$ km/h	verschiedene Städte in Deutschland	-
OPIELA, KHASNABIS & DATTA, 1980	21 km/h	$V_{10} = 16$ km/h $V_{90} = 27$ km/h	verschiedene Städte in den USA	Art der Verkehrsanlage
PARKIN & ROTHERAM, 2010		$V_{85} = 22$ km/h	Leeds (England)	Längsneigung, Rückenwind
FE 70.0925/2015	19 km/h	$V_{10} = 13$ km/h $V_{90} = 24$ km/h	München, Berlin	Art der Verkehrsanlage

Tab. 2-1: Studien zur Wunschgeschwindigkeit von Radfahrern – Überblick. (Teilweise wurden  $V_{50}$ ,  $V_{10}$  und  $V_{90}$  nicht explizit angegeben. In diesen Fällen wurden die Werte aus den dargestellten Verteilungen geschätzt.)

Studie	Längsneigung	Größe	Wert
COWI 2013	2 %	$V_{50}$	13 km/h
	-2 %	$V_{50}$	27 km/h
PARKIN und ROTHERAM 2010	5 %	$V_{85}$	14 km/h
	2 %	$V_{85}$	16 km/h
	-2 %	$V_{85}$	23 km/h
	-5 %	$V_{85}$	26 km/h

Tab. 2-2: Einfluss der Längsneigung auf die Wunschgeschwindigkeit von Radfahrern

Studie	Art der Anlage	Größe	Wert
OPIELA et al. 1980	Radweg	Arithmet. Mittel	20 km/h
	Breiter Radfahrstreifen	Arithmet. Mittel	25 km/h
	Nutzung des Gehwegs	Arithmet. Mittel	19 km/h
	Mischverkehr auf Fahrbahn	Arithmet. Mittel	19 km/h
FE 70.0925/2015	Radweg	$V_{50}$	22 km/h
	Radfahrstreifen	$V_{50}$	18 km/h
	Radfahrstreifen	$V_{50}$	21 km/h
	Mischverkehr auf Fahrbahn	$V_{50}$	16 km/h

Tab. 2-3: Einfluss der Art der Radverkehrsanlage auf die Wunschgeschwindigkeit von Radfahrern

spiele, die von den Vorgaben bzw. Empfehlungen des Regelwerks abweichen, sich aber in der Praxis durchaus bewährt haben, einbezogen.

In Kapitel 2.3 werden die einzelnen Schritte des Berechnungsverfahrens des HBS (FGSV, 2015a) dahingehend analysiert, wo und in welcher Form eine (bessere) Berücksichtigung des Radverkehrs erfolgen könnte. Basis hierfür sind die bereits zuvor dar-

gestellten ersten Überlegungen. Des Weiteren werden im Rahmen einer Literaturrecherche bestehende Ansätze, auch aus dem internationalen Bereich, analysiert.

## 2.1 Stand der Technik

### 2.1.1 Wunschgeschwindigkeiten

Die Wunschgeschwindigkeit (oder freie Geschwindigkeit) von Radfahrern wurde in verschiedenen Studien analysiert. Neben der mittleren Wunschgeschwindigkeit wurden auch Abhängigkeiten von Einflussgrößen (z. B. Längsneigung, Personengruppen) und die Streuung (z. B. in Form von Histogrammen oder Perzentilen) bestimmt. Tabelle 2-1 zeigt einen Überblick über einige einschlägige Untersuchungen.

Die in den Studien (inklusive der vorliegenden) in unterschiedlichen Orten und mit unterschiedlichen Technologien ermittelten Wunschgeschwindigkeiten sind sich bezüglich des Medians und der Perzentile recht ähnlich ( $V_{10} \approx 15$  km/h,  $V_{50} \approx 20$  km/h,  $V_{90} \approx 25$  km/h). Der Einfluss der Längsneigung ist in Tabelle 2-2 dargestellt. Wie zu erwarten, führt eine Steigung zu kleineren und ein Gefälle zu größeren Wunschgeschwindigkeiten. Der Einfluss der Art der von den Radfahrern genutzten Verkehrsanlage ist in Tabelle 2-3 dargestellt.

In der Untersuchung von OPIELA ET AL (1980) ergeben sich ähnliche Werte von ca. 20 km/h für den arithmetischen Mittelwert der Wunschgeschwindigkeit für Radwege, die Nutzung des Gehwegs und im

Studie	Einflussgröße	Größe	Wert
COWI 2013	Kurvenfahrt (im Vergleich zur Geradeausfahrt)	$V_{50}$	11 km/h (- 11 km/h)
	Fahrradtyp (im Vergleich zum normalen Fahrrad)		
	• Pedelec/E-Bike	$V_{50}$	27 km/h (+ 5 km/h)
	• Lastenrad	$V_{50}$	14 km/h (- 8 km/h)
FLEISCHMANN 1983 (Verkehrszweck: zitiert nach Moli- tor et al. 2011, Alter: zitiert nach PFAFFENBICH- LER 2008)	Verkehrszweck:		
	• Freizeit	$V_{50}$	15 km/h
	• Berufsverkehr	$V_{50}$	18 km/h
	Alter:		
	• < 13 J	Arithmet. Mittel	19 km/h
	• 13 J - 18 J	Arithmet. Mittel	20 km/h
• 19 J - 45 J	Arithmet. Mittel	17 km/h	
• 46 J - 60 J	Arithmet. Mittel	14 km/h	
• > 60 J	Arithmet. Mittel	13 km/h	

Tab. 2-4: Weitere untersuchte Einflüsse auf die Wunschgeschwindigkeit von Radfahrern

Mischverkehr auf der Fahrbahn. Auf breiten Radfahrstreifen (Bicycle Lanes) liegt der arithmetische Mittelwert der Wunschgeschwindigkeit bei 25 km/h. Allerdings waren die Stichproben für die Anlagentypen Radweg, Gehweg und Fahrbahn zu klein, um wissenschaftlich fundierte Schlussfolgerungen daraus ziehen zu können. In der vorliegenden Studie waren die Wunschgeschwindigkeiten auf den untersuchten Radwegen etwas höher als auf den untersuchten Radfahrstreifen und diese wiederum etwas höher als die im Mischverkehr.

Weitere Einflüsse auf die Wunschgeschwindigkeit sind in Tabelle 2-4 dargestellt.

**Folgerungen für die Simulationsmodelle:**

Die Wunschgeschwindigkeitsverteilung von Radfahren scheint sehr einheitlich zu sein, mit einem Median bei etwa 20 km/h und Perzentilen  $V_{10} \approx 15$  km/h und  $V_{90} \approx 25$  km/h. In der Simulation wird eine entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung der Radfahrerwunschgeschwindigkeit implementiert. Eine weitere Differenzierung, z. B. hinsichtlich Fahrradtyp, Alter oder Längsneigung, wird hier nicht vorgenommen.

Studie	Einflussgröße	Wert in m/s <sup>2</sup>	Ort
COWI 2013	a(v) bei:		Kopenhagen (Dänemark)
	3 km/h	a = 1,2	
	4 km/h	a = 1,6	
	5 km/h	a = 1,8	
	7 km/h	a = 1,6	
	8 km/h	a = 1,3	
	13 km/h	a = 0,4	
	19 km/h	a = 0,3	
	22 km/h	a = 0,3	
	26 km/h	a = 0,3	
30 km/h	a = 0,2		
FIGLIOZZI et al. 2013	Arithmet. Mittel von a		Portland (USA) Hinweis: Mes- sungen wur- den im Som- mer durchge- führt. Im Win- ter wurden et- was niedrige- re Werte be- obachtet.
	- Ebene, Mann	$a_{\text{mittel}} = 1,9$	
	- Ebene, Frau	$a_{\text{mittel}} = 1,6$	
	- Steigung, Mann	$a_{\text{mittel}} = 1,2$	
	- Steigung, Frau	$a_{\text{mittel}} = 0,9$	
PARKIN & ROTHE- RAM 2010	Arithmet. Mittel von $a_{\text{mittel}}$		Leeds (Eng- land)
	- Ebene	$a_{\text{mittel}} = 0,23$	
	- Gefälle -2 %	$a_{\text{mittel}} = 0,27$	
	- Gefälle -5 %	$a_{\text{mittel}} = 0,34$	
	- Steigung +2 %	$a_{\text{mittel}} = 0,21$	
- Steigung +5 %	$a_{\text{mittel}} = 0,17$		
vorliegende Untersuchung	a(v) bei:		München, Berlin
	2 km/h	a = 1,8 - 2,2	
	5 km/h	a = 0,9 - 1,1	
	9 km/h	a = 0,7	
	14 km/h	a = 0,7	
	22 km/h	a = 0,5 - 0,6	

Tab. 2-5: Studien zum Beschleunigungsverhalten von Radfahrern - Überblick. (Teilweise wurden  $V_{50}$ ,  $V_{10}$  und  $V_{90}$  nicht explizit angegeben. In diesen Fällen wurden die Werte aus den dargestellten Verteilungen geschätzt.)

**2.1.2 Beschleunigung**

Nur wenige Studien konnten identifiziert werden, in denen das Beschleunigungsverhalten von Radfahrern untersucht wurde. In der Studie von COWI (2013) wurde die Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit a(v) erhoben, in den Untersuchungen von FIGLIOZZI, WHEELER, & MONSERE (2013) sowie von PARKIN & ROTHERAM (2010) wurde die mittlere Beschleunigung  $a_{\text{mittel}}$  bis zum Erreichen der freien Geschwindigkeit gemessen. Tabelle 2-5 zeigt einen Überblick über die Ergebnisse, in die auch die Untersuchungen dieses Projektes mit einfließen.

Auffällig sind die Unterschiede in den mittleren Beschleunigungen in den Studien von FIGLIOZZI, WHEELER, MONSERE (2013) und von PARKIN & ROTHERAM (2010). Die Erklärung könnte in der

Definition der Beschleunigungsphase liegen. Die mittlere Beschleunigung  $a_{\text{mittel}}$  wird ebenda berechnet aus der Zielgeschwindigkeit geteilt durch die dafür benötigte Zeit. Ein paar wenige km/h Unterschied in der Zielgeschwindigkeit können zu einem erheblichen Unterschied in der dafür benötigten Zeit und somit der mittleren Beschleunigung führen, da die Beschleunigung mit dem Erreichen der Wunschgeschwindigkeit immer kleiner wird. Diese Details werden in den genannten Studien nicht weiter beschrieben.

#### **Folgerungen für die Simulationsmodelle:**

In der Simulation wird die Beschleunigung eines Radfahrers in Abhängigkeit der Geschwindigkeit definiert. Daher werden die empirischen Daten aus den Beobachtungen in München und Berlin sowie die Erkenntnisse aus Kopenhagen verwendet und daraus eine mittlere geschwindigkeitsabhängige Beschleunigungsfunktion abgeleitet. Das beobachtete Beschleunigungsverhalten in den drei Städten war ähnlich, unterschied sich jedoch im Detail (insbesondere Beschleunigungen bei Geschwindigkeiten größer 10 km/h). Durch die Mittelung werden Unsicherheiten reduziert, die bei der Ermittlung von Beschleunigungen aufgrund der notwendigen zweimaligen Differenzierung der Beobachtungsdaten (Positionen) unvermeidbar sind.

#### **2.1.3 Taktisches Fahrverhalten**

Unter dem taktischen Fahrverhalten wird hier die Wege- und Verkehrsflächenwahl der Radfahrer beim Passieren des Knotenpunkts sowie das Aufstellverhalten unter Einbezug anderer Verkehrsteilnehmer und der Signalisierung unter der Berücksichtigung der Fahrtrichtung (Geradeausfahren, Linksabbiegen oder Rechtsabbiegen) verstanden.

#### **Rechtsabbieger**

ANGENENDT ET AL. (2005) haben festgestellt, dass etwa 75 % der Rechtsabbieger – statt wie vorgesehen die Fahrbahn – den Seitenraum nutzten. Verstärkt wird dieses Verhalten durch lange Umlaufzeiten in Kombination mit kurzen Freigabezeiten für den Rechtsabbieger.

In der Untersuchung von COWI (2013) hat sich gezeigt, dass etwa 30 % der Rechtsabbieger den Seitenraum nutzen, wobei der Anteil größer ist (in der Studie nicht beziffert), wenn sich bereits wartende Radfahrer an der Haltlinie befinden. Von den auf der Fahrbahn abbiegenden Radfahrern ignorieren

etwa 30 % der bei Rot ankommenden Radfahrer das Rotsignal.

Die im Rahmen des vorliegenden Projekts durchgeführten Beobachtungen zeigen, dass der Einfluss rechtsabbiegender Radfahrer auf den Kfz-Verkehr gering ist. Die den Seitenraum nutzenden und Rotsignale ignorierenden Radfahrer beeinträchtigen den Kfz-Verkehr nicht. Anhand des erhobenen Videomaterials konnte beobachtet werden, dass auf der Fahrbahn abbiegende Radfahrer stets am rechten Fahrbahnrand bleiben und von geradeaus fahrenden und rechtsabbiegenden Kfz überholt werden können. Ein direkter Einfluss für die rechtsabbiegenden Kfz besteht nur dann, wenn die Ausfahrt einstreifig mit einem schmalen Fahrstreifen und ohne Radverkehrsanlage ausgeführt ist. Ein indirekter Einfluss auf den Verkehrsablauf für die Kfz kann entstehen, wenn rechtsabbiegende Radfahrer die geradeausfahrenden Radfahrer beeinflussen, die wiederum die rechtsabbiegenden Kfz beeinflussen.

#### **Folgerungen für die Simulationsmodelle:**

Da die über den Seitenraum und bei Rot abbiegenden Radfahrer keinen Einfluss auf den Verkehrsablauf der Kfz haben, werden sie nicht simuliert. Wird in einer Simulation eine Verkehrsstärke von dem rechtsabbiegenden Radverkehr von 100 Rad/h eingestellt, dann kann das in der Realität beispielsweise auch dem Fall entsprechen, dass die Verkehrsstärke des rechtsabbiegenden Radverkehrs 400 Rad/h beträgt und 75 % davon über den Seitenraum oder bei Rot abfließen. Der Anteil der über den Seitenraum oder bei Rot abfließenden rechtsabbiegenden Radfahrer kann nicht allgemeingültig angegeben und muss für den jeweiligen Anwendungsfall geschätzt werden. Darauf sollte im HBS hingewiesen werden. Als Größenordnung kann von einem Anteil von 50 % bis 75 % über den Seitenraum oder bei Rot abfließenden Radfahrer ausgegangen werden (siehe empirische Untersuchungen zum taktischen Fahrverhalten, Kapitel 3.3.10). Das Rechtsabbiegeverhalten von Radfahrern wird im derzeit laufenden FE 82.0690/2017 „Pilotversuch des Rechtsabbiegens von Radfahrenden bei Rot“ vertiefend untersucht.

#### **Geradeausfahrer**

Nach ANGENENDT et al. (2005) nutzen die geradeausfahrenden Radfahrer i. d. R. die vorgesehenen Verkehrsflächen, d. h. markierte oder bauliche Radverkehrsanlagen. Bei einer früheren Freigabe der parallel geführten Fußgänger nutzen etwa 15 %



der geradeausfahrenden Radfahrer den Seitenraum bzw. die Fußgängerfurt, um vor den Kfz abzufließen.

Bei ARAS hängt die Beeinflussung des Kfz-Verkehrs maßgeblich davon ab, inwieweit die bei Rot ankommenden Radfahrer den ARAS nutzen. ANGENENDT et al. (2005) haben die Aufstellpositionen geradeausfahrender und rechtsabbiegender Radfahrer in ARAS untersucht. Dabei wurde nicht hinsichtlich der Fahrtrichtung differenziert und die Anteile geradeausfahrender und rechtsabbiegender Radfahrer sind nicht dargestellt. Da – wie Beobachtungen zeigen – rechtsabbiegende Radfahrer auch unter Nutzung des Seitenraums abbiegen oder Rotsignale missachten, kann davon ausgegangen werden, dass es sich mehrheitlich um geradeausfahrende Radfahrer handelt. Tabelle 2-6 zeigt die aggregierten Ergebnisse von an 16 Zufahrten mit ARAS durchgeführten Beobachtungen.

Überwiegend stellen sich die Radfahrer im rechten Randbereich, also der Verlängerung des Radfahr- oder Schutzstreifens, sofern vorhanden, auf. Dies wird auch auf eine relativ geringe Anzahl Radfahrer zurückgeführt (wobei nicht erkennbar ist, wie sich die ankommenden Radfahrer in Abhängigkeit der Anzahl bereits wartender Radfahrer verteilen). Eine größere Fläche des ARAS führt tendenziell auch zu einer stärkeren Nutzung der Mitte des ARAS, je-

Aufstellposition vom rechten FB-Rand (Zufahrten: 16, Anzahl der Radfahrer: 1393)	
0,00 - 0,99 m	63,9 %
1,00 - 1,99 m	21,5 %
2,00 - 0,9 m	9,3 %
≥ 3,00 m	5,2 %

Tab. 2 6: Aufstellpositionen geradeausfahrender und rechtsabbiegender Radfahrer bei ARAS (eigene Darstellung nach ANGENENDT et al. (2005))

doch bleiben die Radfahrer auch hier überwiegend im rechten Randbereich.

**Folgerungen für die Simulationsmodelle:**

Das in diesem Projekt beobachtete Verhalten sowie die Untersuchungen von ANGENENDT et al. (2005) legen nahe, dass geradeausfahrende Radfahrer meist rechts in der Verlängerung des Radfahrstreifens warten. Teilweise warten sie dort zu zweit nebeneinander. Wenn bereits mehrere Radfahrer warten, stellen sich die geradeausfahrenden Radfahrer teilweise vor den Kfz-Verkehr und fahren bei Grün in Richtung des rechten Fahrbahnrandes über den Knoteninnenbereich, wobei die Kfz beim Abfließen leicht behindert werden. In der Simulation wird die Nutzung des ARAS über eine regelbasierte Steuerung der Routenwahl realisiert: Bei Grün ankommende Geradeausfahrer bleiben auf der rechten Seite (auf dem Radfahr- oder Schutzstreifen). Bei Rot ankommende Geradeausfahrer stellen sich zunächst rechts auf (teilweise versetzt bzw. nebeneinander). Wenn dort bereits zwei Radfahrer stehen, dann wird auch der Bereich vor den Kfz genutzt.

**Linksabbieger**

Das taktische Fahrverhalten von linksabbiegenden Radfahrern ist komplexer als das von rechtsabbiegenden und geradeausfahrenden Radfahrern. Bild 2-1 zeigt die möglichen Wege für linksabbiegende Radfahrer am Beispiel einer Zufahrt mit ARAS.

Aus Sicht des Verkehrsablaufs bzw. des Einflusses auf die Kfz ist die Wegewahl über den Knoten relevant. Direkt abbiegende Linksabbieger (a), die sich im ARAS vor den Kfz aufstellen, beeinträchtigen das Abfließen der Kfz. In den Videos zu den Erhebungen in München und Freiburg konnte beobachtet werden, dass bei Knotenpunkten ohne markierten Radfahrstreifen für die Linksabbieger die Kfz

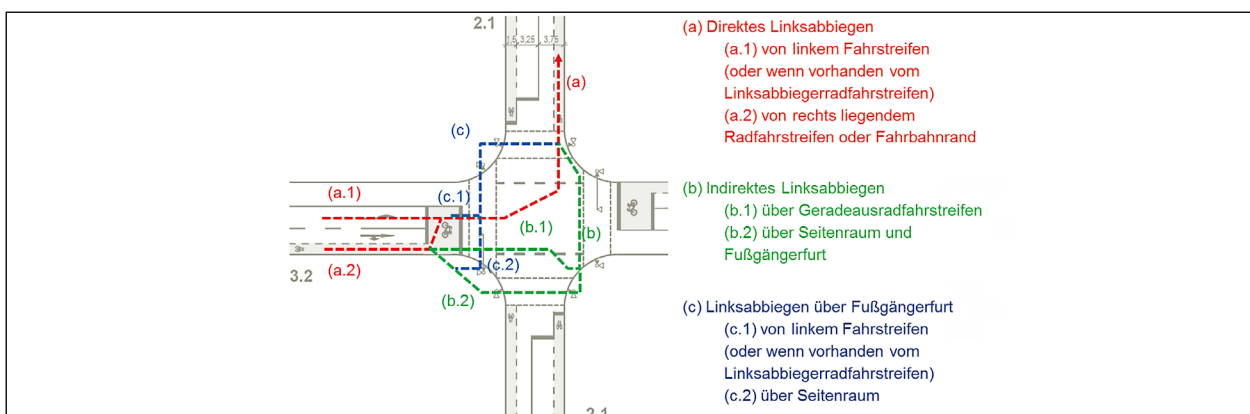


Bild 2-1: Mögliche Wege für Linksabbieger (Zufahrt mit ARAS)

hinter den (gepulkten) Radfahrern bleiben, bis diese den Knoteninnenraum verlassen haben. Der Einfluss auf die Kfz ist unabhängig davon, ob die Radfahrer vom linken Fahrstreifen bzw. einem Radfahrstreifen für linksabbiegende Radfahrer (a.1) oder vom rechtsliegenden Fahrbahnrand (a.2) bei Rot in den ARAS einfahren. Indirekt linksabbiegende Radfahrer (b) beeinflussen den Kfz-Verkehr potenziell zweimal. Das erste Mal in der ursprünglichen Zufahrt, das zweite Mal bei der zweiten Querung (jeweils Behinderung der rechtsabbiegenden Kfz, bei (b.1) ergibt sich je nach Vorhandensein und Lage des Aufstellbereichs bei der zweiten Querung auch eine Behinderung der geradeausfahrenden Kfz). Radfahrer, die über die Fußgängerfurt abbiegen (c), beeinflussen die rechtsabbiegenden Kfz aus der gegenüberliegenden Zufahrt.

ANGENENDT et al. (2005) haben die Wegewahl von linksabbiegenden Radfahrern an verschiedenen Knotenpunkten untersucht. Festgestellt wurde eine eher geringe und zwischen den einzelnen Knotenpunkten stark schwankende Akzeptanz des direkten Linksabbiegens. Dabei war die Akzeptanz bei dem Vorhandensein eines separaten Linksabbiegestreifens für Radfahrer, der über den Knoteninnenraum fortgeführt wird, größer als in den Fällen ohne einen solchen Abbiegestreifen. Auch wurden in den Untersuchungen von ANGENENDT et al. (2005) häufig Querungen über die Fußgängerfurt beobachtet, wenn Radfahrer bei Rot ankamen. Diese Anteile wurden nicht ausgewertet. In den Fällen, in denen die Radfahrer ARAS nutzten, stellten sie sich meist mittig vor den Kfz-Verkehr.

#### 2.1.4 Akzeptanz von Zeitlücken

##### Radfahrer kreuzen/durchsetzen Kfz-Verkehr

Es konnten nur wenige Untersuchungen zur Akzeptanz von Zeitlücken durch Radfahrer identifiziert und gefunden werden. FERRARA (1977) stellte fest, dass die beim Überqueren von zwei Fahrstreifen akzeptierte Zeitlücke zwischen 3,5 s und 4 s liegt. Untersuchungen in der DDR (SAITZ 1968, zitiert nach FERRARA, 1977) ergaben eine deutlich größere Grenzzeitlücke von ca. 8 s. OPIELA et al. (1980) stellten in empirischen Untersuchungen fest, dass die akzeptierten Zeitlücken logarithmisch verteilt sind, die im Mittel genutzte Zeitlücke bei ca. 3,9 s liegt und dass nicht zu einem vollständigen Halt kommende Radfahrer eine deutlich geringere Zeitlücke akzeptieren als Radfahrer, die anhalten müssen. In KWIGIZILE et al. (2017) wurde das In-

teraktionsverhalten zwischen Radfahrern und motorisiertem Verkehr auf der Grundlage in VR-Simulationen mit Probanden untersucht. Aus einer ermittelten Anzahl von insgesamt 124 Kreuzungs-Manövern stellte sich für 9 % der Radfahrer heraus, dass sie Lücken von weniger als 3 s akzeptierten, während Lücken von 3 s bis 4 s bereits von 31 % angenommen wurden. Lücken größer als 4 s wurden von 36 % der Radfahrer akzeptiert: Feinere Abstufungen, insbesondere für den Bereich größer 4 s, wurden nicht untersucht.

##### Folgerungen für die Simulationsmodelle:

Insgesamt liegen nur wenig Daten vor. Die in den identifizierten Studien beobachteten, von Radfahrern im Kfz-Strom genutzten Zeitlücken sind mit einer Größenordnung von 3,5 s bis 4 s kleiner als die Grenzzeitlücken für Kfz nach dem HBS (FGSV, 2015a). Aufgrund der geringeren Beschleunigung von Radfahrern und der größeren Verletzbarkeit überrascht dies zunächst etwas. Andererseits sind Fahrräder kleiner als Kfz und verlassen daher schneller den Konfliktbereich. Möglicherweise spielen auch die Messmethodik oder die konkret beobachtete Situation eine Rolle. Aufgrund der geringen Datenlage und der sich möglicherweise aufhebenden Effekte (geringere Beschleunigung, geringere Fahrzeuglänge, wird für den Radverkehr die gleiche Zeitlückenakzeptanz wie für den Kfz-Verkehr unterstellt (bei signalisierten Knotenpunkten nur relevant für das bedingt verträgliche Linksabbiegen).

##### Kfz kreuzen/durchsetzen Radverkehr

PETZOLDT et al. (2017) untersuchten die akzeptierten Zeitlücken von linksabbiegenden Kfz beim Durchsetzen von entgegenkommenden Radfahrern unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren. Es stellte sich heraus, dass die Geschwindigkeit des entgegenkommenden Radfahrers, der Fahrradtyp (E-Bike oder normal) und die Längsneigung einen Einfluss auf die akzeptierte Zeitlücke haben. Beispielsweise verringerte sich die akzeptierte Zeitlücke bei höheren Geschwindigkeiten bei der Nutzung von E-Bikes. Auch konnte festgestellt werden, dass insbesondere jüngere Fahrer geringere Zeitlücken akzeptieren als ältere. Die von 50 % der abbiegenden Kfz genutzte Zeitlücke lag zwischen 6 s ( $v_{\text{Rad}} = 25 \text{ km/h}$ ) und 7 s ( $v_{\text{Rad}} = 15 \text{ km/h}$ ).

##### Folgerungen für die Simulationsmodelle:

Insgesamt liegen nur wenig Daten vor. Die in der genannten Studie beobachteten, von Kfz genutzten Zeitlücken bei entgegenkommenden Radfahrern

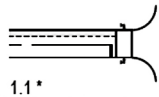
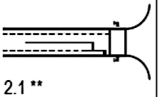
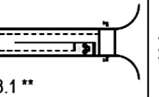
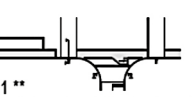
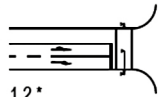
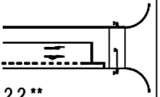
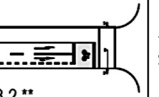
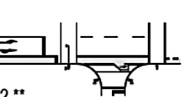

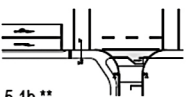
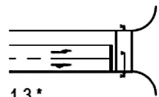
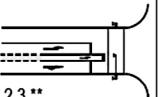
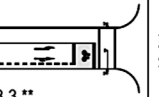
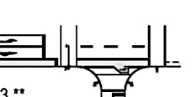


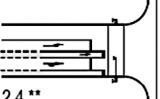
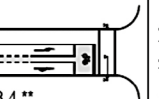
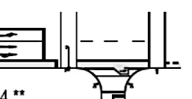
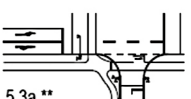
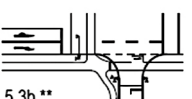
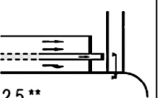
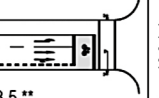
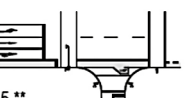
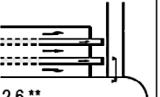
sind denen nach dem HBS (FGSV, 2015a) recht ähnlich (5,5 s beim Linksabbiegen; 6,6 s beim Links-einbiegen). Daher wird davon ausgegangen, dass die von den Kfz genutzten Zeitlücken unabhängig vom Fahrzeugtyp im zu durchsetzenden Fahrzeugstrom sind (bei signalisierten Knotenpunkten nur relevant für das bedingt verträgliche Linksabbiegen).

## 2.2 Untersuchungsfälle

Durch die Kombination der Fahrstreifenanzahl in der Zufahrt eines Knotenpunkts mit der jeweiligen Radverkehrsführung und -signalisierung ergibt sich eine Vielzahl von Fallunterscheidungen. So kommen beispielsweise bei einer einstreifigen Knotenpunktzufahrt in der Praxis entsprechend dem geltenden Regelwerk, also den RAST (FGSV, 2006b) und den ERA (FGSV, 2010), folgende Fälle zum Einsatz:

1. Gemeinsame Nutzung des Fahr-/Aufstellstreifens (je nach Fahrstreifenbreite hinter- oder nebeneinander, auf jeden Fall mit gegenseitiger Beeinflussung) bis zur gemeinsamen Haltlinie, Abfluss in alle Richtungen mit gegenseitiger Beeinflussung (gilt analog bei zweistreifigen Zufahrten mit zusätzlichen Beeinflussungen durch Fahrstreifenwechsel).

2. Separierte Nutzung von Schutzstreifen und Restfahrstreifen – zumindest Pkw/Rad – in der Zufahrt oder Radfahrstreifen und Fahrstreifen bzw. gemeinsame Nutzung des Restfahrstreifens oder Fahrstreifens durch direkt linksabbiegende Radfahrer, Abfluss während gemeinsamer Freigabezeit mit gegenseitiger Beeinflussung linksabbiegender Kfz und Radfahrer sowie rechtsabbiegender Kfz und geradeausfahrender Radfahrer (dies gilt analog bei zweistreifigen oder überbreiten sowie dreistreifigen Zufahrten mit zusätzlichen Beeinflussungen durch Fahrstreifenwechsel).
3. Separierte Nutzung von Schutzstreifen und Restfahrstreifen – zumindest Pkw/Rad – oder Radfahrstreifen und Fahrstreifen in der Zufahrt, Abfluss in gemeinsamer Freigabezeit mit Beeinflussung des Kfz-Verkehrs durch den Radverkehr in Folge der Aufstellung vor dem Kfz-Verkehr auf aufgeweiteten Radaufstellstreifen (dies

Radverkehrsführung und -signalisierung Streifigkeit der Zufahrt für Kfz-Verkehr	1 keine Radverkehrsanlage in Zufahrt, keine Aufstellstreifen, gemeinsame Signalisierung mit Kfz	2 Radverkehrsanlagen (Schutzstreifen, Radfahrstreifen) in Zufahrt, vorgezogene Aufstellstreifen	3 Radverkehrsanlagen (Schutzstreifen, Radfahrstreifen) in Zufahrt, aufgeweitete Aufstellbereiche	4/5 Radverkehrsanlagen (Radfahrstreifen, Radweg) in Zufahrt, vorgezogene Aufstellstreifen, indirektes Linksabbiegen		
einstreifig	 1.1 *	 2.1 **	 3.1 **	 4.1 **		
zweistreifig/ zweistreifig befahrbar	 1.2 *	 2.2 **	 3.2 **	 4.2 **	 5.1a **	 5.1b **
	 1.3 *	 2.3 **	 3.3 **	 4.3 **	 5.2a **	 5.2b **
		 2.4 **	 3.4 **	 4.4 **	 5.3a **	 5.3b **
			 2.5 **	 3.5 **	 4.5 **	
dreistreifig/ dreistreifig befahrbar		 2.6 **				

\* Vorbefahrt des Radverkehrs an wartenden Kfz abhängig von der Fahrstreifenbreite      \*\* Gesonderte Signalisierung des Radverkehrs möglich

Bild 2-2: Fallunterscheidungen aus Kombination der Fahrstreifenanzahl mit der Radverkehrsführung und -signalisierung

gilt analog bei zweistreifigen oder überbreiten Zufahrten).

4. Separierte Nutzung von Schutzstreifen und Restfahrstreifen oder Radfahrstreifen und Fahrstreifen in der Zufahrt, Abfluss in gemeinsamer Freigabezeit ohne gegenseitige Beeinflussung bei Geradeaus- und Linksabbiegevorgängen (indirektes Linksabbiegen für Radfahrer mit weiterer Sperrzeit), aber Beeinflussung rechtsabbiegender Kfz durch bevorrechtigten Radverkehr.
5. Erfolgt die Zufahrt in den Knotenpunkt auf Radfahrstreifen oder Radwegen, so kann auch der Abfluss durch eine gesonderte Signalisierung des Radverkehrs separiert werden. Dies gilt insbesondere für mehrstreifige oder überbreite, mehrspurig befahrbare Zufahrten.

Auf Grundlage der in den RAST (FGSV, 2006b) und ERA (FGSV, 2010) enthaltenen Führungsformen, den nach RiLSA (FGSV, 2015b) und HSRa (FGSV, 2005) möglichen Signalisierungsformen sowie Kenntnissen aus in der Praxis realisierten Fällen wurden die im Weiteren zu betrachtenden Fälle der Radverkehrsführung und -signalisierung festgelegt. Diese sind in Bild 2-2 dargestellt und umfassen nur die Kombinationen der Fahrstreifenanzahl mit der Radverkehrsführung und -signalisierung, die als praxisrelevant angesehen werden.

Auf dieser Grundlage wurden dann die konkreten Fallbeispiele für die empirischen Untersuchungen ausgewählt. Diese sind in Kapitel 3.1 beschrieben.

### 2.3 Analyse des bestehenden Berechnungsverfahrens im HBS

Das Berechnungsverfahren in Kapitel S4 des HBS (FGSV, 2015a) dient dem Nachweis, dass an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage die zu erwartende Verkehrsnachfrage mit der erwünschten Qualität abgewickelt werden kann. Die Verkehrsqualität wird dabei durch die Entwurfs- und Betriebsmerkmale der Knotenpunkte bestimmt. Das Verfahren gilt für den allgemeinen Kfz, den Rad- und den Fußgängerverkehr sowie für Fahrzeuge des ÖPNV.

Mit dem Verfahren wird die Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage aus Nutzersicht bewertet. Als Kriterium zur Beschreibung der Verkehrsqualität wird die Wartezeit verwendet.

QSV	maximale Wartezeit im Fußgänger- und Radverkehr <sup>1)</sup> $t_{W,max}$ [s]
A	≤ 30
B	≤ 40
C	≤ 55
D	≤ 70
E	≤ 85
F	> 85 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Die Grenzwerte gelten für den Radverkehr auch, wenn er auf der Fahrbahn gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr geführt wird.

<sup>2)</sup> Die Grenze zwischen den QSV E und F ergibt sich aus dem in den RiLSA (FGSV, 2015b) vorgegebenen Richtwert für die maximale Umlaufzeit von 90 s und der Mindestfreigabezeit von 5 s.

Tab. 2-7: Qualitätsstufen für den Radverkehr in Abhängigkeit der maximalen Wartezeit gemäß HBS (2015)

Beim Kfz-Verkehr und bei Fahrzeugen des ÖPNV gilt als Kriterium die mittlere Wartezeit auf einem Fahrstreifen. Bei Fußgänger- und Radverkehrsströmen gilt als Kriterium die maximale Wartezeit, die auf die vollständige Querung einer Zufahrt bezogen ist. Das gilt für den Radverkehr auch dann, wenn er auf der Fahrbahn gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr geführt wird. Die maximale Wartezeit für gemeinsam mit dem Fußgängerverkehr im Seitenraum geführten Radverkehr entspricht der Sperrzeit des Fußgänger- bzw. Radverkehrsstroms. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Rückstau bei Freigabezeitende von Fußgängern und Radfahrern nicht auftritt. Wird der Radverkehr gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr auf der Fahrbahn oder auf einem Radfahrstreifen geführt, ergibt sich die maximale Wartezeit für Radfahrer aus der Sperrzeit des zugehörigen Kfz-Verkehrsstroms.

In Tabelle 2-7 sind die Grenzwerte der maximalen Wartezeit für den Radverkehr zur Einteilung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) gemäß dem HBS (FGSV, 2015a) angegeben.

Maßgebend für die Beurteilung eines Knotenpunkts mit Lichtsignalanlage ist die schlechteste Qualitätsstufe, die sich für einen einzelnen Fahrstreifen im Kfz-Verkehr, im ÖPNV oder einen Strom des Fußgänger- und Radverkehrs bei der Querung einer Zufahrt ergibt. Sind einzelne Kfz-, Fußgänger- oder Radverkehrsströme am Knotenpunkt aufgrund ihrer geringen Verkehrsstärke von nachrangiger Bedeutung, so können sie bei der Bewertung der Verkehrsqualität des gesamten Knotenpunkts vernachlässigt werden.

Im Verfahren berücksichtigte Einflussgrößen auf die Verkehrsqualität sind neben Lage und Funktion des Knotenpunkts die Knotenpunktgestaltung (u. a. Anzahl und Anordnung der Fahrstreifen in einer Zufahrt, Breite der Fahrstreifen, Längsneigung im Knotenpunktbereich), die Steuerungsbedingungen (Signalgruppen sowie Umlaufzeit, Freigabezeiten und Sperrzeiten) sowie Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung. Auch die Umfeldbedingungen sind Einflussgrößen, wobei das Verfahren, wie alle Verfahren des HBS (FGSV, 2015a), für eine trockene Fahrbahn und Tageslicht gilt.

Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist die Kenntnis der Bemessungsverkehrsstärken für die einzelnen Verkehrsströme. Die Kfz-Verkehrsstärken sollen getrennt für den Leichtverkehr (Motorräder, Pkw sowie Lieferwagen mit und ohne Anhänger) und den Schwerverkehr vorliegen. Beim Schwerverkehr soll in der Regel eine Differenzierung nach den Fahrzeugarten Lkw+Bus (Lastkraftwagen mit mehr als 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht, einschließlich landwirtschaftlichen Zugmaschinen ohne Anhänger sowie Kraftomnibusse oder Omnibusse mit zehn und mehr Sitzplätzen einschließlich Fahrer und Gelenkombusse) und LkwK (Lkw-Fahrzeugkombinationen, d. h. Lkw mit Anhänger und Sattel-Kfz) zugrunde gelegt werden. In Ausnahmefällen reicht auch die Kenntnis der Verkehrsstärke für den Schwerverkehr insgesamt aus.

Bei der Berechnung der Bemessungsverkehrsstärke für die Fahrstreifen einer Zufahrt geht der auf der Fahrbahn geführte Radverkehr nicht ein, da unterstellt wird, dass dieser bei ausreichender Fahrstreifenbreite den Abfluss nicht beeinträchtigt. Die Verkehrsstärken des Fußgänger- und Radverkehrs werden ausschließlich zur Kapazitätsermittlung bedingt verträglich geführter Abbiegeströme benötigt, da sie deren Kapazität beeinflussen.

Bei der Ermittlung der Kapazität bedingt verträglich geführter Linksabbieger beim Durchsetzen des Gegenverkehrs wird der Radverkehr in der Gegenrichtung berücksichtigt (Anhang 1 zu Kapitel S4) (FGSV, 2015a). Als Standardwert, der auch den Bildern S4-8 und S-4-9 des HBS (FGSV, 2015a) zugrunde liegt, wird ein Radverkehrsanteil von 5 % angenommen. Bei der Ermittlung der Kapazität der Rechtsabbieger bei bedingt verträglichem Abfluss wird der Radverkehr ebenfalls berücksichtigt. Da die Rechtsabbieger gegenüber dem parallel gerichteten Rad- und Fußgängerverkehrsstrom wartepflichtig sind, wird zur Berechnung der Kapazität der Rechtsab-

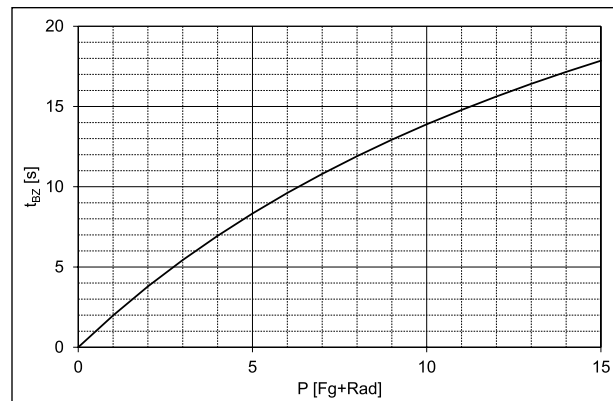


Bild 2-3: Belegungszeit  $t_{bz}$  einer Furt in Abhängigkeit von der Anzahl  $P$  der Radfahrer und Fußgänger pro Umlauf gemäß Bild S-4-10 des HBS (FGSV, 2015a)

bieger diejenige Freigabezeit für die Rechtsabbieger benötigt, in welcher sie ohne Konflikte mit dem Rad- und Fußgängerverkehr abfließen können. Dazu wird die rechnerische radfahrer- und fußgängerfreie Freigabezeit für den Rechtsabbiegerstrom bestimmt, die u. a. von der rechnerischen Belegungszeit der Furt durch Radfahrer und/oder Fußgänger abhängig ist. Eine Furt ist meist nur unmittelbar nach Freigabezeitbeginn durch Radfahrer und Fußgänger belegt. In Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer und Fußgänger pro Umlauf ergibt sich die Belegungszeit nach Bild 2-3.

Bei einem starken Radverkehrs- oder Fußgängerstrom sollte die Belegungszeit durch eine separate Messung bestimmt werden.

Aus der Analyse des derzeitigen Berechnungsverfahrens im HBS (FGSV, 2015a) zeigt sich, dass der Radverkehr an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage bislang nicht ausreichend berücksichtigt wird. Hier sind Ergänzungen und/oder Anpassungen des Verfahrens erforderlich. Erste diesbezügliche Überlegungen betreffen beispielsweise folgende Aspekte:

1. Führung des Radverkehrs auf eigenen Radverkehrsanlagen (Radweg und Radfahrstreifen):  
In diesen Fällen ist bei hohem Radverkehrsaufkommen durchaus ein Reststau bei Grünende möglich. Hier können parallel abfließende Radfahrer gegebenenfalls über einen Flächenbezug bei der Bestimmung der Sättigungsverkehrsstärke und durch Warteschlangensystem mit mehreren Bediensaltern berücksichtigt werden.
2. Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen:  
Hier sind Überlegungen zur Abbildung des „Vorbeifahrens rechts“ an der Warteschlange des

Kfz-Verkehrs im Zusammenhang mit der Fahrstreifenbreite erforderlich. Bei Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit Schutzstreifen ist das Vorbeifahren rechts i. d. R. möglich, ausgenommen bei hohem Schwerverkehrsaufkommen. Die Berücksichtigung dieser Effekte ist gegebenenfalls über einen Angleichungsfaktor für die Verkehrszusammensetzung bei der Sättigungsverkehrsstärke denkbar.

3. Anordnung von aufgeweiteten Radaufstellstreifen: Hier ist der Einfluss der vor dem Kfz-Verkehr stehenden und abfließenden Radfahrern auf den Abfluss des Kfz-Verkehrs und damit den mittleren Zeitbedarfswert des jeweiligen Verkehrsstroms (dies betrifft vor allem Linksabbiegerströme) in Abhängigkeit des Radverkehrsaufkommens zu ermitteln. Die Berücksichtigung dieser Effekte ist ebenfalls über einen Angleichungsfaktor für die Verkehrszusammensetzung bei der Sättigungsverkehrsstärke denkbar.
4. Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen: Hier ist der Abfluss bedingt verträglicher Rechtsabbiegerströme im Zusammenhang mit der Belegungszeit der rechtsliegenden Furt durch Fußgänger gesondert zu behandeln.
5. Bedingt verträgliche Linksabbiegerströme: Hier gilt es zum einen die Beeinflussung der linksabbiegenden Kfz und Radfahrer durch Radfahrer im Gegenverkehr zu betrachten, zum anderen auch den Abfluss linksabbiegender Radfahrer im Vergleich zum Abfluss linksabbiegender Kfz. Zur Berücksichtigung des Einflusses von Radfahrern im Gegenverkehr ist der derzeitige Ansatz zu überprüfen und ggf. anzupassen. Beispielsweise könnte dieser in Anlehnung an die Betrachtung bedingt verträglicher Rechtsabbieger über eine Belegungszeit der Konfliktfläche durch den Gegenverkehr berücksichtigt werden. Hierbei sind gegebenenfalls vergleichende Betrachtungen hinsichtlich der zu berücksichtigenden Verkehrsstärken im maßgebenden Kfz- und Radverkehrsstrom in Abhängigkeit der Radverkehrsführung erforderlich.
6. Indirektes Linksabbiegen von Radfahrern: Hier gilt es neben der rechnerischen Berücksichtigung im Verfahren selbst auch Ansätze für eine vergleichende Verkehrsqualitätsbewertung von direktem und indirektem Linksabbiegen – im letztgenannten Fall ist gegebenenfalls ein zwei-

maliges Warten an einer Lichtsignalanlage erforderlich – abzuleiten. Zudem sind vor dem Hintergrund der verfügbaren Aufstellflächen die Einsatzgrenzen im Hinblick auf hohe Radverkehrsstärken abzuleiten, um Verdrängungseffekte auf den/die Kfz-Fahrstreifen zu vermeiden.

### 3 Empirische Untersuchungen

Die empirischen Untersuchungen an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage dienen zunächst dazu, Erkenntnisse über den Verkehrsablauf von Radfahrern, auch bzw. insbesondere in Interaktion mit dem Kfz-Verkehr, zu gewinnen. Diese Erkenntnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die Simulationsuntersuchungen und die Weiterentwicklung der Berechnungsverfahren.

#### 3.1 Untersuchungsknotenpunkte

##### 3.1.1 Auswahl der Untersuchungsknotenpunkte

Die Auswahl der Untersuchungsknotenpunkte erfolgte unter folgenden Kriterien:

- Es sollte ein möglichst breites Spektrum an innerörtlichen Zufahrtstypen abgedeckt werden. Dabei war insbesondere wichtig, alle Führungsformen zu berücksichtigen.
- Die zu erwartende Radverkehrsstärke sollte möglichst groß sein (Auswahl auf Basis von Expertengesprächen, vorliegender Verkehrszählungen und eigener Kenntnis der Knotenpunkte).
- Die Durchführung der Erhebung musste praktisch durchführbar sein (Möglichkeit und Erlaubnis, die Knotenpunkte videobasiert zu erheben,

KP	Lage	Zufahrtstypen
M1	München, Marsstraße/ Seidlstraße	4.5, 5.3
M2	München, Arnulfstraße/ Seidlstraße	4.4, 5.1, 5.3
M3	München, Kapuzinerplatz	2.5, 5.1
M4	München, Schellingstraße/ Luisenstraße	1.1
FR3	Freiburg, Lehner Straße/ Eschholzstraße	3.2, 3.3
FR6	Freiburg, Eschholzstraße/ Basler Straße/ Lörracher Straße	2.6
B3	Berlin, Karl-Liebknecht-Straße/ Spandauer Straße	2.5, 4.5, 5.1, 5.3
B4	Berlin, Oranienburger Straße/ Friedrichstraße	3.1, 1.3, 2.1

Tab. 3-1: Untersuchungsknotenpunkte

Knotenpunkte nicht in zu vielen unterschiedlichen Städten).

In der Vorauswahl wurden vier Knotenpunkte in Aachen, sechs Knotenpunkte in Berlin, sechs Knotenpunkte in Freiburg, drei Knotenpunkte in Hamburg, sieben Knotenpunkte in München und drei Knotenpunkte in Münster berücksichtigt. Im Hinblick auf die Projektziele sind acht Knotenpunkte geeignet, die zur weiteren Untersuchung ausgewählt wurden (siehe Tabelle 3-1).

Für Knotenpunkte M1 und M2 lagen schon Videodaten aus den Jahren 2013 und 2014 vor.

### 3.1.2 Beschreibung der Untersuchungsknotenpunkte

Im Folgenden sind die wesentlichen Infrastrukturmerkmale sowie die beobachteten Verkehrsstärken (Kfz/SV/Rad) der Untersuchungsknotenpunkte beschrieben.

#### Knotenpunkt M1: München, Marsstraße/Seidlstraße

Der Knotenpunkt M1 weist jeweils zwei Zufahrten des Typs 4.5 (Zufahrten Z1 und Z3) und zwei Zufahrten des Typs 5.3 (Zufahrten Z2 und Z4) auf. Die Lage und die Zufahrtsbezeichnungen sind aus Bild 3-1 ersichtlich.

Bild 3-2 zeigt die Kameraperspektive, aus der der Verkehrsablauf bei den Erhebungen erfasst wurde.

Tabelle 3-2 fasst die Führungsformen und die Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur für den Knotenpunkt M1 zusammen.

Die einzelnen Zufahrten des Knotenpunkts M1 wiesen während der Morgenspitze am 24.07.2013 die in Tabelle 3-3 dargestellten Leichtverkehrsaufkommen ( $q_{LV}$ ), Schwerverkehrsaufkommen ( $q_{SV}$ ), Radverkehrsaufkommen ( $q_{Rad}$ ) und die Verhältnisgröße  $q_{Rad}/q_{LV}$  auf:

#### Knotenpunkt M2: München, Arnulfstraße/Seidlstraße

Der Knotenpunkt M2 weist eine Zufahrt des Typs 4.5 (Zufahrt Z1), eine Sonderform des Typs 1.2 (Zufahrt Z2), eine Zufahrt des Typs 5.1 (Zufahrt Z3) und eine Zufahrt des Typs 5.3 (Zufahrt Z4) auf. Die Lage und die Zufahrtsbezeichnungen sind aus Bild 3-3 ersichtlich.

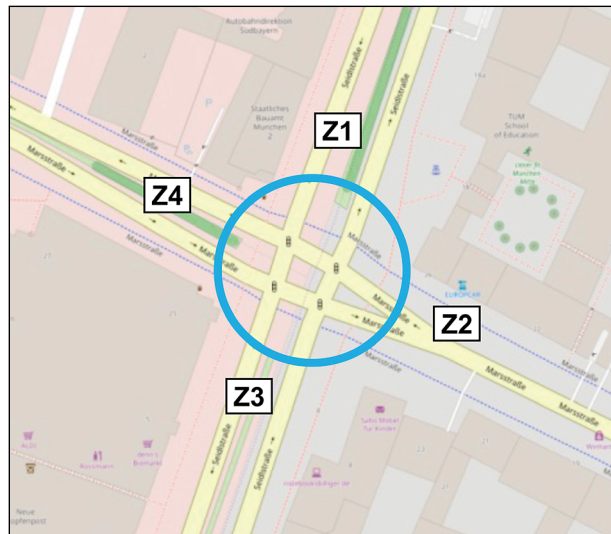


Bild 3-1: Knotenpunkt M1 Marsstraße/Seidlstraße (Kartengrundlage: www.openstreetmap.org)



Bild 3-2: Kameraperspektive Knotenpunkt M1 Marsstraße/Seidlstraße

Zufahrt	Führungsform	Breite [m]	Zufahrtstyp
Z1	Radfahrstreifen	2,00	4.5
Z2	Radweg	1,80	5.3
Z3	Radfahrstreifen	2,00	4.5
Z4	Radweg	1,50	5.3

Tab. 3-2: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur Knotenpunkt M1 Marsstraße/ Seidlstraße

Zufahrt	$q_{LV}$ [Kfz/h]	$q_{SV}$ [SV/h]	$q_{Rad}$ [Rad/h]	Verhältnis $q_{Rad}/q_{LV}$
Z1	1025	25	405	0,40
Z2	670	20	100	0,15
Z3	665	10	345	0,52
Z4	465	5	75	0,16

Tab. 3-3: Verkehrsstärken KP M1 Marsstraße/Seidlstraße

Bild 3-4 zeigt die Kameraperspektive, aus der der Verkehr erfasst wurde.

Tabelle 3-4 fasst die Führungsformen und die Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur für den Knotenpunkt M2 zusammen.

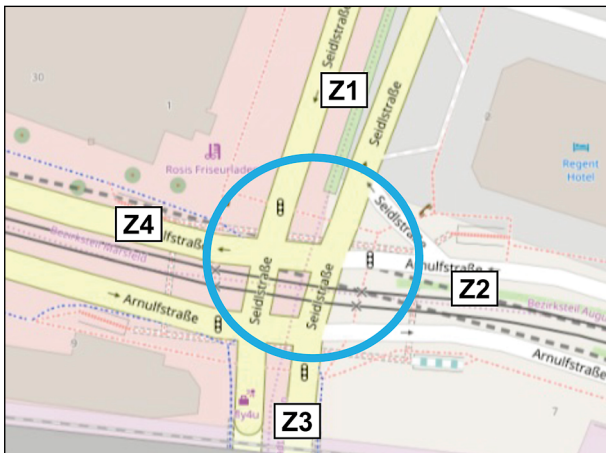


Bild 3-3: Knotenpunkt M2 Arnulfstraße/Seidlstraße (Kartengrundlage: www.openstreetmap.org)

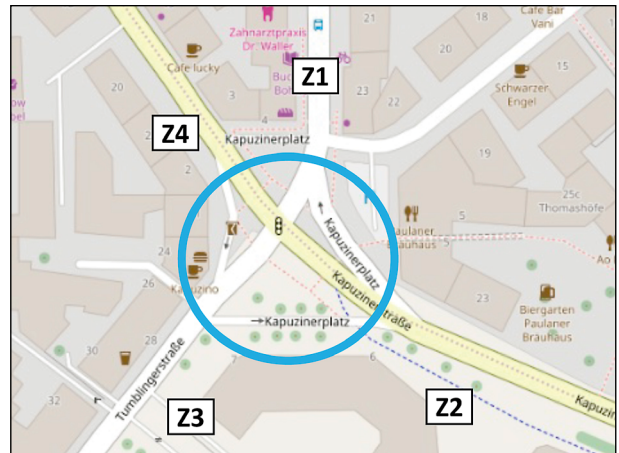


Bild 3-5: Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz (Kartengrundlage: www.openstreetmap.org)



Bild 3-4: Kameraperspektive Knotenpunkt M2 Arnulfstraße/Seidlstraße



Bild 3-6: Kameraperspektive Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz

Zufahrt	Führungsform	Breite [m]	Zufahrtstyp
Z1	Radfahrstreifen	2,00	4.5
Z2	-	-	1.2
Z3	Radweg	1,60	5.1
Z4	Radweg	2,20	5.3

Tab. 3-4: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur Knotenpunkt M2 Arnulfstraße/Seidlstraße

Zufahrt	Führungsform	Breite [m]	Zufahrtstyp
Z1	Fahrbahn	8,50	1.3
Z2	Radfahrstreifen	2,50	2.5
Z3	Radweg	1,50	5.1
Z4	Radfahrstreifen	2,50	2.5

Tab. 3-6: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz

Zufahrt	$q_{LV}$ [Kfz/h]	$q_{SV}$ [SV/h]	$q_{Rad}$ [Rad/h]	Verhältnis $q_{Rad}/q_{LV}$
Z1	580	20	340	0,59
Z2	125	5	140	1,12
Z3	975	25	560	0,57
Z4	330	20	170	0,52

Tab. 3-5: Verkehrsstärken Knotenpunkt M2 Arnulfstraße/Seidlstraße

Die einzelnen Zufahrten des Knotenpunktes M2 wiesen während der Morgenspitze am 21.05.2014 die in Tabelle 3-5 dargestellten Leichtverkehrsaufkommen ( $q_{LV}$ ), Schwerverkehrsaufkommen ( $q_{SV}$ ), Radverkehrsaufkommen ( $q_{Rad}$ ) und die Verhältnisgröße  $q_{Rad}/q_{LV}$  auf:

### Knotenpunkt M3: München, Kapuzinerplatz (Kapuzinerstraße/Tumblingerstraße/Häberlstraße)

Der Knotenpunkt M3 weist zwei Zufahrten des Typs 2.5 (Zufahrten Z2 und Z4), eine Zufahrt des Typs 5.1 (Zufahrt Z3) und eine Zufahrt des Typs 1.3 (Zufahrt Z1) auf. Die Lage und die Zufahrtsbezeichnungen sind aus Bild 3-5 ersichtlich.

Bild 3-6 zeigt die Kameraperspektive, aus der der Verkehr erfasst wurde.

Tabelle 3-6 fasst die Führungsformen und die Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur für den Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz zusammen.

Um die Eignung des Knotenpunktes M3 Kapuzinerplatz für die nachfolgende Videodatenerhebung



Zufahrt	$q_{LV}$ [Kfz/h]	$q_{SV}$ [SV/h]	$q_{Rad}$ [Rad/h]	Verhältnis $q_{Rad}/q_{LV}$
Z1	250	35	110	0,43
Z2	615	35	525	0,85
Z3	230	10	95	0,53
Z4	515	35	290	0,57

Tab. 3-7: Verkehrsstärken Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz

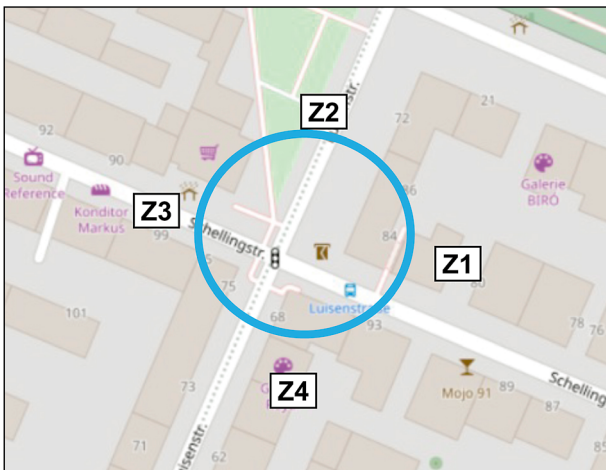


Bild 3-7: Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße (Kartengrundlage: www.openstreetmap.org)

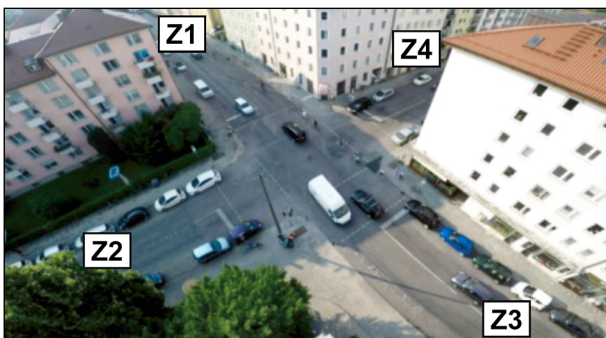


Bild 3-8: Kameraperspektive Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße

nachzuweisen, hat am 14.03.2017 von 09:00 bis 10:00 Uhr eine Verkehrsdatenerhebung stattgefunden. Tabelle 3-7 fasst die Ergebnisse der Verkehrsdatenerhebung über das Leichtverkehrsaufkommen ( $q_{LV}$ ), Schwerverkehrsaufkommen ( $q_{SV}$ ), Radverkehrsaufkommen ( $q_{Rad}$ ) und die Verhältnissgröße  $q_{Rad}/q_{LV}$  auf:

**Knotenpunkt M4: München, Schellingstraße/Luisenstraße**

Der Knotenpunkt M4 weist in allen Zufahrten den Zufahrtstyp 1.1 auf. Die Lage und die Zufahrtsbezeichnungen sind aus Bild 3-7 ersichtlich.

Bild 3-8 zeigt die Kameraperspektive, aus der der Verkehr erfasst wurde.

Zufahrt	Führungsform	Breite [m]	Zufahrtstyp
Z1	Fahrbahn	5,50	1.1
Z2	Fahrbahn	5,50	1.1
Z3	Fahrbahn	5,50	1.1
Z4	Fahrbahn	5,50	1.1

Tab. 3-8: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur am Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße

Zufahrt	$q_{LV}$ [Kfz/h]	$q_{SV}$ [SV/h]	$q_{Rad}$ [Rad/h]	Verhältnis $q_{Rad}/q_{LV}$
Z1	240	0	120	0,50
Z2	210	5	180	0,86
Z3	500	0	320	0,64
Z4	150	5	90	0,60

Tab. 3-9: Verkehrsstärken Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße

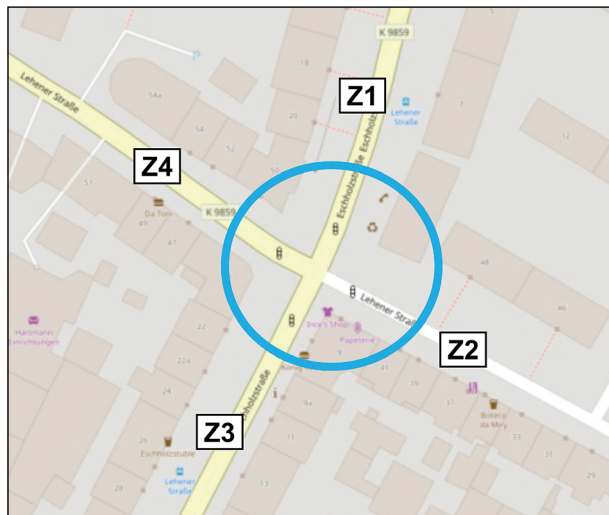


Bild 3-9: Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße (Kartengrundlage: www.openstreetmap.org)

Tabelle 3-8 fasst die Führungsformen und Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur an am Knotenpunkt M4 zusammen.

Die Eignung des Knotenpunktes M4 wird anhand der Ergebnisse der Verkehrsdatenauswertung (Tabelle 3-9) anhand des Leichtverkehrsaufkommens ( $q_{LV}$ ), Schwerverkehrsaufkommens ( $q_{SV}$ ), Radverkehrsaufkommens ( $q_{Rad}$ ) und der Verhältnissgröße  $q_{Rad}/q_{LV}$  nachgewiesen.

**Knotenpunkt FR3: Freiburg im Breisgau, Lehener Straße/Eschholzstraße**

Der Knotenpunkt FR3 weist eine Zufahrt des Typs 2.2 (Zufahrt Z1), eine Zufahrt des Typs 1.3 (Zufahrt Z3), eine Zufahrt des Typs 3.2 (Zufahrt Z2) und eine Zufahrt des Typs 3.3 (Zufahrt Z4) auf. Die Lage und die Zufahrtsbezeichnungen sind in Bild 3-9 ersichtlich.

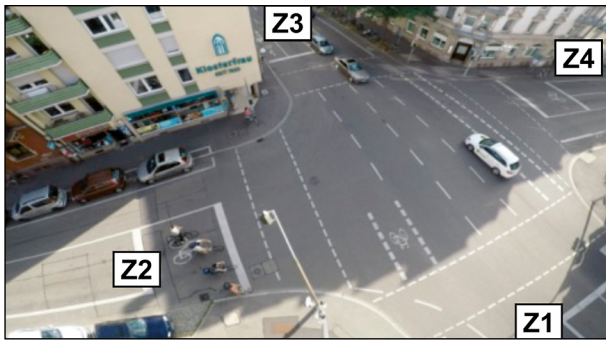


Bild 3-10: Kameraperspektive Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße

Zufahrt	Führungsform	Breite [m]	Zufahrtstyp
Z2	Radfahrstreifen	1,80	3.3
Z4	Radfahrstreifen	1,50	3.2

Tab. 3-10: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße

Zufahrt	Breite [m]	Länge [m]
Z2	7,00	5,00
Z4	6,50	6,00

Tab. 3-11: Abmessungen der ARAS Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße

Bild 3-10 zeigt die Kameraperspektive, aus der der Verkehr erfasst wurde.

Die Tabellen 3-10 und 3-11 fassen die Führungsformen und die Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur für den Knotenpunkt FR3 zusammen. Zufahrten Z1 und Z3 werden nicht berücksichtigt.

Für den Knotenpunkt FR3 waren vorab keine Verkehrsdaten verfügbar. Unter Berücksichtigung von Informationen der Stadt Freiburg wurde das Radverkehrsaufkommen an diesem Knotenpunkt als für die empirischen Untersuchungen geeignet eingestuft.

### Knotenpunkt FR6: Freiburg im Breisgau, Eschholzstraße/Basler Straße/Lörracher Straße

Der Knotenpunkt FR6 weist eine Zufahrt des Typs 2.6 (Zufahrt Z1), eine Zufahrt des Typs 5.1 (Zufahrt Z3) und zwei Zufahrten des Typs 5.3 (Zufahrten Z2 und Z4) auf. Die Lage des KP und dessen Zufahrtsbezeichnungen sind aus Bild 3-11 ersichtlich.

Bild 3-12 zeigt die Kameraperspektive, aus der der Verkehr erfasst wurde.

Tabelle 3-12 fasst die Formen und die Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur für den Knotenpunkt FR6 zusammen.

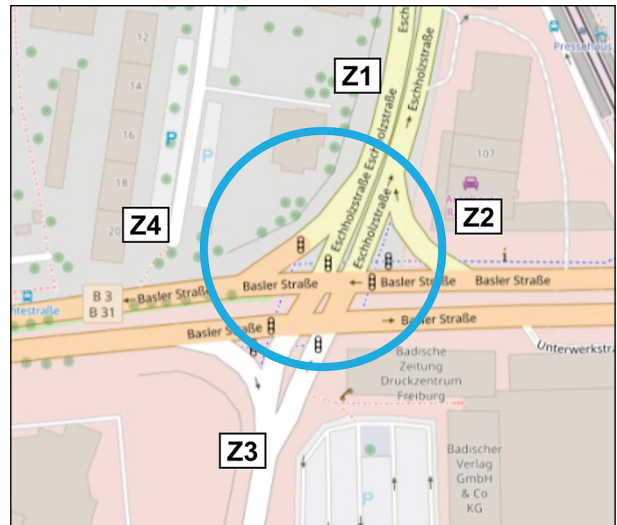


Bild 3-11: Knotenpunkt FR6 Eschholzstraße/Basler Straße/Lörracher Straße (Kartengrundlage: www.opentreetmap.org)



Bild 3-12: Kameraperspektive Knotenpunkt FR6 Eschholzstraße/Basler Straße/Lörracher Straße

Zufahrt	Führungsform	Breite [m]	Zufahrtstyp
Z1	Radfahrstreifen (geradeaus)	1,80	2.6
	Radfahrstreifen (linksabbiegen)	1,50	

Tab. 3-12: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur Knotenpunkt FR6 Eschholzstraße/Basler Straße/Lörracher Straße

Für den Knotenpunkt FR6 waren vorab keine Verkehrsdaten vorhanden. Unter Berücksichtigung von Informationen der Stadt Freiburg wurde das Radverkehrsaufkommen an diesem Knotenpunkt als für die empirischen Untersuchungen geeignet eingestuft.

### Knotenpunkt B3: Berlin, Karl-Liebknecht-Straße/Spandauer Straße

Die Lage und die Zufahrtsbezeichnungen sind aus Bild 3-13 ersichtlich.

Bild 3-14 zeigt die Kameraperspektive, aus der der Verkehr erfasst wurde.



Bild 3-13: Knotenpunkt B3 Karl-Liebknecht-Straße/Spandauer Straße (Kartengrundlage: www.openstreetmap.org)

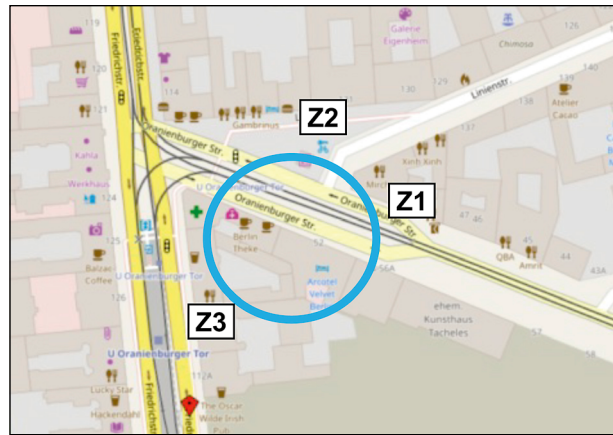


Bild 3-15: Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße (Kartengrundlage: www.openstreetmap.org)



Bild 3-14: Kameraperspektive Knotenpunkt B3 Karl-Liebknecht-Straße/Spandauer Straße



Bild 3-16: Kameraperspektive Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße

Zufahrt	Führungsform	Breite [m]	Zufahrtstyp
Z1	Radfahrstreifen	1,80	2.5

Tab. 3-13: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur der erhobenen Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B3 Karl-Liebknecht-Straße/Spandauer Straße

Zufahrt	Führungsform	Breite [m]	Zufahrtstyp
Z1	Radfahrstreifen	1,80	3.1

Tab. 3-15: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur der erhobenen Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße

Zufahrt	q <sub>Kfz</sub> [Kfz/h]	q <sub>Rad</sub> [Rad/h]	Verhältnis q <sub>Rad</sub> /q <sub>Kfz</sub>
Z1	596	172	0,29
Z2	734	314	0,43
Z3	374	162	0,43
Z4	691	259	0,37

Tab. 3-14: Verkehrsstärken Knotenpunkt B3 Karl-Liebknecht-Straße/Spandauer Straße

Zufahrt	Breite [m]	Länge [m]
Z1	4,80	4,70

Tab. 3-16: Abmessungen der ARAS der erhobenen Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße

Tabelle 3-13 fasst die Führungsformen und Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur an der erhobenen Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B3 zusammen.

Die einzelnen Zufahrten weisen die in Tabelle 3-14 dargestellten verkehrlichen Charakteristika auf (vgl. Verkehrsmessung VRZ Berlin vom 04.09.2014, 07:00 – 19:00 Uhr).

### Knotenpunkt B4: Berlin, Oranienburger Straße/ Friedrichstraße

Die Lage und die Zufahrtsbezeichnungen sind aus Bild 3-15 ersichtlich.

Bild 3-16 zeigt die Kameraperspektive, aus der der Verkehr erfasst wurde.

Tabelle 3-15 und Tabelle 3-16 fassen die Führungsformen und Abmessungen der Radverkehrsinfra-

Zufahrt	$q_{Kfz}$ [Kfz/h]	$q_{Rad}$ [Rad/h]]	Verhältnis $q_{Rad}/q_{Kfz}$
Z1	179	183	1,02
Z2	419	162	0,39
Z3	275	149	0,54

Tab. 3-17: Verkehrsstärken Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße

struktur an der erhobenen Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B4 zusammen.

Die einzelnen Zufahrten weisen die in Tabelle 3-17 dargestellten verkehrlichen Charakteristika auf (vgl. Verkehrsmessung VRZ Berlin vom 26.09.2016, 07:00 – 19:00 Uhr).

## 3.2 Datenerhebung

### 3.2.1 Allgemeine Randbedingungen

Zur praktischen Durchführung der Videodatenerhebung sind grundsätzlich weitere Aspekte zu beachten. Für einen Aufbau ohne eigenen Montagemast sind unmittelbar in der Nähe liegende Gebäude von Vorteil, aus denen eine Videodatenerhebung grundsätzlich möglich ist. Für einen Aufbau auf einem eigenen Montagemast muss ein geeigneter Stellplatz vorhanden sein. Die Erhebungen erfolgten unter Einhaltung aller vorgegebenen Regelungen. Die Auflösung der Videos war so gering, dass weder Kfz-Kennzeichen noch Gesichter der Verkehrsteilnehmer erkennbar waren.

### 3.2.2 Durchführung der Erhebungen

In Tabelle 3-18 sind die Erhebungszeiten im Überblick dargestellt.

Die Berliner Knotenpunkte wurden jeweils mit zwei Kameras erfasst, die an einem 12 m hohen Mast auf dem Versuchsträger UTRaCar (Urban Traffic Research Car) des DLR montiert waren (siehe Bild 3-17).

Aufgrund des eingeschränkten Sichtbereiches diente eine Kamera zur Beobachtung des stromabwärtigen, die andere zur Beobachtung des stromaufwärtigen Verkehrsgeschehens (siehe Bild 3-18 und Bild 3-19).

Dabei wurde das Videomaterial der stromabwärtigen Richtung zur Erzeugung der in Kapitel 3.3 vorgestellten Kenngrößen genutzt. Die Videoaufzeichnungen der stromaufwärtigen Richtung dienten im

KP	Lage	Erhebung Datum/Uhrzeit
M1	München, Marsstraße/Seidlstraße	20.05.2014 07:36 – 09:20*
M2	München, Arnulfstraße/ Seidlstraße	24.07.2013 07:20 – 09:05*
M3	München, Kapuzinerplatz	20.06.2017 07:00 – 19:00
M4	München, Schellingstraße/ Luisenstraße	21.06.2017 07:58 – 13:30
FR3	Freiburg, Lehner Straße/ Eschholzstraße	13.07.2017 07:00 – 19:00
FR6	Freiburg, Eschholzstraße/ Basler Straße/ Lörracher Straße	12.09.2017 07:00 – 19:00
B3	Berlin, Karl-Liebknecht-Straße/ Spandauer Straße	19.07.2017 08:00 – 18:00
B4	Berlin, Oranienburger Straße/ Friedrichstraße	18.07.2017 08:00 – 18:00

\* Die Erhebung dieser Daten erfolgte im Rahmen des Forschungsprojekts UR:BAN.

Tab. 3-18: Erhebungszeiten



Bild 3-17: UTRaCar bei einer Messkampagne am Moritzplatz in Berlin.



Bild 3-18: Beobachtungsbereich der stromabwärtigen Richtung von Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße



Bild 3-19: Beobachtungsbereich der stromaufwärtigen Richtung von Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße

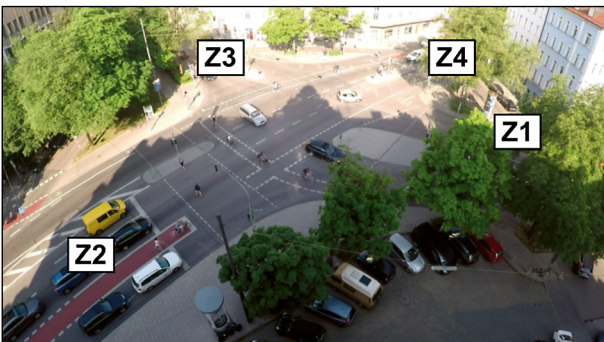


Bild 3-20: Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz (Kapuzinerstraße/Tumblingerstraße/Häberlstraße)

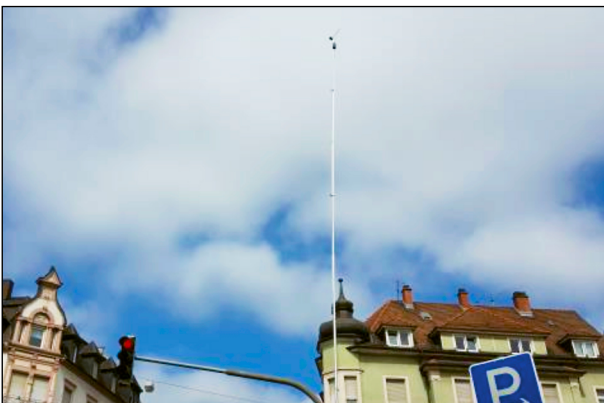


Bild 3-21: Mast bei der Videodatenerhebung am Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße

Wesentlichen der Kontrolle bestimmter Kenngrößen, z. B. zur Feststellung der Anzahl der in den interessierenden Abschnitt eingefahrenen Radfahrer.

Bei allen anderen Knotenpunkten wurde eine Kamera stationär auf einem Gebäude mit Blick auf den gesamten Knotenpunkt bzw. an einem Mast montiert.

Die Erhebungen an den Knotenpunkten M1 Marsstraße/Seidlstraße und M2 Arnulfstraße/Seidlstraße

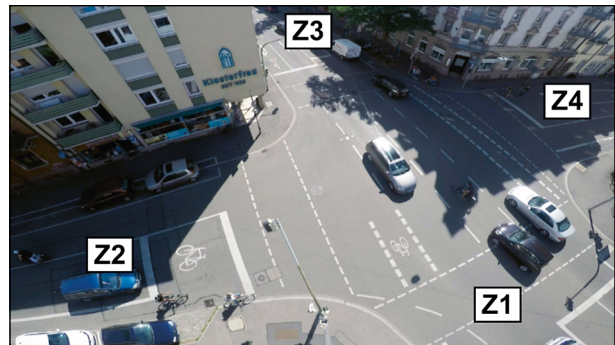


Bild 3-22: Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße

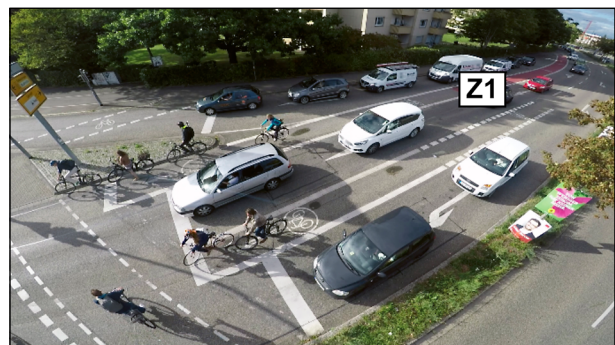


Bild 3-23: Knotenpunkt FR6 Eschholzstraße – Basler Straße – Lössacher Straße

erfolgten von benachbarten Gebäuden. So war es möglich, alle Zufahrten der Untersuchungsknotenpunkte gleichzeitig einzusehen.

Die Videodaten wurden mit entsprechend geringer Auflösung erhoben, sodass Kfz-Kennzeichen und Gesichter weder erkannt noch verfolgt werden konnten. Der Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz wurde am 20.06.2017 erhoben. Aufgrund von Sichteinschränkungen durch Bäume war eine Erfassung von Zufahrt Z1 nicht möglich. Bild 3-20 zeigt den Blick von der Erfassungsposition auf den Knotenpunkt M3.

Der Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße wurde mit einer Kamera erfasst, die an einem 17 m hohen Mast montiert wurde (vgl. Bild 3-21).

Der Mast wurde so ausgerichtet, dass die Zufahrten Z2 und Z4 erfasst werden konnten. Bild 3-22 stellt den Blick von der Erfassungsposition auf den Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße dar.

Der Knotenpunkt FR6 Eschholzstraße/Basler Straße/Lössacher Straße wurde mit einer Kamera erfasst, die an einem Mast montiert wurde. Bild 3-23 stellt den Blick von der Erfassungsposition auf den Knotenpunkt FR6 Eschholzstraße – Basler Straße – Lössacher Straße dar.

### 3.2.3 Extraktion von Trajektorien aus dem Videomaterial

Videodaten bieten viele Vorteile zur Analyse von Verkehrssicherheit und -effizienz an Knotenpunkten oder auf Strecken. Sie liefern Information über die gesamte Situation im Straßenraum einschließlich der Positionen und Fahrmanöver aller Verkehrsteilnehmer. Auch ungewöhnliche Ereignisse und – je nach Kameraperspektive und Lichtverhältnissen – der Zustand der Signalgeber können beobachtet werden. Mithilfe von Videobeobachtungen lassen sich Trajektorien (Bewegungsabläufe) einzelner Verkehrsteilnehmer ermitteln, die mindestens aus den Positionen und den zugehörigen Zeitinformationen bestehen. Jede dieser Positionen charakterisiert den Ort des Verkehrsteilnehmers in einem konkreten Einzelbild. Verkehrsforschung auf Basis von Trajektorien ermöglicht eine detaillierte und situations- und verkehrsablaufbezogene Analyse des Verhaltens einzelner Verkehrsteilnehmer sowie der Interaktionen zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern.

Videobasierte Erhebungen von Verkehr im Allgemeinen und verkehrsablaufbezogenen Kenngrößen im Speziellen erfolgen gemäß der in Bild 3-24 dargestellten prinzipiellen Vorgehensweise.

Eine Kamera stellt eine Videosequenz eines zu analysierenden Verkehrsraums mit einer bestimmten Bildwiederholrate (z. B. 25 Bilder/s) in einer bestimmten Auflösung (z. B. 1920x1080 Pixel) zur Verfügung. Diese Videosequenz wird mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung, der künstlichen Intelligenz und anderen Verfahren weiterverarbeitet, um Objekte (z. B. Fahrzeuge) zu klassifizieren und ihre Positionen im Bild zu bestimmen. Da sich die Positionen der im Video vorhandenen Objekte im Laufe der Zeit ändern, können durch Anwendung von sogenannten Tracking-Verfahren und der Modellierung von Bewegung mit geeigneten kinematischen oder fahrdynamischen Modellen aus diesen Positionen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Objekte ermittelt werden. Die resultierenden Weg-Zeit-Verläufe der nachverfolgten Objekte oder Merkmale werden als Trajektorien bezeichnet. Voraussetzung für diesen Prozess ist die Kalibrierung der verwendeten Kamera zur Bestimmung ihrer Verzeichnungsparameter und der Transformation der 2D-Bildkoordinaten der Videosequenz in die 3D-Welt (z. B. UTM-Koordinaten; UTM - Universal Transverse Mercator). Im Anhang 1 wird die in

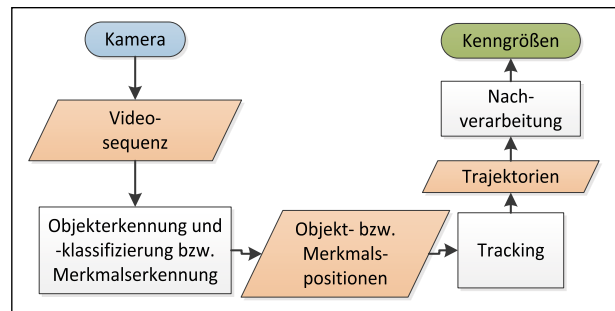


Bild 3-24: Prozesskette der Videobildverarbeitung

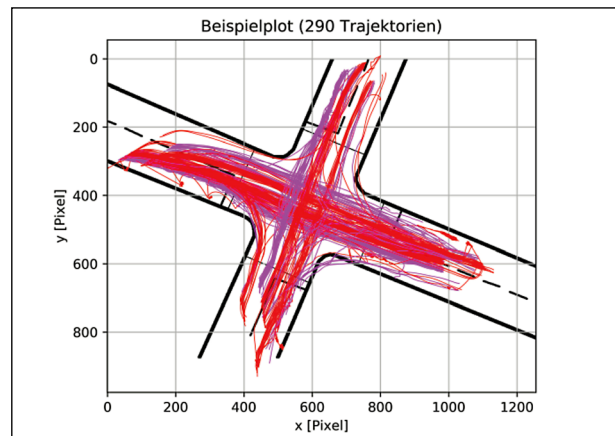


Bild 3-25: Beispieltrajektorien in der Draufsicht am Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße

Bild 3-24 dargestellte Prozesskette detaillierter erläutert.

In Bild 3-25 sind Trajektorien von Radfahrern (lila) und Kfz (rot) des Knotenpunktes München Schellingstraße/Luisenstraße beispielhaft dargestellt.

### 3.2.4 Vorgehensweise zur Ermittlung verkehrsablaufbezogener Kenngrößen

Gemäß Bild 3-24 schließt sich nach der Erzeugung von Verkehrsteilnehmertrajektorien die Nachverarbeitung an, um verkehrsablaufbezogene Kenngrößen zu ermitteln. Zur Bestimmung dieser Kenngrößen werden sog. Optische Schleifen bzw. sogenannte Areas of Interest (AOI) benötigt, die im Video platziert werden. Hierbei stellen optische Schleifen die Synonymbezeichnung für Induktivschleifen aus der Verkehrstechnik dar, die Verkehrsteilnehmer überqueren müssen. Mit deren Hilfe können dann beispielsweise Verkehrsstärken, lokale Geschwindigkeiten, Zeitlücken und weitere verkehrsablaufbezogene Kenngrößen ermittelt werden. Analog dazu sind AOIs räumlich ausgedehnte Bereiche, die ein Verkehrsteilnehmer durchquert. Mithilfe von AOIs können beispielsweise Belegungszeiten, Aufenthaltszeiten und weitere verkehrsablaufbezogene Kenngrößen ermittelt werden.



Bild 3-26: Platzierung von Optischen Schleifen am Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße

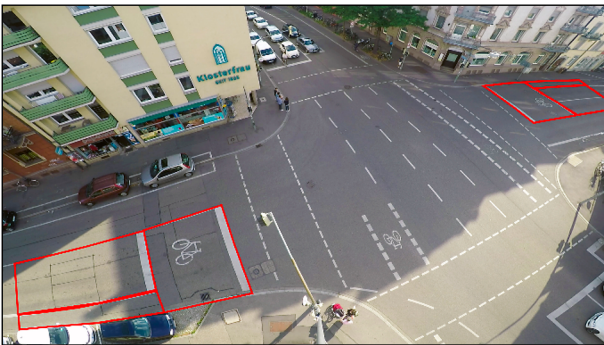


Bild 3-27: Platzierung der AOIs am Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße

In Bild 3-26 und Bild 3-27 sind Beispiele für die Platzierung von Optischen Schleifen bzw. AOIs am Beispiel des Knotenpunktes Lehener Straße/Eschholzstraße dargestellt.

### 3.3 Datenauswertung

Im Folgenden sind die wesentlichen Kenngrößen und Erkenntnisse beschrieben, die aus den Videodaten extrahiert wurden.

Die mittels Videoauswertung ermittelten Kenngrößen dienen vornehmlich dem Erkenntnisgewinn zur Kalibrierung und Validierung der Simulationsmodelle. Zusätzlich können in den Fällen, in denen eine ausreichende Datenmenge vorliegt, auch direkt aus der Empirie Erkenntnisse für das HBS abgeleitet werden.

Teilweise können die beschriebenen Kenngrößen nicht direkt aus den Trajektorien ermittelt werden, sodass Hilfskenngrößen ermittelt werden müssen, die den eigentlich benötigten Kenngrößen zugrunde liegen.

Nicht alle Kenngrößen und Zusammenhänge können effizient und effektiv automatisiert aus Trajektorien extrahiert werden. In manchen Fällen führt eine

manuelle Sichtung des Videomaterials schneller zu zuverlässigen Erkenntnissen.

Für die Auswertung werden jeweils die zwei Stunden (Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz: 1 Stunde) mit dem höchsten betrachtenden Radverkehrsaufkommen in den Videos ausgewählt.

Die erhobenen Kenngrößen werden in Box-Whisker-Plots oder in Säulendiagrammen dargestellt. Aus Box-Whisker-Plots lassen sich ablesen:

- Bereich, in dem die mittleren 50 % der Daten liegen (Box), wobei die unteren/oberen Grenzen die jeweiligen Quartile (25 % und 75 %) kennzeichnen.
- Median (Strich innerhalb der Box); liegt der Median nicht zentral, so ist die zugrundeliegende Verteilung schief.
- Whisker (Antennen) ober-/unterhalb der Box quantifizieren den 1,5-fachen Interquartilsabstand der Daten, um valide Daten und Ausreißer zu kennzeichnen).
- Ausreißer (Kreise außerhalb der Whisker), bei denen der 1,5-fache Interquartilsabstand nicht eingehalten wurde.

#### 3.3.1 Beschleunigungsverhalten

Die Beschleunigung von Radfahrern hat einen wesentlichen Einfluss auf die Zeit, die die Radfahrer zum Anfahren und zum Räumen von Konfliktbereichen mit dem Kfz-Verkehr benötigen. Entsprechend wichtig ist eine möglichst realistische Abbildung des Beschleunigungsverhaltens in der Simulation.

Die Ermittlung des Beschleunigungsverhaltens erfolgte in vier Schritten.

- (1) Zunächst wurden die relevanten Trajektorien identifiziert. Da an dieser Stelle speziell das Anfahrverhalten von Interesse ist, wurden nur Trajektorien von Radfahrern verwendet, die aus dem Stand angefahren sind.
- (2) Aus diesen Trajektorien wurden die relevanten Ausschnitte extrahiert. Es wurde nur der Teil bis zum Erreichen eines konstanten Geschwindigkeitsniveaus verwendet (Erreichen der persönlichen Wunschgeschwindigkeit oder Behinderung durch andere Verkehrsteilnehmer).
- (3) Für die extrahierten Trajektorien wurden durch Differenzieren der Ortsfunktion über die Zeit

$a(t) = \dot{v}(t) = \ddot{x}(t)$  die Beschleunigung und die Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt ermittelt. Dabei war eine umfangreiche Glättung mit einem Savitzky-Golay-Filter (TWADDLE & GRIGOROPOULOS, 2016) aufgrund der verrauschten Objektpositionen und der zweimaligen Differenzierung notwendig. Somit kann zunächst eine mittlere Beschleunigung der aus dem Stand anfahrens Radfahrer ermittelt werden.

Bild 3-28 bis Bild 3-30 zeigen die mittlere Beschleunigung je Anfahrvorgang differenziert nach der Art der Fahrradführung, dem definierten Zufahrtstyp und der Breite des Radwegs oder Radfahrstreifens. Die Mittelwerte liegen zwischen 0,52 m/s<sup>2</sup> und 1,02 m/s<sup>2</sup> und sind relativ homogen. Die beobachteten Mittelwerte entsprechen den gestreuten Werten aus der Literatur (0,25 m/s<sup>2</sup> bis 1,52 m/s<sup>2</sup>) (TAYLOR, 1993; PARKIN & ROTHERAM, 2010; FIGLIOZZI, WHEELER & MONSERE, 2013)

(4) Für die Simulation ist weiterhin zu beachten, dass die Beschleunigung nicht konstant ist, sondern von der Geschwindigkeit abhängt. Daher wurden die mittleren Beschleunigungen nach Geschwindigkeitsbereichen differenziert analysiert.

In Bild 3-31 ist beispielhaft die Beschleunigung an der Zufahrt Z3 des Knotenpunkts M4 Schellingstraße/Luisenstraße dargestellt.

Bild 3-32 zeigt beispielhaft die Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit an der Zufahrt Z1 des Knotenpunkts B3 Karl-Liebknecht-Straße/Spandauer Straße.

Die Zusammenhänge sind ähnlich und zeigen eine mit der Geschwindigkeit abnehmende mittlere Beschleunigung.

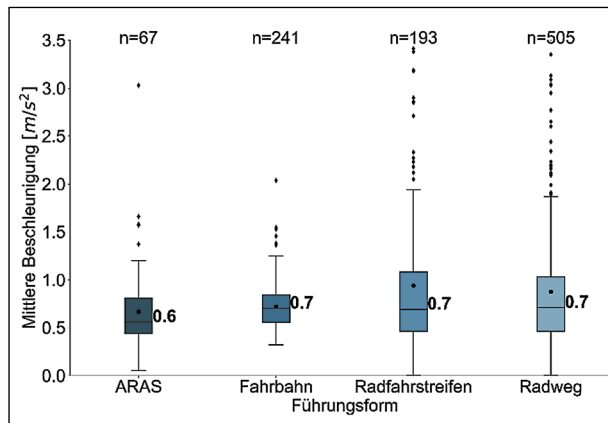


Bild 3-28: Mittlere Beschleunigung in Abhängigkeit der Art der Fahrradführung

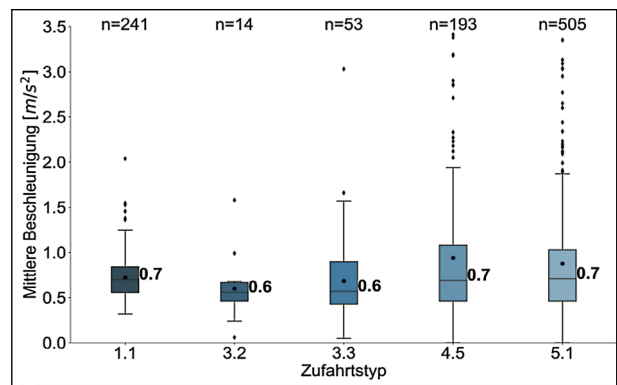


Bild 3-29: Mittlere Beschleunigung in Abhängigkeit des Zufahrtstyps

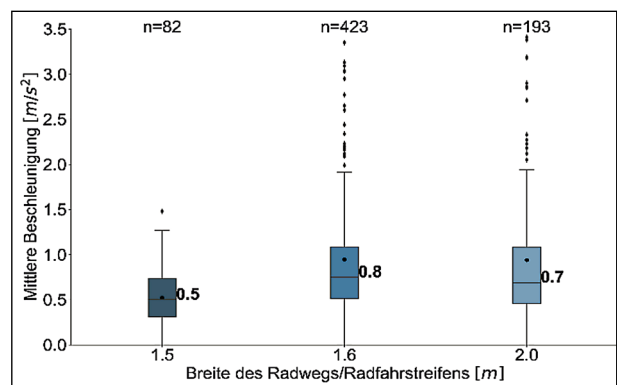


Bild 3-30: Mittlere Beschleunigung in Abhängigkeit der Breite des Radwegs/Radfahrstreifens

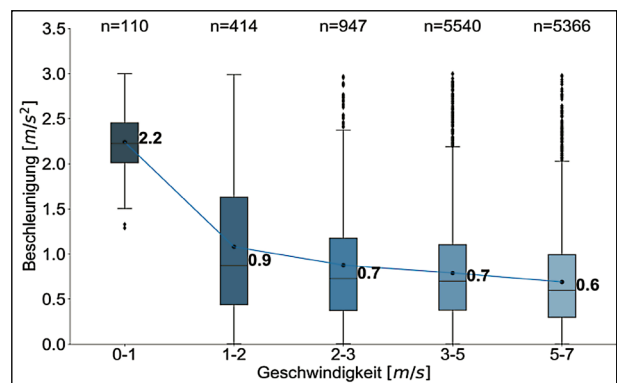


Bild 3-31: Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit an Zufahrt Z3 am Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße (N gibt die Stichprobengröße an).

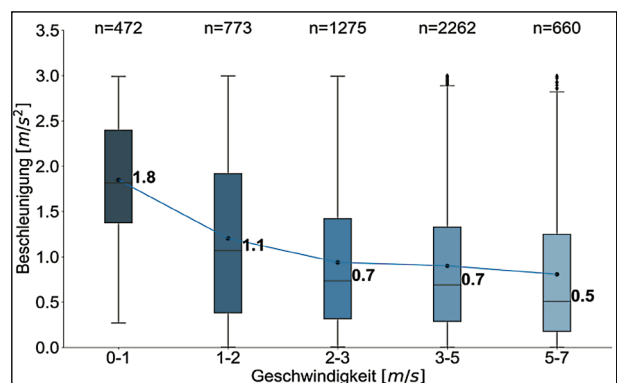


Bild 3-32: Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit an Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B3 Karl-Lieb-knecht-Straße/Spandauer Straße



### 3.3.2 Mittlere Maximale Geschwindigkeit

Eine parametrierbare Eigenschaft von Verkehrsteilnehmern in Simulationsmodellen ist ihre Wunschgeschwindigkeit. Das ist die Geschwindigkeit, die sie nach einem Beschleunigungsprozess erreichen und halten, wenn sie nicht von anderen Verkehrsteilnehmern oder sonstigen Eingriffen gehindert werden. Die Wunschgeschwindigkeit ist nicht so bedeutend für den anfahrensden Radverkehr, aber stattdessen für den fließenden Radverkehr (z. B. für die Betrachtung übergeordneter Radverkehrsströme bei bedingt verträglich abbiegendem Kfz-Verkehr).

Die Wunschgeschwindigkeit kann nicht direkt gemessen werden, sie wird als ein Surrogat aus den Videodaten erhoben. Sie ist der Mittelwert der Geschwindigkeiten, die die Radfahrer nach Beendigung des Beschleunigungsvorgangs erreicht haben, wenn sie unbeeinflusst von anderen Verkehrsteilnehmern oder Verkehrsregelungen fahren.

Die Mittlere Maximale Geschwindigkeit wird durch die maximale erreichte Geschwindigkeit eines frei abfließenden Radfahrers ermittelt, wobei diese wie bei der Berechnung des Beschleunigungsverhaltens mithilfe des Savitzky-Golay-Filters geglättet wurde.

In Bild 3-33 bis Bild 3-35 sind die Mittleren Maximalen Geschwindigkeiten der Radfahrer differenziert nach der Art der Führungsform, des Zufahrtstyp und der Breite des Radwegs bzw. Radfahrstreifens dargestellt.

Die Mittleren Maximalen Geschwindigkeiten liegen im Bereich von 3,5 m/s bis 5,9 m/s (12,7 km/h bis 21,4 km/h). Die Ergebnisse zeigen, dass Radfahrer insgesamt schneller auf der Fahrbahn (ARAS, direkte Fahrbahnführung, Radfahrstreifen) fahren als auf abgetrennten Radwegen. Sie fahren auch schneller auf breiteren Radwegen bzw. Radfahrstreifen als auf schmaleren.

Bild 3-36 stellt die kumulierten Verteilungsfunktionen der Mittleren Maximalen Geschwindigkeiten für verschiedene Knotenpunkte dar. Die schwarze Kurve veranschaulicht die durchschnittliche Mittlere Maximale Geschwindigkeit für alle beobachteten Radfahrer zusammen mit den 15., 50. und 85. Perzentilen. Es kann festgestellt werden, dass diese kumulierte Verteilungsfunktion sehr gut mit denen aus der Literatur übereinstimmt (FALKENBERG et al., 2003; City of Copenhagen, 2012; Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), 2015).

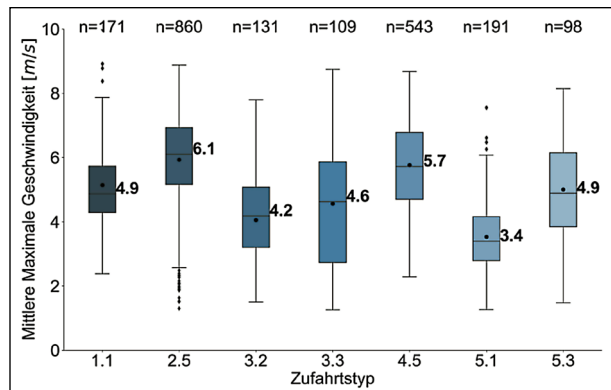


Bild 3-33: Mittlere Maximale Geschwindigkeit der Radfahrer in Abhängigkeit des Zufahrtstyps

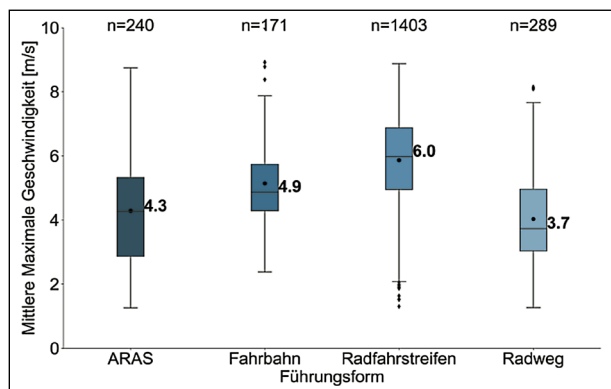


Bild 3-34: Mittlere Maximale Geschwindigkeit der Radfahrer in Abhängigkeit der Art der Führungsform

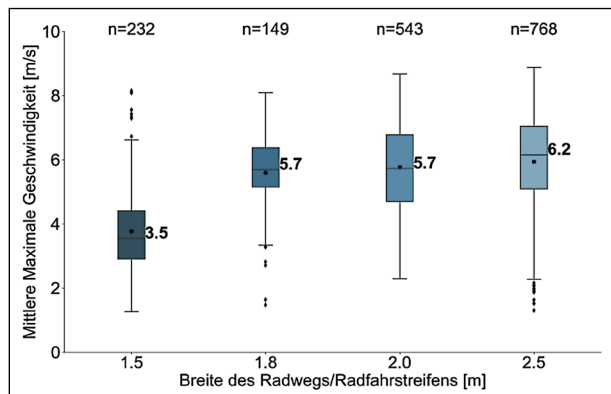


Bild 3-35: Mittlere Maximale Geschwindigkeit der Radfahrer in Abhängigkeit der Breite des Radwegs/Radfahrstreifens

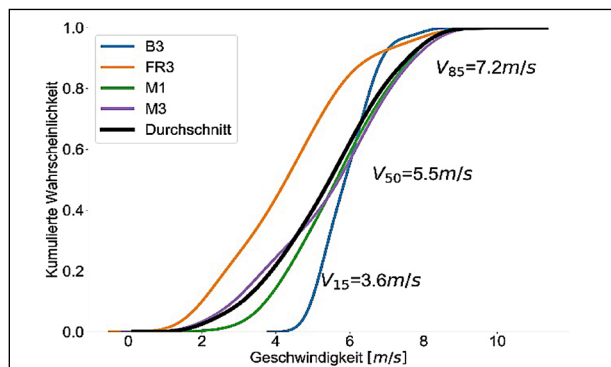


Bild 3-36: Kumulierte Verteilungsfunktion der mittleren maximalen Geschwindigkeiten an den Knotenpunkten M1, M3, B3 und FR3

### 3.3.3 Dichte im Stand

Die Dichte im Stand beschreibt die Anzahl der Radfahrer, die je Quadratmeter Fläche auf einer Radverkehrsanlage vor der Haltlinie warten. Die Dichte im Stand kann sowohl als Basisgröße für die Verkehrssimulation dienen als auch für den Entwurf von Straßenverkehrsanlagen (Stauraumbemessung) und die Analyse von Einsatzgrenzen verwendet werden.

Aus methodischen Gründen werden bei der Kenngrößenermittlung zwei Fälle unterschieden:

#### Fall 1: kein aufgeweiteter Aufstellbereich

Auf Anlagen (Radwege, Radfahrstreifen, Schutzstreifen) ohne aufgeweiteten Aufstellbereich wird die Dichte im Stand ermittelt zu:

$$k_{Stand, Radweg} = \frac{n_{Stand}}{l_{Stau} \cdot b} \quad \text{Gl. 1}$$

Mit:

$k_{Stand, Radweg}$  Dichte im Stand auf einem Radweg, Radfahrstreifen oder Schutzstreifen  $\left[\frac{Rad}{m^2}\right]$

$n_{Stand}$  Anzahl stehender Räder im Rückstau bei Freigabezeitbeginn  $[Rad]$

$l_{Stau}$  Länge des Rückstaus bei Freigabezeitbeginn  $[m]$

$b$  Breite des Aufstellbereichs  $[m]$

Das Bild 3-37 veranschaulicht beispielweise die Dichte im Stand an den ausgewerteten Zufahrten des Knotenpunkts M3 Kapuzinerplatz.

Die Ergebnisse aller untersuchten Knotenpunkte wurden aggregiert und nach Zufahrtstyp sortiert. In Bild 3-38 ist die relativ homogene Dichte im Stand für die untersuchten Zufahrtstypen zu erkennen. Die Dichte im Stand in Abhängigkeit der Führungsform (Radweg und Radfahrstreifen) ist in Bild 3-39 dargestellt.

Im Bild 3-40 ist die Dichte im Stand in Abhängigkeit der Breite des Radwegs zu dargestellt. Obwohl die Mittelwerte eine geringe Varianz aufweisen (zwischen 0,20 – 0,35 Fahrräder je Quadratmeter), ist eine leichte Tendenz zu erkennen: Auf engen Radwegen stellen sich die Radfahrer hintereinander auf. Wenn die Radwege breiter werden, stellen sich die Radfahrer öfter nebeneinander auf. Auf sehr

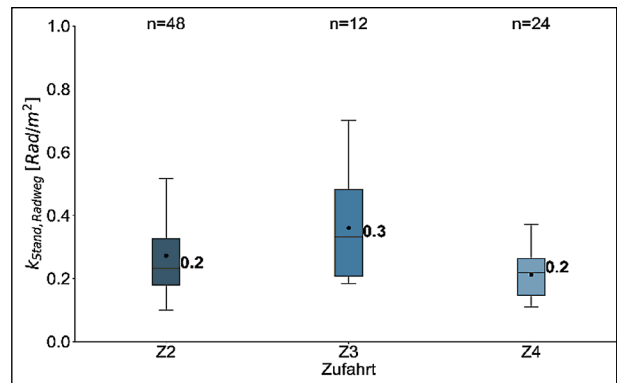


Bild 3-37: Dichte im Stand der Radfahrer am Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz

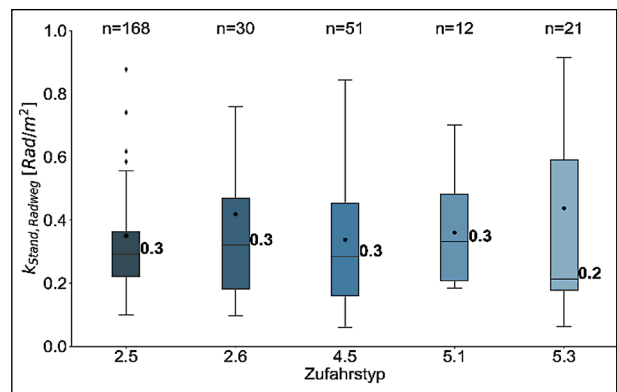


Bild 3-38: Aggregierte Dichte im Stand der Radfahrer an unterschiedlichen Zufahrtstypen

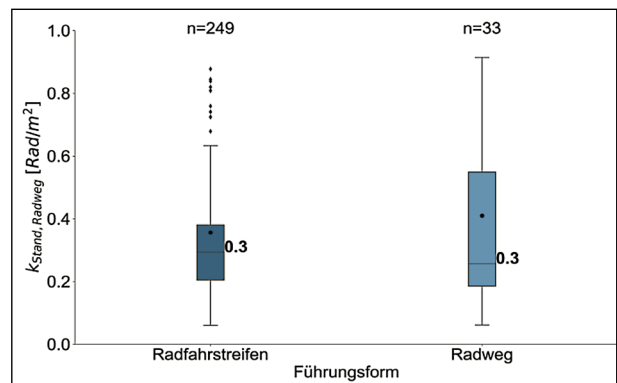


Bild 3-39: Aggregierte Dichte im Stand der Radfahrer bei unterschiedlichen Führungsformen

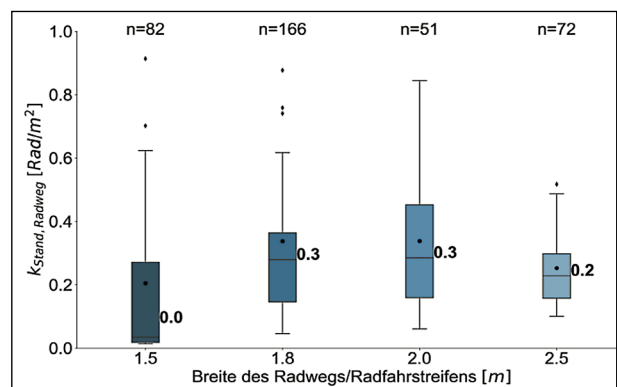


Bild 3-40: Aggregierte Dichte im Stand der Radfahrer bei unterschiedlichen Breiten des Radwegs/Radfahrstreifens

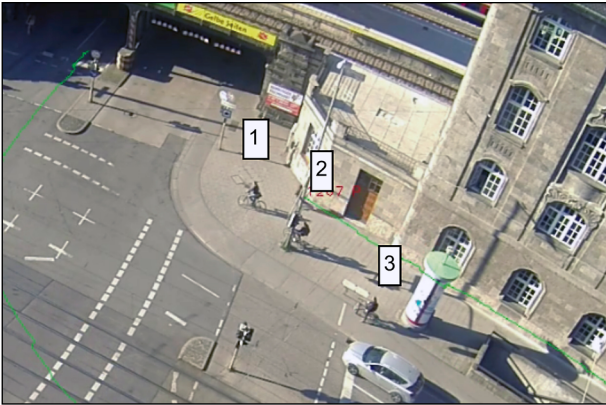


Bild 3-41: Beispiel für das Aufstellverhalten von Radfahrern an Zufahrt Z4 am Knotenpunkt M2 Arnulfstraße/Seidlstraße

breiten Radwegen fällt die Dichte wieder, da die Radfahrer nebeneinander mehr Platz haben.

Die Kenngröße „Dichte im Stand“ konnte nicht an allen der vier Zufahrten des Knotenpunkts M2 Arnulfstraße/Seidlstraße bestimmt werden, da der Blick zur Zufahrt Z1 am Knotenpunkt M2 Arnulfstraße/Seidlstraße durch einen Baum eingeschränkt war und somit der Aufstellbereich für den Radverkehr nicht erhoben werden konnte. Zufahrt Z2 entspricht einer Sonderform des Zufahrtstyps 1.2, wobei der rechtsabbiegende Radverkehr über der Dreieckinsel ohne Beeinflussung von der Lichtsignalsteuerung geführt wird. Bei Zufahrt Z3 liegt der Aufstellbereich für den Radverkehr unter der Eisenbahnbrücke des Münchner Hauptbahnhofs. Bei Zufahrt Z4 liegt die Haltelinie für den Radverkehr 11 m entfernt von der tatsächlichen Querungsstelle. Auf Basis einer manuellen Sichtung der Videos wurde festgestellt, dass mehrere Radfahrer an unterschiedlichen Stellen nach der Haltlinie anhalten (Bild 3-41).

**Fall 2: ARAS (aufgeweiteter Radaufstellstreifen)**

In ARAS ist die Dichte im Stand etwas schwieriger zu bestimmen, da ein eindeutiges Stauende bei einer breiten Wartefläche schwierig zu erkennen ist. Daher wird nur der Fall betrachtet, an dem der ARAS zweifelsfrei als vollständig belegt erkannt wurde. Dies wurde auf Basis manueller Videobeobachtungen dadurch festgestellt, dass neu ankommende Radfahrer nicht mehr in den ARAS eingefahren sind. Dies alleine ist noch kein sicherer Indikator dafür, dass ein ARAS voll ist, da z. B. geradeausfahrende Radfahrer sich auch dann manchmal hintenstellen, wenn im ARAS noch Platz ist.

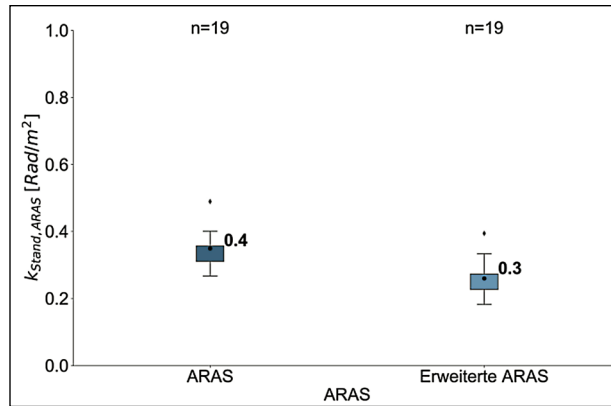


Bild 3-42: Dichte im Stand der Radfahrer an Zufahrt Z1 für ARAS und erweiterten ARAS am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße

Im ARAS wird die Dichte im Stand ermittelt zu:

$$k_{Stand,ARAS} = \frac{n_{Stand}}{F} \tag{Gl. 2}$$

Mit:

$k_{Stand,ARAS}$  Dichte im Stand in einem ARAS  $\left[\frac{Rad}{m^2}\right]$

$n_{Stand}$  Anzahl stehender Fahrräder im ARAS bei Freigabezeitbeginn [Rad]

$F$  Fläche des ARAS  $[m^2]$

In Bild 3-42 ist die Kenngröße  $k_{Stand,ARAS}$  für den ARAS und den bis zur Abflusslinie erweiterten ARAS am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße dargestellt.

**3.3.4 Mittlerer Zeitbedarfswert der Radfahrer**

Der mittlere Zeitbedarfswert  $t_{B,Rad}$  gibt an, wie lange ein Radfahrer im Mittel zum Abfließen an einer Haltlinie benötigt.

Da Radfahrer – je nach Breite der Radverkehrsanlage – nebeneinander fahren können, unterscheidet sich die Definition und die Ermittlung des Zeitbedarfswerts von der des Kfz-Verkehrs.

Gemessen wird, wie lange es von Freigabezeitbeginn an dauert, bis der letzte Radfahrer, der bei Beginn der Freigabezeit bereits gewartet hat, vollständig über die Abflusslinie gefahren ist. Diese Dauer wird durch die Anzahl der einbezogenen Radfahrer geteilt:

$$t_{B,Rad} = \frac{t_n}{n} \tag{Gl. 3}$$

Mit:

$t_{B,Rad}$  Mittlerer Zeitbedarfswert der Radfahrer  $\left[\frac{s}{Rad}\right]$

- $t_n$  Dauer von Freigabezeitbeginn bis der n-te (der letzte) Radfahrer, der bei Beginn der Freigabezeit bereits gewartet hat, vollständig über die Abflusslinie gefahren ist [s]
- $n$  Anzahl Fahrräder, die bei Beginn der Freigabezeit bereits gewartet haben [Rad]

In Bild 3-43 sind beispielhaft die Zeitbedarfswerte der Radfahrer an Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz je Zufahrt dargestellt.

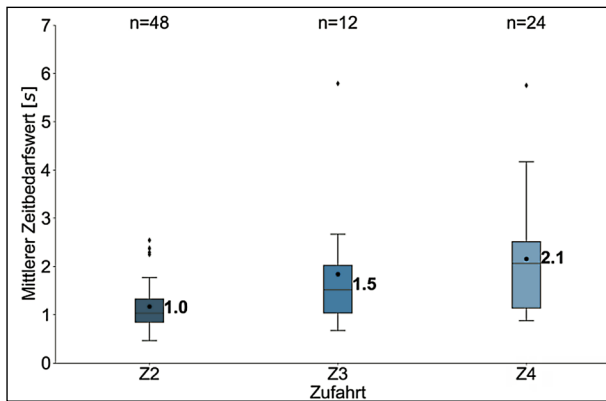


Bild 3-43: Mittlere Zeitbedarfswerte der Radfahrer an Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz

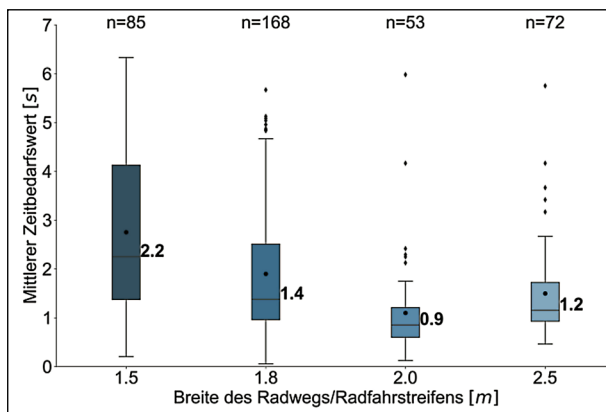


Bild 3-44: Mittlere Zeitbedarfswerte der Radfahrer bei unterschiedlichen Breiten des Radwegs/Radfahrestreifens

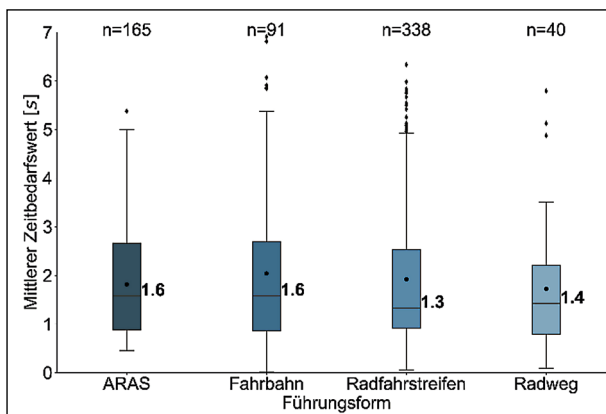


Bild 3-45: Mittlere Zeitbedarfswerte der Radfahrer bei unterschiedlichen Führungsformen

Die Daten von allen untersuchten Knotenpunkten wurden so analysiert, um das Verhalten der Radfahrer in Abhängigkeit unterschiedlicher Breiten des Radwegs und unterschiedlicher Führungsformen zu untersuchen.

Es ist zu erwarten, dass  $t_{B,Rad}$  mit zunehmender Breite der Radverkehrsanlage abnimmt, da dann mehrere Radfahrer nebeneinander fahren können. Bild 3-44 zeigt diese Tendenz an den untersuchten Knotenpunkten. Sowohl der mittlere Zeitbedarfswert als auch die Varianz der beobachteten Werte sinken mit zunehmender Breite des Radwegs/Radfahrestreifens. Die Abnahme des Zeitbedarfswertes mit zunehmender Breite ist plausibel, da die gestauten Radfahrer sich versetzt oder nebeneinander vor der Haltlinie aufstellen können und bei Beginn der Freigabezeit entsprechend zügiger abfließen. Die Zunahme des durchschnittlichen Zeitbedarfswertes bei  $B = 2,5$  m ist ein Ausreißer in der Auswertung. Die Folgerung, dass ab einer Breite von  $B = 2,5$  m der Zeitbedarfswert generell wieder zunimmt, erscheint nicht plausibel. Eine mögliche Erklärung für die unerwarteten Ergebnisse ist, dass die Zeitbedarfswerte bei  $B = 2,5$  m ausschließlich am Knotenpunkt M1 beobachtet wurden und somit die Knotenpunktausprägung und/oder lokale Besonderheiten im Fahrverhalten eine Rolle spielen können. Die Auswertung der Dichte im Stand zeigt, dass sich die Radfahrer am Knoten M1 (bei  $B = 2,5$  m) mit vergleichsweise großen Abständen untereinander aufstellen (vgl. Bild 3-42).

Im Vergleich zur Breite des Radwegs/Radfahrestreifens spielt die Art der Führungsform eine eher untergeordnete Rolle beim Abfließen der Radfahrer an der Haltlinie (Bild 3-45).

### 3.3.5 Zeitbedarfswerte des ersten abfließenden Radfahrers

Zusätzlich wurde der Zeitbedarfswert des ersten abfließenden Radfahrers ermittelt. Dabei handelt es sich um die Zeit zwischen Freigabezeitbeginn und dem Zeitpunkt, bei dem der erste Radfahrer, der bei Freigabezeitbeginn gewartet hat, vollständig über die Abflusslinie gefahren ist.

In Bild 3-46 sind die Zeitbedarfswerte für den ersten abfließenden Radfahrer beispielhaft für den Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz dargestellt.

Wie in Kapitel 3.3.4 wurden die Zeitbedarfswerte an allen Zufahrten der untersuchten Knotenpunkte er-

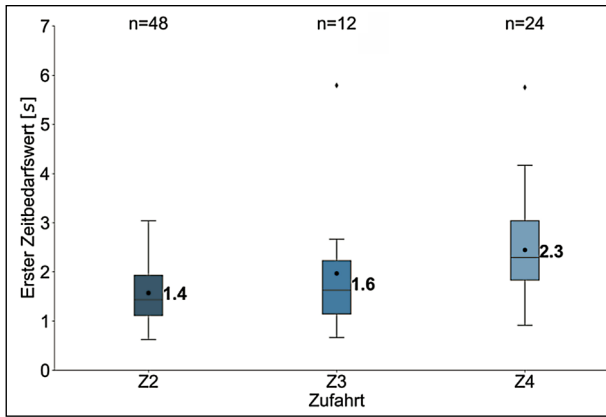


Bild 3-46: Zeitbedarfswerte des ersten abfließenden Radfahrers am Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz

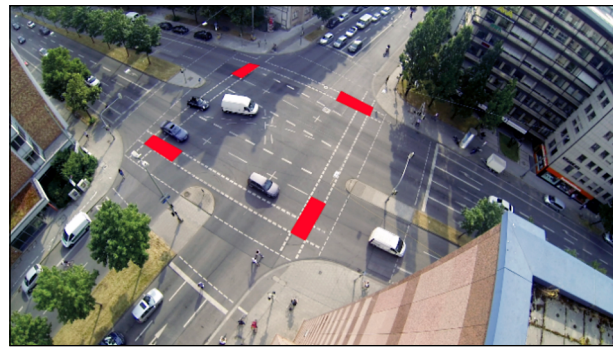


Bild 3-49: Platzierung der AOIs zur Auswertung der Belegungszeit am Radfahrerfurt am Knotenpunkt M1 Marsstraße/Seidlstraße

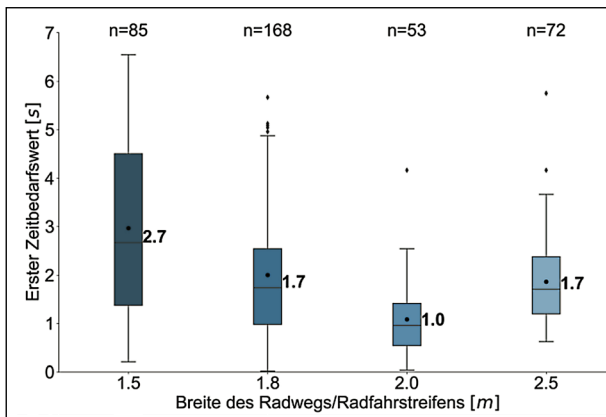


Bild 3-47: Zeitbedarfswerte des ersten abfließenden Radfahrers bei unterschiedlichen Breiten des Radwegs/Radfahrstreifens

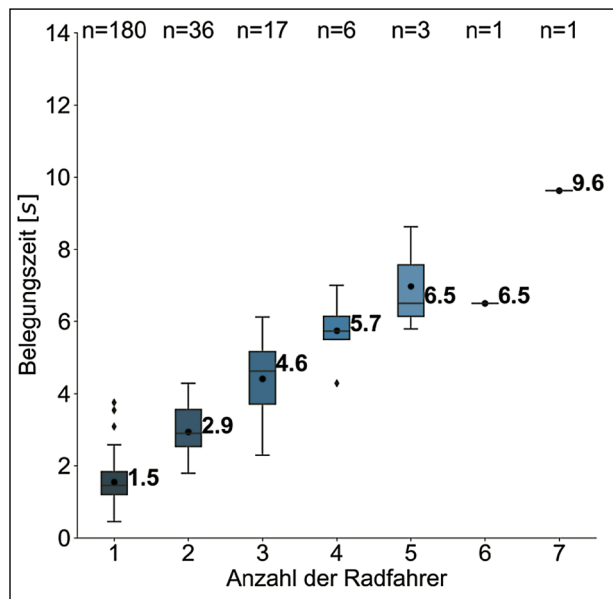


Bild 3-50: Belegungszeiten der Radfahrerfurt in Abhängigkeit der Anzahl der Furt blockierender Radfahrer an Zufahrten vom Typ 1.1 am Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße.jpg

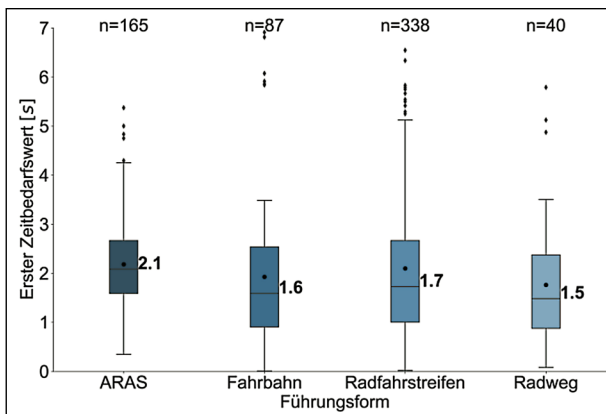


Bild 3-48: Zeitbedarfswerte des ersten abfließenden Radfahrers bei unterschiedlichen Radverkehrsführungsformen

mittelt und aggregiert. Im Vergleich zu den mittleren Zeitbedarfswerten sind die Zeitbedarfswerte des ersten abfließenden Radfahrers größer und weisen eine höhere Varianz auf.

Die beobachteten Zeitbedarfswerte des ersten abfließenden Radfahrers und die entsprechende Varianz zwischen den Werten sinken mit der Breite des Fahrradwegs/Radfahrstreifens (Bild 3-47). Vermut-

lich stellen sich schnellere Radfahrer, die schneller auf ihre Wunschgeschwindigkeit beschleunigen, bei breiteren Fahrradwegen vorne in der Schlange an.

Analog zur Betrachtung mittlerer Zeitbedarfswerte spielt beim Zeitbedarfswert des ersten Radfahrers die Radverkehrsführungsform eine untergeordnete Rolle (siehe Bild 3-48).

### 3.3.6 Belegungszeit Radfahrerfurt

Die Belegungszeit einer Radfahrerfurt  $t_{BZ,Rad,Furt}$  ist definiert als die Dauer in Sekunden, die die Konfliktfläche zwischen bedingt verträglich rechtsabbiegenden Kfz und in die gleiche Richtung geradeausfahrenden Radfahrern von Radfahrern belegt ist. Diese Definition ist analog zur Definition der Belegungszeit durch Fußgänger (HBS S4.4.5, Bild S4-10) (FGSV, 2015a). Hier wird nur der erste Radfah-

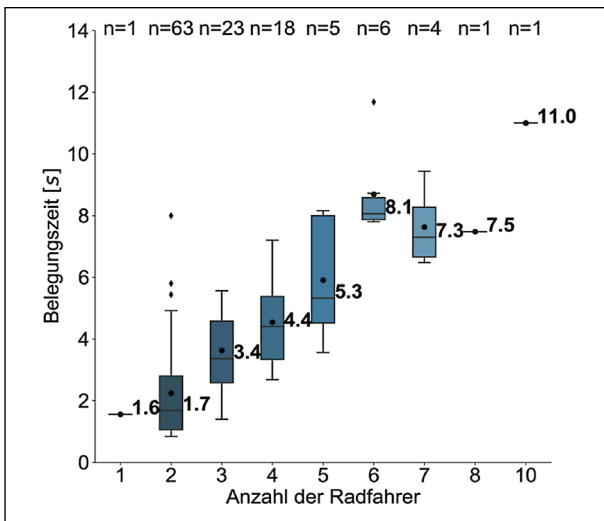


Bild 3-51: Belegungszeiten der Radfahrerfurt in Abhängigkeit der Anzahl der Furt blockierender Radfahrer an Zufahrten vom Typ 4.5 an den Knotenpunkten M1 Marsstraße/Seidlstraße und M2 Arnulfstraße/Seidlstraße

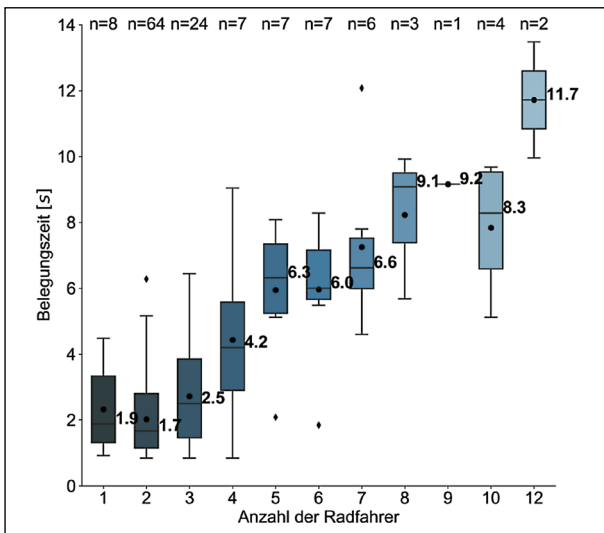


Bild 3-52: Belegungszeiten der Radfahrerfurt in Abhängigkeit der Anzahl der Furt blockierender Radfahrer an Zufahrten vom Typ 5.3 an den Knotenpunkten M1 Marsstraße/Seidlstraße und M2 Arnulfstraße/Seidlstraße

rempulk betrachtet, der nach Freigabezeitbeginn über die Konfliktfläche abgeflissen ist, wobei die Konfliktfläche ununterbrochen von mindestens einem Radfahrer besetzt war. Später ankommende Radfahrer, die das Abbiegen der Kfz ebenfalls behindern, sind an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da es sich um einen anderen Prozess handelt (Durchsetzen eines Verkehrsstroms). In Bild 3-49 ist die Platzierung der AOs zur Auswertung der Belegungszeit der Radfahrerfurt am Knotenpunkt M1 Marsstraße/Seidlstraße dargestellt.

Für die Bemessung der Lichtsignalsteuerung ist die Belegungszeit in Abhängigkeit der Anzahl warten-

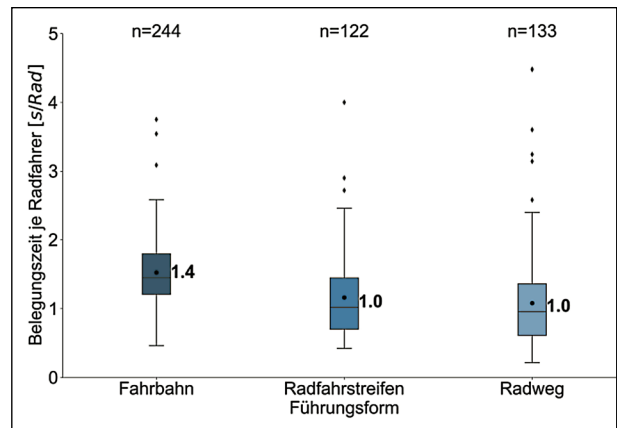


Bild 3-53: Belegungszeiten je Radfahrer der Radfahrerfurt in Abhängigkeit der Führungsmoart

der und dann abfließender Radfahrer von Interesse.

In Bild 3-50 sind die Belegungszeiten in Abhängigkeit der Anzahl der Radfahrer an Zufahrten mit Fahrradführung auf der Fahrbahn (Typ 1.1) dargestellt. Bild 3-51 und Bild 3-52 zeigen die Belegungszeiten an Zufahrten mit Radfahrstreifen (Typ 4.5) und Radwegen (Typ 5.3).

An den Führungsmoarten Radfahrstreifen und Radweg können im Mittel konstante Belegungszeiten je Radfahrer beobachtet werden (Bild 3-53). Die Belegungszeiten sind am größten, wenn der Radverkehr auf der Fahrbahn geführt wird.

### 3.3.7 Belegungszeit ARAS

Die Belegungszeit eines ARAS  $t_{BZ,Rad,ARAS}$  ist definiert als die Dauer von Freigabezeitbeginn bis der letzte Radfahrer, der zu Beginn der Freigabezeit bereits gewartet hat, vollständig über die Abflusslinie gefahren ist.

Für die Bemessung von Radverkehrsanlagen ist die Belegungszeit in Abhängigkeit der Anzahl wartender und dann abfließender Radfahrer von Interesse.

In Bild 3-54 sind die Belegungszeiten für ARAS am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße dargestellt.

Es kann festgestellt werden, dass die Belegungszeiten in ARAS linear anwachsen, je mehr Radfahrer vorher gewartet haben. Im Vergleich zu anderen Führungsmoarten ist der Anstieg aber deutlich geringer (vgl. Bild 3-52 und Bild 3-54), was dadurch begründet werden kann, dass mehr Platz zum Neben-

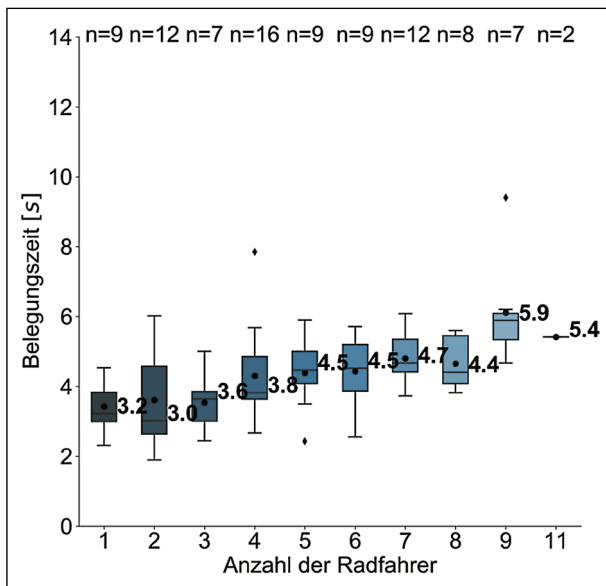


Bild 3-54: Belegungszeiten letzter Radfahrer am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße (ARAS)

einanderaufstellen und Verlassen des ARAS vorhanden ist als auf Radfahrstreifen oder Radwegen.

### 3.3.8 Belegungszeit Aufstellbereich für indirekt linksabbiegende

Die Belegungszeit eines Aufstellbereichs für indirekt linksabbiegende  $t_{BZ,Rad,IndirektLinks}$  ist definiert als die Dauer von Freigabezeitbeginn bis der letzte Radfahrer, der zu Beginn der Freigabezeit bereits gewartet hat, vollständig über die Abflusslinie gefahren ist.

Relevant für die Bemessung sind dabei Behinderungen des querenden Kfz-Verkehrs. Diese ergibt sich aus dem Zusammenspiel der Belegungszeit, der Signalisierung (Vorlauf der Radfahrer) und der Knotenpunktgeometrie.

Am Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz ist ein Aufstellbereich für indirekte Linksabbieger vorhanden. Durch manuelle Überprüfung der Videos wurde festgestellt, dass der Aufstellbereich selten von indirekt linksabbiegenden Radfahrern benutzt wurde, wobei dieser noch seltener vollständig von Radfahrern belegt wurde. Gleichzeitig ist der Aufstellbereich auf die rechte Seite der Zufahrt Z1 verschoben, sodass keine Beeinträchtigungen für den querenden Kfz-Verkehr entstehen. Der rechtsabbiegende Verkehr wird über eine Dreieckinsel geführt, sodass keine Beeinträchtigungen für den rechtsabbiegenden motorisierten Verkehr durch indirekt linksabbiegenden Radfahrerverkehr entstehen. Eine empirische Analyse wurde hierzu nicht durchge-

führt, da diese Fälle in der erhobenen Datenbasis nicht aufgetreten sind. Es werden verschiedene Szenarien simulativ untersucht.

### 3.3.9 Einfluss bedingt verträglich linksabbiegender Radfahrer auf bedingt verträglich linksabbiegende Kfz

Eine zu klärende Frage ist, inwieweit und in welchen Situationen bedingt verträglich linksabbiegende Kfz durch im gleichen Strom bedingt verträglich linksabbiegende Radfahrer behindert werden.

Grundsätzlich liegt keine Behinderung vor, wenn die Kfz unabhängig von den Radfahrern den Gegenverkehr durchsetzen können.

Unter der Annahme, dass Radfahrer im Mittel keine kleineren Zeittücken akzeptieren als Kfz (da sie weniger schnell beschleunigen und verletzlicher sind), kann als Störungsindikator folgende Bedingung formuliert werden: Wenn eine Zeittücke von einem Radfahrer genutzt wird und nicht von einem wartenden Kfz, dann liegt eine Behinderung vor.

Der Umkehrschluss (Wenn eine Lücke von einem Radfahrer und einem Kfz genutzt werden, dann liegt keine Behinderung vor) gilt nicht zwingend, da ein Kfz möglicherweise schon eine frühere (kleinere) Zeittücke genutzt haben könnte, wenn es nicht durch den Radverkehr behindert worden wäre.

Dennoch wurde zunächst die o. g. manuelle Video-sichtung durchgeführt, um zu überprüfen, ob und in welchen Situationen Behinderungen auftreten, da weitergehende quantitative Analysen sonst sehr aufwändig wären.

An Knotenpunkt FR3 Lehner Straße/Eschholzstraße werden bedingt verträglich linksabbiegende Radfahrer zusammen mit bedingt verträglich linksabbiegenden Kfz geführt. In der Videoanalyse konnten keine Behinderungen festgestellt werden. Dies ist exemplarisch in Bild 3-55 bis Bild 3-57 für den Knotenpunkt FR3 Lehner Straße/Eschholzstraße dargestellt.

In dem untersuchten Videomaterial vom Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße konnte in den wenigen Fällen mit bedingt verträglichen Linksabbiegern kein einziger Fall identifiziert werden, bei dem Radfahrer einen Einfluss auf bedingt verträgliche Kfz hatten. Es traten lediglich Situationen auf, in denen Kfz von Kfz bzw. Radfahrer von Kfz beeinflusst wurden, wie sie beispielhaft in Bild 3-58 und



Bild 3-55: Knotenpunkt FR3 Lehner Straße/Eschholzstraße  
Beispiel 1: Bedingt verträglich linksabbiegender Kfz wird nicht von linksabbiegender Radfahrer behindert

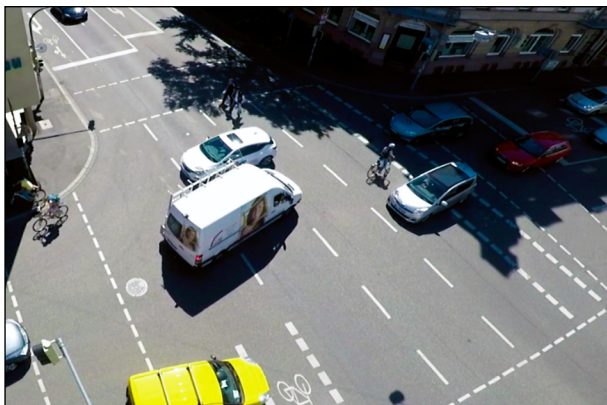


Bild 3-56: Knotenpunkt FR3 Lehner Straße/Eschholzstraße  
Beispiel 2: Bedingt verträglich linksabbiegender Kfz wird nicht von linksabbiegender Radfahrer behindert

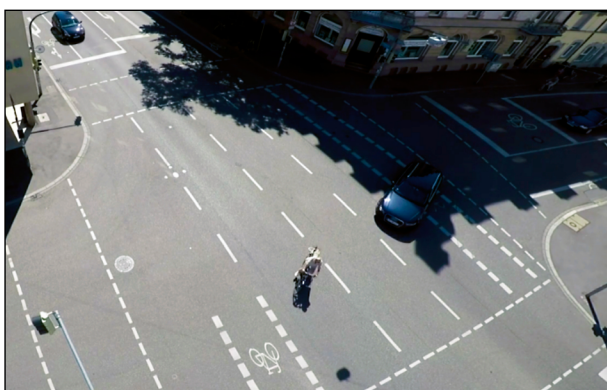


Bild 3-57: Knotenpunkt FR3 Lehner Straße/Eschholzstraße  
Beispiel 3: Bedingt verträglich linksabbiegender Kfz wird nicht von linksabbiegender Radfahrer behindert

Bild 3-59 veranschaulicht sind. In Bild 3-58 wird der linksabbiegender Pkw (ID 592) durch das ebenfalls linksabbiegender Kraftrad (ID 46) beeinflusst.

In Bild 3-59 wird ein linksabbiegender Radfahrer (ID 551) durch den linksabbiegender Pkw (ID 514) beeinflusst.

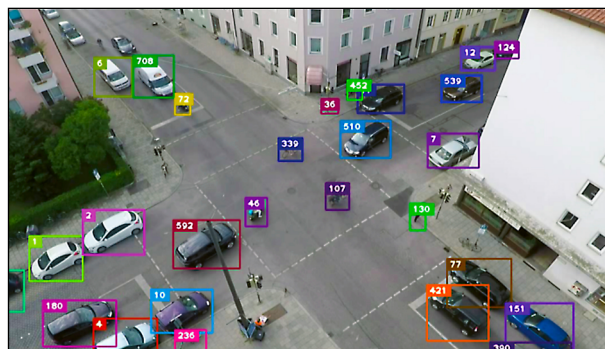


Bild 3-58: Beeinflussung eines links verträglich Kfz (ID 592) durch ein Kfz (ID 46) Knotenpunkt M4 München Schellingstraße/Luisenstraße

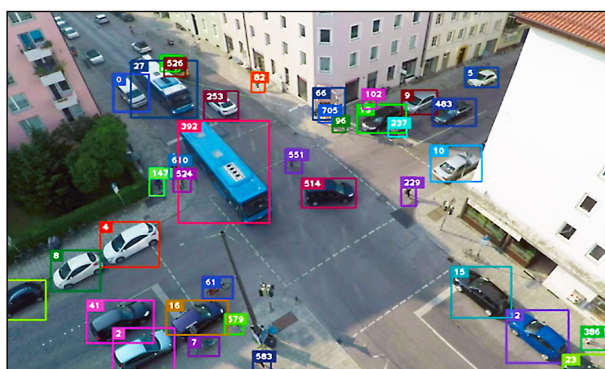


Bild 3-59: Beeinflussung eines links verträglich Radfahrers (ID 551) durch ein Kfz (ID 514) Knotenpunkt M4 München Schellingstraße/Luisenstraße

Somit wird angenommen, dass die Grenzzeitlücke unabhängig von der Fahrzeugart der Fahrzeuge im übergeordneten (zu durchsetzenden Strom) ist. Daher wird keine Ermittlung entsprechender Grenzzeitlücken aus der Empirie durchgeführt. Der Einfluss unterschiedlicher Radverkehrsstärken wird ausschließlich simulativ untersucht.

### 3.3.10 Taktisches Verhalten

Das von ANGENENDT et al. (2005) identifizierte Aufstellverhalten der geradeausfahrenden Radfahrer konnte auch in der hier vorliegenden Studie beobachtet werden (siehe beispielhaft Bild 3-60 und Bild 3-61). Das Radverkehrsaufkommen am Knotenpunkt FR3 Lehner Straße/Eschholzstraße war eher gering, sodass sich die geradeausfahrenden Radfahrer i. d. R. rechts in der Verlängerung des Radfahrstreifens aufgestellt haben. Im Vergleich zu Situationen mit Radfahrstreifen ohne ARAS warteten die Radfahrer aber häufiger nebeneinander.

Am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße war die Radverkehrsstärke deutlich höher und der ARAS wurde häufig in seiner gesamten Breite genutzt. Allerdings ist der Bereich vor den Kfz



für den linksabbiegenden Radverkehr vorgesehen. Aufgrund der Kameraposition ist nicht erkennbar, wohin die vor den Kfz wartenden Radfahrer führen. Überdies wurde deutlich, dass sich Radfahrer auch stromabwärts der den ARAS begrenzenden Haltlinie aufstellten.



Bild 3-60: Darstellung des Aufstellverhaltens der Radfahrenden am Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße



Bild 3-61: Darstellung des Aufstellverhaltens der Radfahrenden am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Wegewahl der Linksabbieger für die Knotenpunkte FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße, M3 Kapuzinerplatz, M4 Schellingstraße/Luisenstraße und M1 Marsstraße/Seidlstraße analysiert. Am Knotenpunkt FR3 (Bild 3-62) nutzten die linksabbiegenden Radfahrer mehrheitlich die Fahrbahn und den ARAS, um dann direkt abzubiegen. Etwa ein Fünftel der bei Rot ankommenden Radfahrer nutzte die Fußgängerfurt zur Querung (etwa 26 % der auf der Fahrbahn Fahrenden und etwa 4 % der auf dem Radfahrstreifen Fahrenden).

Am Knotenpunkt M3 (Bild 3-63) nutzten die linksabbiegenden Radfahrer den Radfahrstreifen und die Fahrbahn etwa zu gleichen Teilen. Die auf der Fahrbahn fahrenden Radfahrer bogen direkt ab oder nutzten die Fußgängerfurt, wobei die bei Grün ankommenden Radfahrer i. d. R. direkt abbogen (97 %) und etwa 38 % der bei Rot ankommenden Radfahrer die Fußgängerfurt nutzten. Die auf dem Radfahrstreifen ankommenden Radfahrer bogen entweder indirekt ab oder nutzten die Fußgängerfurt. Bei Rot ankommende Radfahrer nutzten dabei zu etwa 65 % die Fußgängerfurt, bei Grün ankommende Radfahrer nur zu etwa 14 %.

Am Knotenpunkt M4 (Bild 3-64) wird der Radverkehr auf der Fahrbahn geführt. Betrachtet wurden nur die auf der Fahrbahn fahrenden Radfahrer. Bei Rot ankommende Radfahrer bogen zu etwa 47 % direkt ab und nutzten zu etwa 52 % die Fußgängerfurt. Bei Grün ankommende Radfahrer bogen überwiegend direkt ab (88 %).

Am Knotenpunkt M1 (Bild 3-65) nutzten die linksabbiegenden Radfahrer zu etwa drei Vierteln (68 % der bei Rot ankommenden und 80 % der bei grün ankommenden) den Radfahrstreifen und bogen

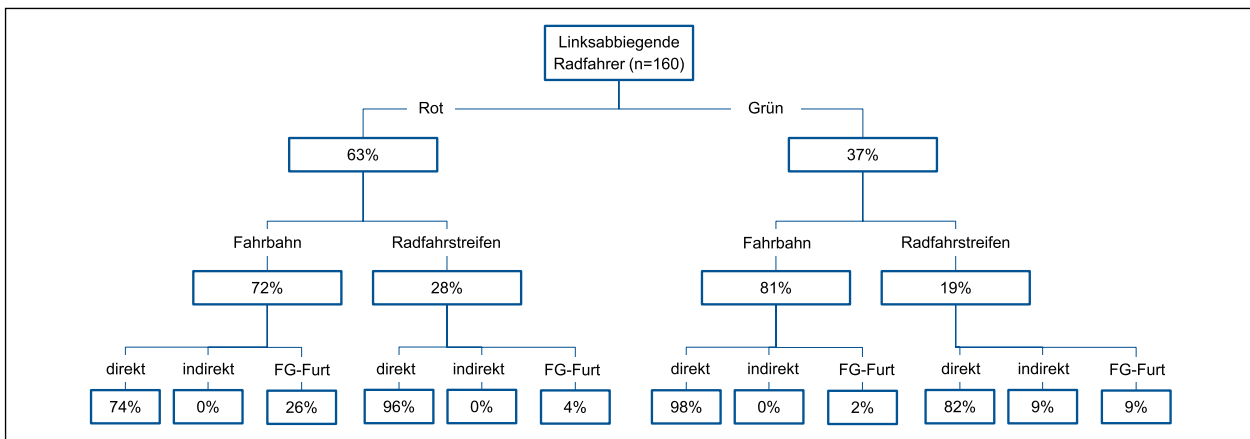


Bild 3-62: Wegewahl linksabbiegender Radfahrer am Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße (überbreiter Fahrstreifen mit Markierung für Linksabbieger, ARAS, Radfahrstreifen rechts)

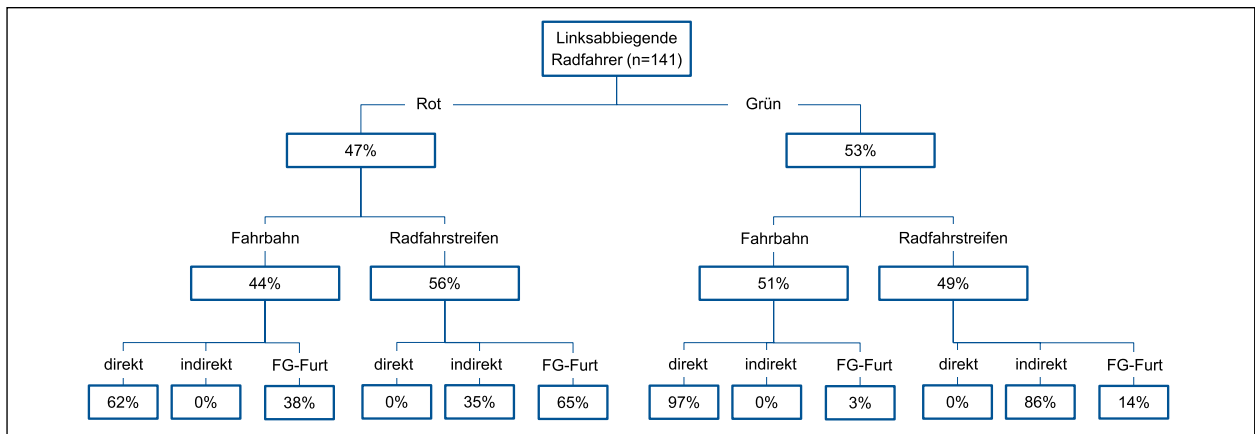


Bild 3-63: Wegewahl linksabbiegender Radfahrer am Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz (Radfahrstreifen für Geradeausfahrer und indirektes Linksabbiegen, dreistreifige Zufahrt mit Radfahrstreifen zwischen erstem und zweitem Fahrstreifen)

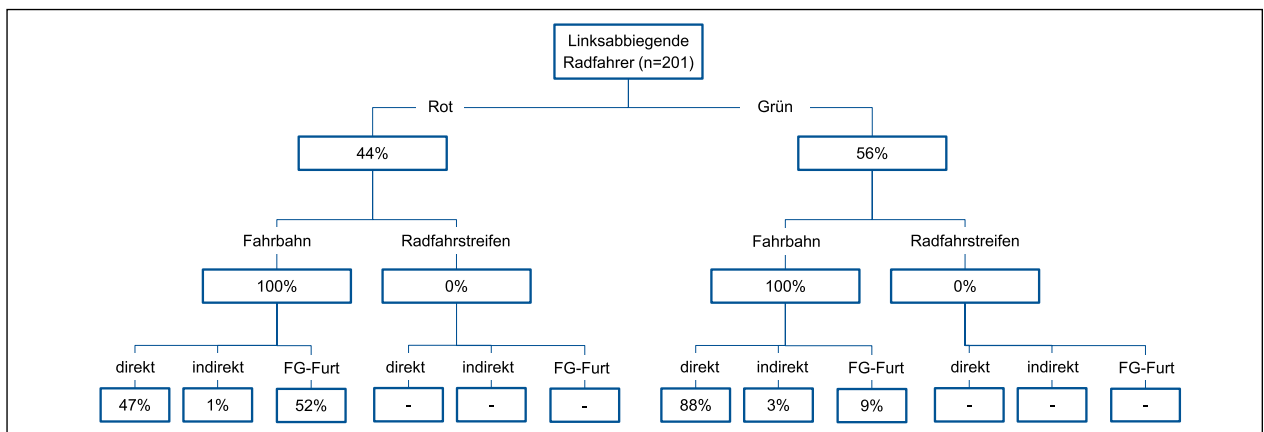


Bild 3-64: Wegewahl linksabbiegender Radfahrer am Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße (einstreifige Zufahrt, Radfahrer werden auf der Fahrbahn geführt)

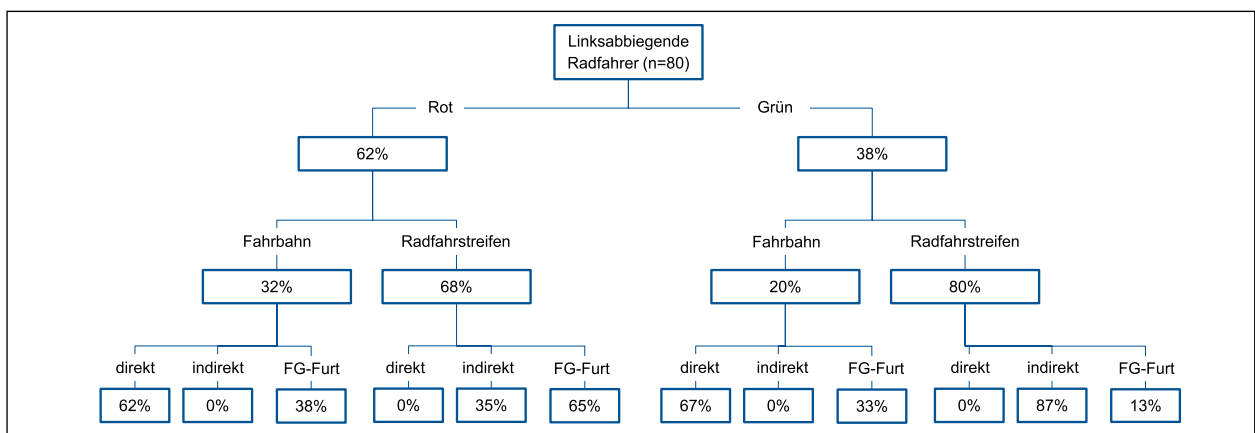


Bild 3-65: Wegewahl linksabbiegender Radfahrer am Knotenpunkt M1 Marsstraße/Seidlstraße (Radfahrstreifen für Geradeausfahrer, vierstreifige Zufahrt mit Radfahrstreifen rechts)

dann indirekt links ab oder nutzten die Fußgängerfurt. Von den auf dem Radfahrstreifen fahrenden Radfahrern nutzten etwa 65 % der bei Rot ankommenden und etwa 13 % der bei Grün ankommenden die Fußgängerfurt.

Die auf der Fahrbahn ankommenden Radfahrer bogen zu etwa zwei Dritteln direkt ab (62 % der bei Rot ankommenden und 67 % der bei grün ankommenden) und nutzten ansonsten die Fußgängerfurt.

## 4 Mikroskopische Verkehrssimulation

### 4.1 Vorgehen

Die empirisch ermittelten Kenngrößen und verkehrlichen Zusammenhänge liefern die Basis für anschließende Simulationsuntersuchungen. Diese sind erforderlich, da eine vollständige, repräsentative empirische Erhebung aller relevanten Fälle der Radverkehrsführung und -signalisierung nicht möglich ist. Die Kalibrierung und Validierung der Simulation erfolgt mit der Anpassung von Fahrverhaltensparametern (Wunschgeschwindigkeit, Beschleunigungs- und Interaktionsverhalten), die dabei unabhängig von der Verkehrsstärke sind, um ein anzustrebendes Fehlermaß für gewählte Kenngrößen aus der Empirie, wie z. B. Dichte im Stand und der Zeitbedarfswert, zu erfüllen. Die Simulation erlaubt außerdem, unterschiedliche Radverkehrsstärken systematisch zu analysieren. Insbesondere können auch höhere Radverkehrsstärken simuliert werden als empirisch beobachtet werden konnten. Die Simulation ermöglicht außerdem die Analyse von Szenarien bzw. Knotenpunktausprägungen, die in den Untersuchungsknotenpunkten nicht vorhanden sind sowie die Messung von Kenngrößen, die empirisch nur schwer zu erheben sind.

Zuerst werden die untersuchenden Entwurfssituationen in den Verkehrssimulationsmodellen aufgebaut. Danach werden diese Simulationsmodelle mit empirischen Daten (siehe Kapitel 3) und Erkenntnissen aus der Literatur kalibriert und validiert. Schließlich werden verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Führungsformen sowie variierenden Freigabezeitanteilen und Rad- bzw. Kfz-Verkehrsstärken abgebildet und untersucht.

Die gesamte Simulationsstudie wird entsprechend dem anerkannten Stand der Technik durchgeführt. Dabei stehen die Arbeitsschritte im Einklang mit den „Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsfluss-simulation“ der FGSV (FGSV, 2006a). Das geplante Vorgehen der Simulationsuntersuchungen sieht folgende Schritte vor:

- Entwicklung der Simulationsmodelle
- Kalibrierung und Validierung der Modellparameter
- Simulationsszenarien und Analyse der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird das mikroskopische Verkehrsflusssimulationsprogramm PTV Vissim für die Entwicklung der Simulationsmodelle angewendet. PTV Vissim ist eine Software für die Analyse und die Optimierung des Verkehrsflusses. Dabei können neben dem Kfz-Verkehr und dem ÖPNV auch Fußgänger und Radfahrer mit speziellen Bewegungsmodellen simuliert werden. Bei der Auswahl der Verkehrsflusssimulationssoftware wurde geprüft, ob die verwendete Simulationssoftware in der Lage ist, die zu untersuchenden Szenarien mit allen Verkehrsteilnehmern grundsätzlich abzubilden. Bei der Entwicklung der Simulationsmodelle wurde insbesondere sichergestellt, dass das spezifische Bewegungsverhalten der Radfahrer (z. B. Beschleunigungsverhalten, Wunschgeschwindigkeiten, Abstände im Stau), unterschiedliche Signalisierungsformen gemäß den RiLSA (2015) (FGSV, 2015b) und den HSRa (2005) (FGSV, 2005) sowie Eigenschaften der Radverkehrsinfrastruktur (z. B. unterschiedliche Flächen von ausgeweiteten Radaufstellstreifen) realistisch abgebildet werden (Kapitel 4.1.1).

Der Kalibrierungs- und Validierungsprozess ist ein wichtiger Teil dieser Simulationsstudie. Dabei werden die veränderlichen Modellparameter so angepasst, dass die Simulation so gut wie möglich die in der Realität beobachteten Verkehrsverhältnisse abbildet (FGSV, 2006a). In diesem Zusammenhang werden zunächst die relevanten Kenngrößen für die Kalibrierung und Validierung bestimmt. Danach werden das Konfidenzniveau und ein geeignetes Fehlermaß festgelegt sowie die benötigte Anzahl der Simulationsläufe berechnet. Der Kalibrierungs- und Validierungsprozess wird beendet, sobald eine Kombination der Modellparameter anzustrebende Fehlermaße für gewählte Kenngrößen erfüllt (Kapitel 4.1.2).

Schließlich werden unterschiedliche Szenarien betrachtet, die den Zusammenhang zwischen Radverkehr und Kapazität einzelner Verkehrsströme bzw. Fahrstreifen in verschiedenen Verkehrssituationen abbilden und mittels der kalibrierten und validierten Simulationsmodelle untersucht. Abschließend werden die Simulationsergebnisse ausgewertet und dokumentiert (Kapitel 4.1.4).

#### 4.1.1 Simulationsmodelle

Für die Simulationsuntersuchungen werden insgesamt acht Musterknotenpunkte mit typischen Führungsformen für den Rad- und den Kfz-Verkehr unter Berücksichtigung der Entwurfsprinzipien der

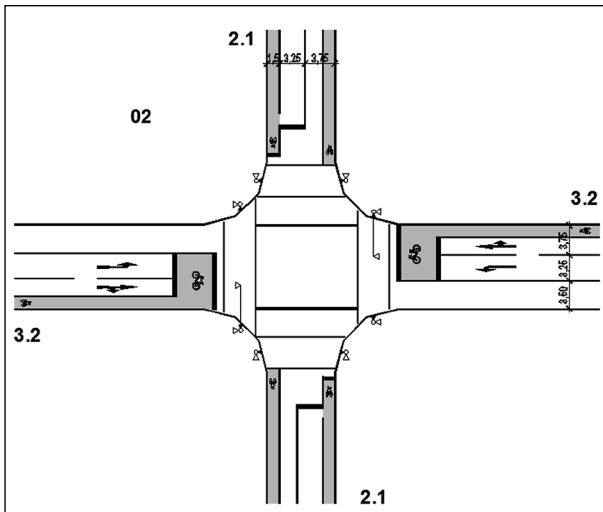


Bild 4-1: Darstellung des Musterknotenpunktes 2

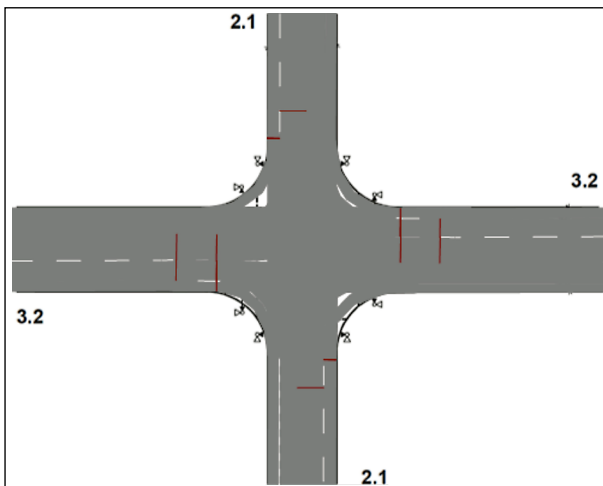


Bild 4-2: Simulationsmodell des Musterknotenpunktes 2 (PTV Vissim / PTV AG)

RASt (FGSV, 2006b) und der ERA (FGSV, 2010) erstellt. Diese sind in Anhang 2 dargestellt. Für alle Musterknotenpunkte wurden Signalprogramme gemäß den RiLSA (FGSV, 2015b) entwickelt. Dabei wurden Kfz-Verkehrsstärken für die einzelnen Ströme so angesetzt, dass sich mit dem derzeitigen Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) im Kfz-Verkehr mindestens Verkehrsqualitätsstufen von QSV D ergeben. Die Signalzeitenprogramme wurden zudem so konzipiert, dass sich auch im Fußgängerverkehr mindestens eine QSV D ergibt.

Für die Simulationsuntersuchungen wurde Musterknotenpunkt 2 (Anhang 2: Musterknotenpunkte) verwendet (in Szenario 1 ergänzt um den Musterknotenpunkt 5, siehe Tabelle 4-2).

Der Untersuchungsknotenpunkt ist auf Basis der einschlägigen Entwurfsrichtlinien mit AutoCAD (Bild 4-1) entworfen und im zweiten Arbeitsschritt in PTV Vissim modelliert worden (Bild 4-2 und Bild 4-3).

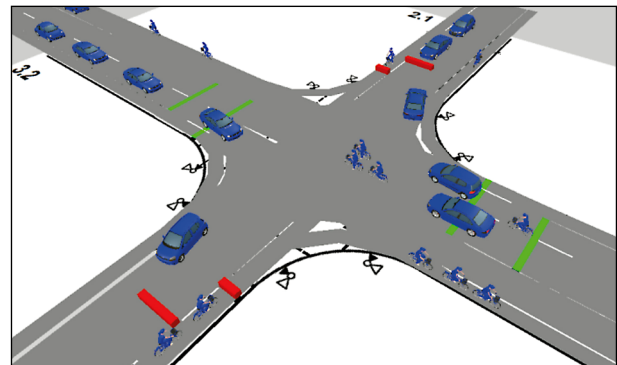


Bild 4-3: Simulationsmodell des Musterknotenpunktes 2 mit Verkehrsteilnehmern (PTV Vissim / PTV AG)

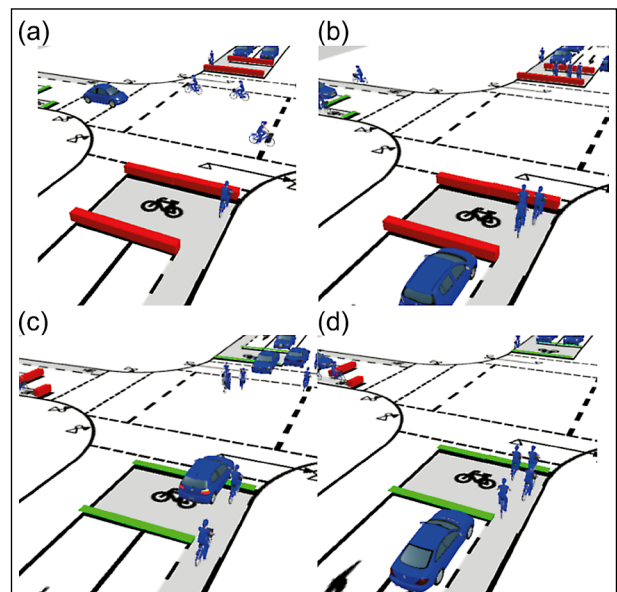


Bild 4-4: Qualitative Bewertung des Verhaltens der geradeausfahrenden Radfahrer an ARAS in der Simulation (PTV Vissim / PTV AG)

## 4.1.2 Kalibrierung und Validierung des Modells

### 4.1.2.1 Plausibilität des Simulationsmodells

Das Verhalten der Radfahrer sowie die Interaktionen zwischen Kfz und Radfahrern wurden in den Videos analysiert und in der Simulation nachgebildet.

#### ARAS

Geradeausfahrende Radfahrer (Bild 4-4):

- **Ankunft bei Rot:**  
Der erste Radfahrer stellt sich rechts auf (a), nachfolgende Radfahrer nutzen den Bereich vor dem rechten Fahrstreifen (b).
- **Ankunft bei Grün:**  
Alle bleiben rechts (c).
- **Einfluss auf Kfz:**  
Auf Radfahrstreifen abfließende Radfahrer behindern nur rechtsabbiegende Kfz (c). Zunächst

verhindert der abfließende Pulk der bei Rot wartenden Radfahrer das Rechtsabbiegen. Die später bei Grün eintreffenden und geradeausfahrenden Radfahrer bilden einen von den rechtsabbiegenden Kfz zu durchsetzendem Strom. Vor dem Fahrstreifen abfließende Radfahrer hindern geradeausfahrende Kfz an der Abfahrt (bis zum Erreichen der Knotenausfahrt, wenn der Fahrstreifen dort ausreichend breit ist oder sich dort eine Anlage für den Radlängsverkehr befindet) (d).

Linksabbiegende Radfahrer (Bild 4-5):

Ein unbekannter, variabler Anteil der Radfahrer biegt indirekt links ab. Die direkt linksabbiegenden Radfahrer fahren auf dem Kfz-Fahrstreifen (wechseln stromaufwärts) (a).

- **Ankunft bei Rot:**  
Radfahrer fahren an wartenden Kfz vorbei in den ARAS (b).
- **Ankunft bei Grün:**  
Radfahrer fahren mit dem Kfz-Strom.
- **Einfluss auf Kfz:**  
Radfahrer und Kfz bilden einen gemischten Fahrzeugstrom und lediglich wartende Verkehrsteilnehmer werden überholt. Im ARAS wartende Radfahrer fahren bei Grün als Pulk vor die linksabbiegenden Kfz (zur Ausfahrt hin ist Überholen möglich) (c, d).

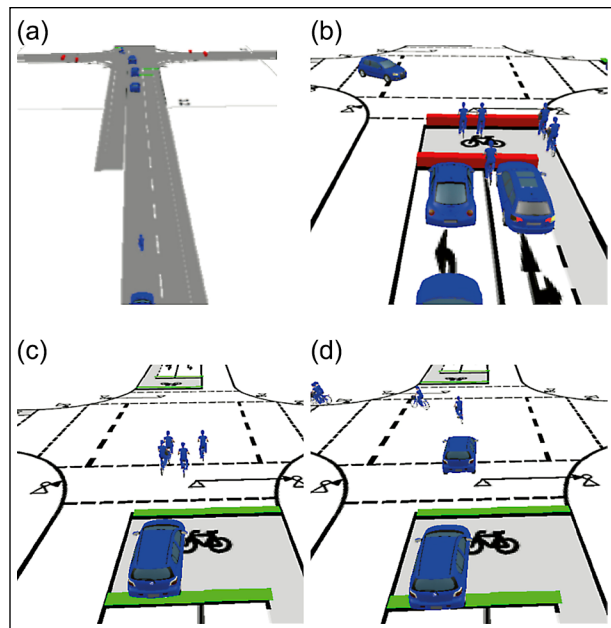


Bild 4-5: Qualitative Bewertung des Verhaltens der linksabbiegenden Radfahrer an ARAS in der Simulation (PTV Vissim/PTV AG)

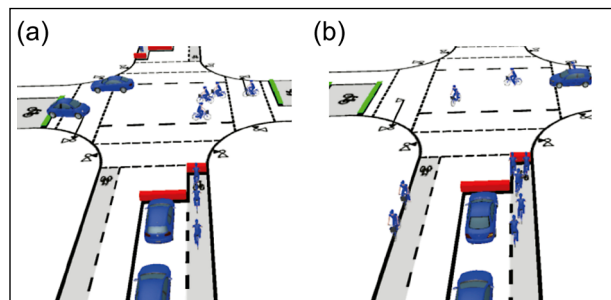


Bild 4-6: Qualitative Bewertung des Verhaltens der geradeausfahrenden und indirekt linksabbiegenden Radfahrer an Radfahrstreifen in der Simulation (PTV Vissim/PTV AG)

Rechtsabbiegende Radfahrer:

Die Radfahrer bleiben immer rechts, biegen teilweise über den Seitenraum ab und haben keinen Einfluss auf den Kfz-Verkehr.

### Radfahrstreifen

Geradeausfahrende und indirekt linksabbiegende Radfahrer:

- **Ankunft bei Rot:**  
Radfahrer stellen sich teilweise hintereinander, teilweise nebeneinander auf (a, b). Der Anteil der Radfahrer, die sich nebeneinander aufstellen, hängt von der Breite und der Lage (Randlage oder zwischen zwei Fahrstreifen) des Radfahrstreifens ab.
- **Ankunft bei Grün:**  
Radfahrer fahren in der Regel hintereinander an.
- **Einfluss auf Kfz:**  
Auf Radfahrstreifen abfließende Radfahrer hindern lediglich rechtsabbiegende Kfz durch die Belegung der Furt und das Durchsetzen.

Rechtsabbiegende Radfahrer:

Die Radfahrer bleiben immer rechts, biegen teilweise über den Seitenraum ab und haben keinen Einfluss auf den Kfz-Verkehr.

### 4.1.2.2 Kalibrierung und Validierung des Fahrverhaltens der Radfahrer

#### Kalibrierung

Die Modellparameter zur Steuerung des Fahrverhaltens der simulierten Verkehrsteilnehmer werden angepasst, damit das Verhalten in der Simulation, wie beispielsweise Beschleunigungsverhalten, Wunschgeschwindigkeiten, Abstände im Stau, dem Verhalten von realen Verkehrsteilnehmern entspricht. Dabei wird zunächst auf die im Projekt ermittelten realen (empirischen) Daten zurückgegriffen; ergänzend werden extern gewonnene Erkenntnisse (Literatur) berücksichtigt.

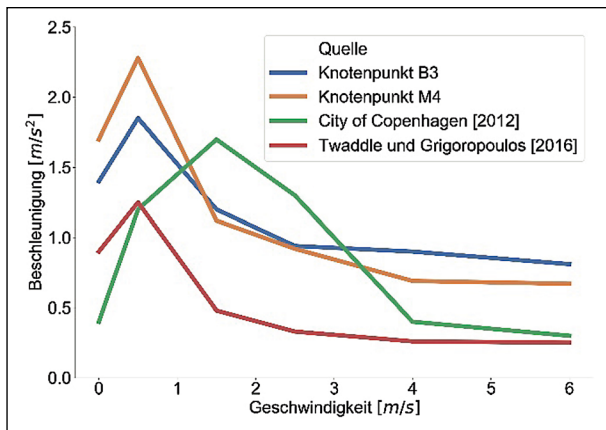


Bild 4-7: Beschleunigung der Radfahrer in Abhängigkeit der Geschwindigkeit aus der empirischen Untersuchung und Literatur (City of Copenhagen, 2012; TWADDLE & GRIGOROPOULOS, 2016)

In Kapitel 3.3.1 wird das Beschleunigungsverhalten der beobachteten Radfahrer an den beobachteten Knotenpunkten M4 in München und B3 in Berlin analysiert. Die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen werden mit Erkenntnissen aus der Literatur verglichen. Bild 4-7 stellt die Ergebnisse aus den empirischen Untersuchungen und Erkenntnissen aus der Literatur dar.

Größtenteils fokussiert sich die Forschung auf die mittlere oder maximale Beschleunigung (TWADDLE, 2017). Gestreute Werte für die mittlere Beschleunigung von 0,25 m/s<sup>2</sup> bis 1,52 m/s<sup>2</sup> (TAYLOR, 1993; PARKIN & ROTHERAM, 2010; FIGLIOZZI, WHEELER & MONSERE, 2013) wurden im Rahmen der Literaturrecherche identifiziert. Dies ist im Einklang mit den Erkenntnissen aus der empirischen Analyse in Kapitel 3.3.1.

Die Beschleunigungsfunktion für die Radfahrer in der PTV Vissim-Simulation wurde aus den eigenen Beobachtungen in München und Berlin sowie den Erkenntnissen aus der Literatur umgesetzt (siehe Bild 4-8).

Die Analyse der Wunschgeschwindigkeiten der Radfahrer an den untersuchten Knotenpunkten ist in Kapitel 3.3.2 beschrieben. Bild 3-36 zeigt die kumulative Verteilungsfunktion für die mittlere maximale Geschwindigkeit der beobachteten Radfahrer je Knotenpunkt. In Bild 4-9 ist die Verteilungsfunktion für alle beobachteten Radfahrer mit den 15., 50. und 85. Perzentilwerten in km/h dargestellt.

Diese Verteilungsfunktion entspricht den aus der Literatur in Deutschland bekannten Verteilungsfunktionen (FALKENBERG et al. , 2003; City of Copenhagen, 2012; Bundesanstalt für Straßenwesen

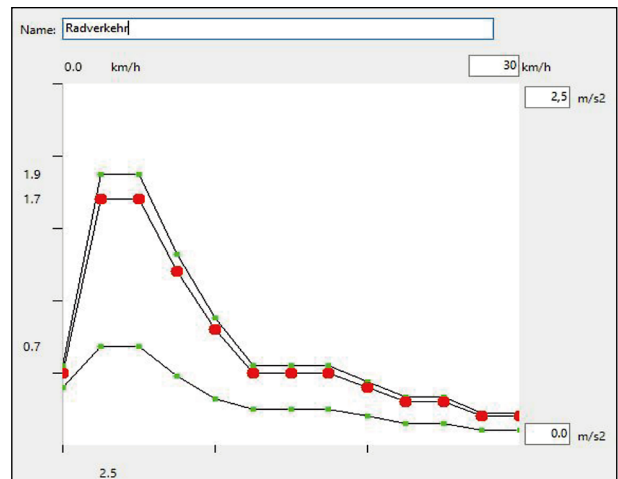


Bild 4-8: Umsetzung der Beschleunigungsfunktion aus den eigenen Beobachtungen sowie den Erkenntnissen aus der Literatur (PTV Vissim/PTV AG)

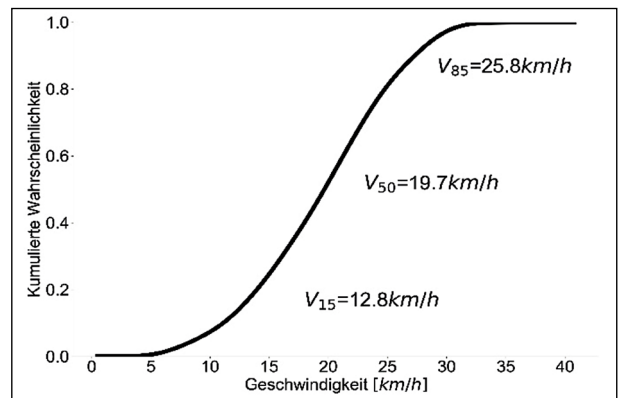


Bild 4-9: Kumulative Verteilungsfunktion für die Mittlere Maximale Geschwindigkeit aller beobachteten Radfahrer

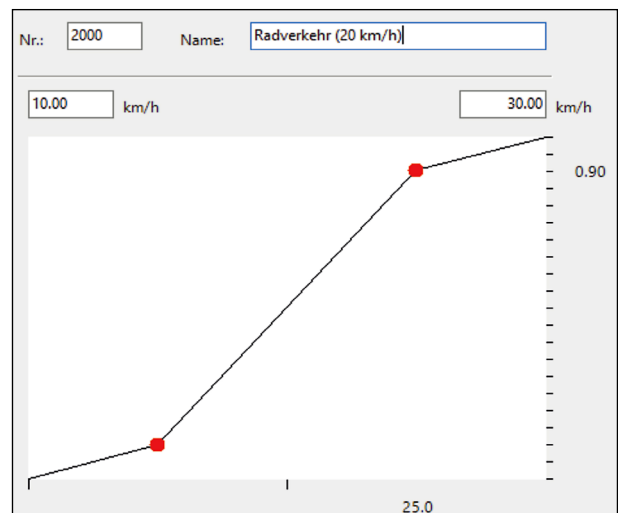


Bild 4-10: Umsetzung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung aus den eigenen Beobachtungen mit Ergänzung von Wunschgeschwindigkeiten bis 30 km/h (entspricht den Erkenntnissen aus der Literatur) (PTV Vissim/PTV AG)

(BASt), 2015). Anhand der empirischen Ergebnisse und der Verteilungsfunktionen aus der Literatur wurde die in Bild 4-10 dargestellt Wunschgeschwindigkeitsfunktion in PTV Vissim eingestellt.

Insgesamt wurden sechs Fahrverhalten für den Radverkehr im VISSIM-Modell definiert. Alle Radfahrer wurden mit dem Fahrzeugfolgemodell Wiedemann 99 (PTV AG, 2016) gesteuert. Die Parameter wurden so eingestellt, dass das beobachtete Verhalten an den Untersuchungsknotenpunkten in der Simulation nachgebildet wurde. Details zu den Fahrverhaltensparametern für die unterschiedlichen Fahrsituationen finden sich in Anhang 3.

### Berechnung des Stichprobenumfangs

Der notwendige Stichprobenumfang ist vom Mittelwert und von der Streuung der betrachteten Kenngröße sowie von der gewünschten Genauigkeit und statistischen Sicherheit der Aussage abhängig (FGSV (2006a)). Nach einer Vorabschätzung der Standardabweichung  $s$  kann die Anzahl der notwendigen Fälle nach folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$n \geq \frac{(t_{\alpha, n-1})^2 \times s^2}{c^2} \quad \text{Gl. 4}$$

mit:

$n$  Stichprobenumfang

$C$  Konfidenzintervall

$t_{\alpha, n-1}$  Wert der Student-Verteilung

$s$  Standardabweichung

$\alpha$  Konfidenzniveau

Die Ermittlung von  $n$  erfolgt iterativ, bis die Anzahl der Wiederholungen  $n$  größer oder gleich derjenigen ist, die bei der Ermittlung von  $t_{\alpha, n-1}$  angenommen wurde. Hier wurde jeder Umlauf als eine Stichprobe im Datensatz verwendet und mehr als 60 Umläufe analysiert.

### Validierung

Die Validierung des Verhaltens der Radfahrer wurde anhand von drei Werten durchgeführt:

1. Validierung hinsichtlich der Dichte im Stand
2. Validierung hinsichtlich der mittleren Zeitbedarfswerte
3. Validierung hinsichtlich der durchschnittlichen Belegungszeit

Dazu wurden nur vergleichbare Fälle aus der Empirie verwendet. Beobachtete Werte von Radfahrern auf Radfahrstreifen (kein ARAS im Anschluss) wurden zur Validierung der Zufahrt Typ 2 ausgewählt.

Zur Verifizierung der Qualität der Simulation wurde ein T-Test mit ungleicher Varianz (Welch-Test) eingesetzt. Damit wird geprüft, ob die Mittelwerte zweier Grundgesamtheiten (Simulation und Empirie) gleich sind. Hier wird ein gleicher Mittelwert als Nullhypothese angenommen. Wenn der aus dem Welch-Test ergebende p-Wert  $> 0,05$  ist, ist diese Nullhypothese bestätigt.

In Bild 4-11 ist die Dichte im Stand der beobachteten und simulierten Radfahrer zu sehen. Die simulierten Radfahrer stellen sich im Vergleich zur Empirie etwas dichter auf. Mit einem Fehler von 1,5 % im Mittelwert und einem p-Wert von 0,86 (Nullhypothese von gleichen Mittelwerten bestätigt) wird die Simulation hinsichtlich der Dichte im Stand realistisch abgebildet.

Bild 4-12 zeigt die Mittleren Zeitbedarfswerte für die simulierten und beobachteten Radfahrer. Die simulierten Radfahrer weisen einen längeren Beschleunigungsprozess zur maximalen Geschwindigkeit mit weniger Streuung als die beobachteten Radfahrer auf. Ein Fehler von 4,7 % und ein p-Wert  $> 0,1$  (Nullhypothese von gleichen Mittelwerten bestätigt) verifizieren die Gültigkeit der Simulation hinsichtlich des mittleren Zeitbedarfswerts.

Die simulierten und beobachteten Belegungszeiten sind in Bild 4-13 dargestellt, wobei die zugrundeliegenden Infrastrukturen unterschiedlich sind. Die simulierten Belegungszeiten sind etwas größer als die beobachteten Werte. Die Streuung der Belegungszeiten ist bei einer geringen Anzahl Radfahrer klein und steigt mit der Anzahl Radfahrer. Die simulierten Belegungszeiten liegen im Bereich der empirisch belegten Werte.

Die Validierung des Verhaltens der Radfahrer auf dem Radfahrstreifen hinsichtlich der drei untersuchten Parameter verifiziert die Qualität und Realitäts-treue der Simulation.

Die Validierung des Verhaltens der Radfahrer im ARAS anhand der gemessenen Kenngrößen ist kompliziert. Zum einen sind die Definition und Bestimmung von vollständig belegten ARAS schwierig. In einigen beobachteten Situationen bleibt ein Radfahrer außerhalb des ARAS stehen, obwohl im ARAS Platz gewesen wäre. Aus diesem Grund ist die Bestimmung des Zustands vollständig belegt eines ARAS auf Basis von außenstehenden Radfahrern ungünstig. Zum anderen sind vollständig belegte ARAS aufgrund der gegebenen Radverkehrs-

stärken relativ seltene Ereignisse. Aus diesen Gründen ist die Nutzung der Dichte im Stand zur Validierung problematisch.

Zur Validierung der ARAS Zufahrt wurde daher ein qualitatives Vorgehen gewählt. Die Simulation wurde mit den Videodaten aus Berlin und Freiburg verglichen, um mögliche Unstimmigkeiten zu identifizieren und zu beseitigen. Bei der Simulation der Musterknotenpunkte mit einem ARAS, der mit dem ARAS am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/ Friedrichstraße vergleichbar ist, wird ein quantitatives Vorgehen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser

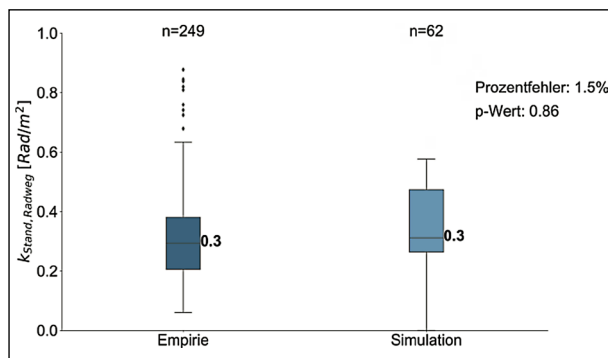


Bild 4-11: Vergleich der Dichte im Stand am simulierten Knotenpunkt und mit der empirischen Analyse

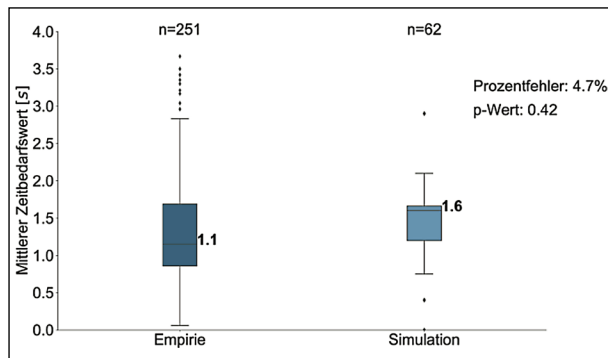


Bild 4-12: Vergleich der Mittleren Zeitbedarfswerte am simulierten Knotenpunkt mit der empirischen Analyse

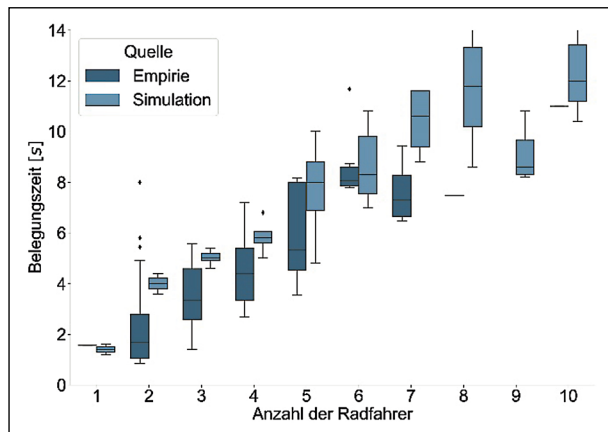


Bild 4-13: Vergleich der Belegungszeiten am simulierten Knotenpunkt und aus der empirischen Analyse

Kalibrierung und Validierung werden an allen ARAS in der Simulation eingesetzt (siehe Anhang 3).

#### 4.1.2.3 Kalibrierung des Kfz-Verkehrs

Dem Fahrverhalten der Kfz liegt das Fahrzeugfolgemodell Wiedemann 74 (Wiedemann, 1974) zugrunde. Bei der Kalibrierung wurde von reinem Pkw-Verkehr ausgegangen. Da das Ziel des Projekts die Überprüfung und ggf. die Anpassung bzw. Ergänzung von Berechnungsverfahren im HBS ist, wurde das Fahrverhalten der Kfz auf Basis des HBS kalibriert.

Die Kalibrierung wurde basierend auf zwei Werten durchgeführt:

1. Kalibrierung hinsichtlich der Zeitbedarfswerte
2. Kalibrierung hinsichtlich der Kapazitäten für einen gegebenen Signalplan

Die Kalibrierung wurde für einen signalisierten Knotenpunkt ohne Längsneigung und mit Fahrstreifenbreiten  $\geq 3,00$  m für Geradeausfahrer, Rechtsabbieger (Abbiegeradius  $R = 8$  m) und Linksabbieger (Abbiegeradius  $R = 12$  m) durchgeführt (jeweils geschütztes Abbiegen).

Zunächst wurden die Parameter des Fahrzeugfolgemodells so angepasst, dass die Zeitbedarfswerte für den Geradeausverkehr mit denen nach HBS übereinstimmen. Die resultierenden Parameter sind in Anhang 3 dargestellt.

Die aufgrund der Abbiegeradien größeren Zeitbedarfswerte für die Rechts- und Linksabbieger wur-

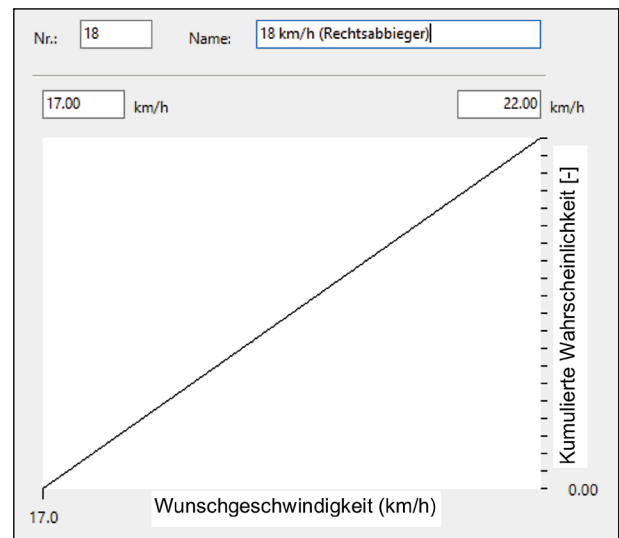


Bild 4-14: Wunschgeschwindigkeitsverteilung für den rechtsabbiegenden Kfz-Verkehr (PTV Vissim/PTV AG)



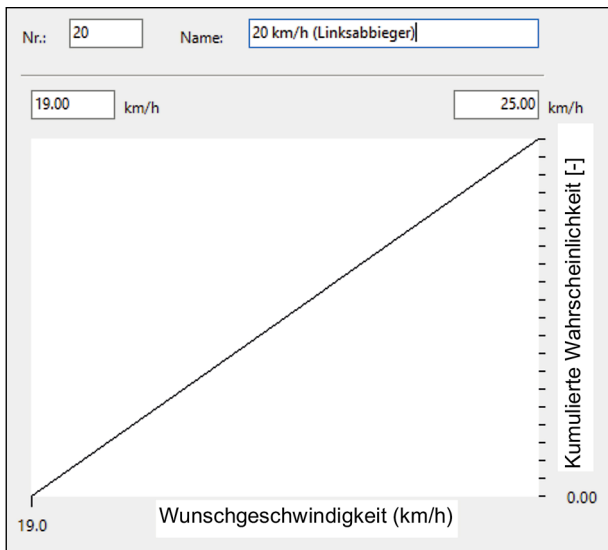


Bild 4-15: Wunschgeschwindigkeitsverteilung für den linksabbiegenden Kfz-Verkehr (PTV Vissim / PTV AG)

Fahrtrichtung	Zeitbedarfswert $t_B$ [s]	Kapazität C [Fz/h]
Geradeaus	HBS: 1,80 Simulation: 1,81	HBS: 700 Simulation: 710
Rechtsabbiegen	HBS: 2,12 Simulation: 2,14	HBS: 593 Simulation: 593
Linksabbiegen	HBS: 2,02 Simulation: 2,03	HBS: 625 Simulation: 623

Tab. 4-1: Ergebnisse der Kalibrierung für den Kfz-Verkehr

den über reduzierte Geschwindigkeiten in der Kurvenfahrt umgesetzt (Langsamfahrbereiche in PTV Vissim). Die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für den rechtsabbiegenden und linksabbiegenden Kfz-Verkehr sind in Bild 4-14 und Bild 4-15 dargestellt.

Ausgehend von diesen Einstellungen wurde im nächsten Schritt das Verhalten bei Rot-Gelb (Reaktionszeit) und bei Gelb (Entscheidungsverhalten) so angepasst, dass die in der Simulation beobachteten Kapazitäten für einen gegebenen Signalplan ( $t_U = 60$  s,  $t_F = 20$  s) mit den Kapazitäten nach HBS übereinstimmten (siehe Anhang 3).

Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

### 4.1.3 Validierung des Kfz-Verkehrs

Um das Fahrverhalten des Kfz-Verkehrs zu validieren, wird der Einfluss des Radverkehrs auf den motorisierten Verkehr empirisch untersucht und mit den Simulationsergebnissen verglichen. Die durchschnittliche Zeit, die das erste rechtsabbiegende

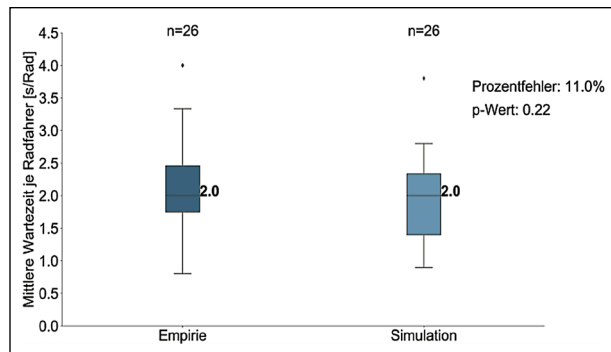


Bild 4-16: Vergleich von Empirie und Simulation hinsichtlich der mittleren Wartezeiten je Radfahrer von bedingt verträglich rechtsabbiegenden Pkw

Fahrzeug infolge der bedingten Verträglichkeit seines Verkehrsstroms mit dem geradeausfahrenden Fahrradstrom warten muss, dient hier als maßgebende Kenngröße. Die Wartezeit wird abhängig von der Anzahl an Radfahrern, die im gleichen Pulk den Kreuzungsarm überqueren, wie folgt ermittelt: Nur das jeweils erste stehende, rechtsabbiegende Fahrzeug wird berücksichtigt und seine Wartezeit wird von dem Zeitpunkt, an dem das Fahrzeug komplett zur Ruhe kommt, bis zum Zeitpunkt, an dem das Fahrzeug wieder beschleunigt, gemessen. Die empirische Erhebung der Validierungsdaten erfolgt am Knotenpunkt M1 Marsstraße/Seidlstraße.

Zur Verifizierung der Qualität der Simulation wird ein T-Test mit ungleicher Varianz (Welch-Test) genutzt. Mit diesem Test wird überprüft, ob die Mittelwerte zweier Grundgesamtheiten (Simulation und Empirie) gleich sind. Es wird ein gleicher Mittelwert als Nullhypothese angenommen. Wenn der aus dem T-Test ergebende p-Wert  $> 0,05$  ist, gilt die Nullhypothese als bestätigt.

In Bild 4-16 werden die Mittleren Wartezeiten pro Radfahrer der bedingt verträglich rechtsabbiegenden Pkw in der Simulation den empirisch erhobenen Werten gegenübergestellt. Mit einem Fehler des Mittelwerts von 11 % und einem p-Wert von 0,25 (Bestätigung der Nullhypothese gleicher Mittelwerte) ist die Simulation hinsichtlich der mittleren Wartezeit von bedingt verträglich rechtsabbiegenden Pkw realistisch.

### 4.1.4 Simulationsszenarien

Der Einfluss des Radverkehrs auf die Verkehrsqualität des Kfz-Verkehrs wird in vier Simulationsszenarien untersucht. Dabei werden unterschiedliche Radverkehrsführungsformen und Lichtsignalsteue-

rungen berücksichtigt. Als Untersuchungskenngröße wird die Kapazität herangezogen, da diese auch für die Bestimmung des Auslastungsgrads, der Wartezeit sowie der Verkehrsqualität nach HBS (FGSV, 2015a) maßgebend ist.

Die vier Szenarien sind in Tabelle 4-2 dargestellt und darauffolgend beschrieben.

**Szenario 1: Kapazität rechtsabbiegender Kfz bei parallel geradeaus fahrenden Radfahrern**

Dieses Szenario dient der Analyse der Kapazität des rechtsabbiegenden Kfz-Stroms, wenn gleichzeitig aus derselben Zufahrt kommende Radfahrer geradeausfahren. Dadurch, dass die Radfahrer den Fahrweg der bedingt verträglich, rechtsabbiegenden Kfz überqueren, werden die Kfz behindert, was zu einer Reduzierung der Kapazität führt.

Die Untersuchungen werden am Musterknoten 2 an den Zufahrtstypen 2.1 und 3.2 (siehe Bild 4-17) sowie am Musterknoten 5 am Zufahrtstyp 5.3 (siehe Bild 4-18) durchgeführt. Der Zufahrtstyp 5.3 weist

Szene. Nr.	Untersuchter Aspekt	Musterknoten (Zufahrtstyp)
1	Kapazität rechtsabbiegender Kfz bei parallel geradeaus fahrenden Radfahrern	2 (2.1, 3.2) 5 (5.3)
2	Kapazität bedingt verträglich linksabbiegender Kfz bei entgegenkommendem Kfz- und Radverkehr	2 (2.1))
3	Kapazität geradeausfahrender Kfz bei geradeaus über einen ARAS fahrenden Radfahrern	2 (3.2)
4	Kapazität bedingt verträglich links über einen ARAS abbiegender Kfz	2 (3.2)

Tab. 4-2: Simulationsszenarien

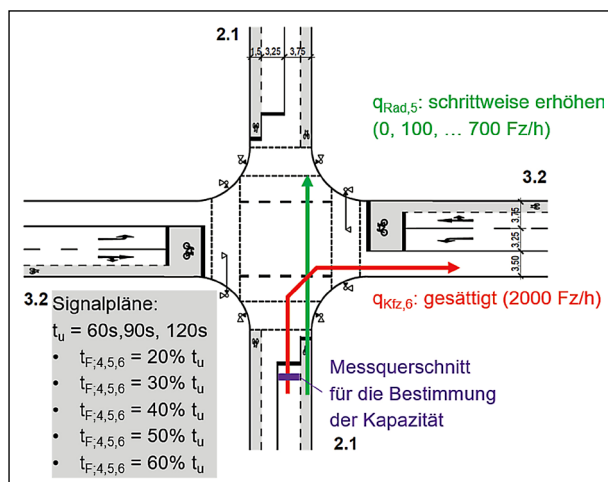


Bild 4-17: Kapazität rechtsabbiegender Kfz bei parallel geradeaus fahrenden Radfahrern

im Gegensatz zu den Zufahrtstypen 2.1 und 3.2 einen Radweg auf.

Verkehrsstärken, Umlaufzeiten und Freigabezeiten sind in Bild 4-17 für den Zufahrtstyp 2.1 dargestellt und wurden entsprechend auch auf die Zufahrtstypen 3.2 und 5.3 angewendet.

**Szenario 2: Kapazität bedingt verträglich linksabbiegender Kfz bei entgegenkommendem Kfz- und Radverkehr**

Dieses Szenario dient der Analyse der Kapazität bedingt verträglicher linksabbiegender Kfz bei entgegenkommenden geradeausfahrenden Radfahrern und Kfz.

Die Untersuchungen werden am Musterknoten 2 am Zufahrtstyp 2.1 durchgeführt (siehe Bild 4-19).

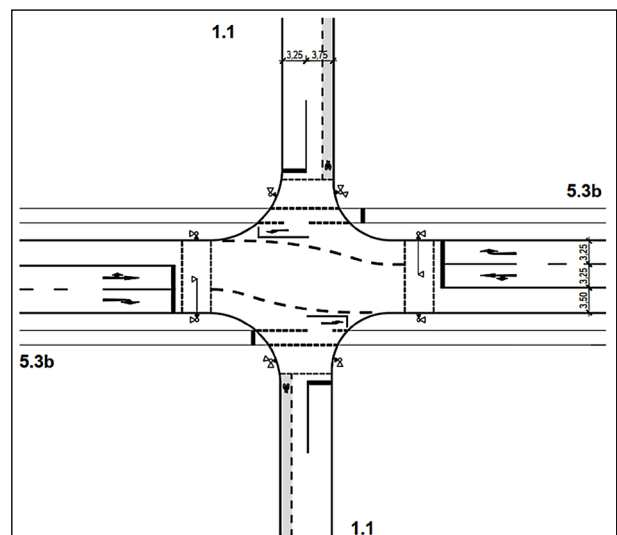


Bild 4-18: Musterknotenpunkt 5

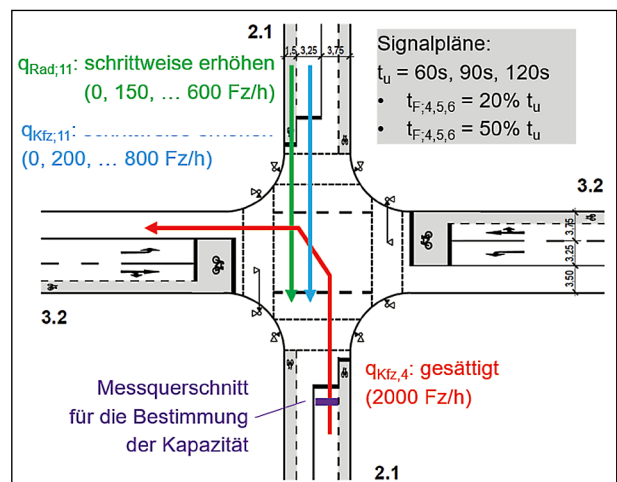


Bild 4-19: Kapazität bedingt verträglich linksabbiegender Kfz bei entgegenkommendem Kfz- und Radverkehr

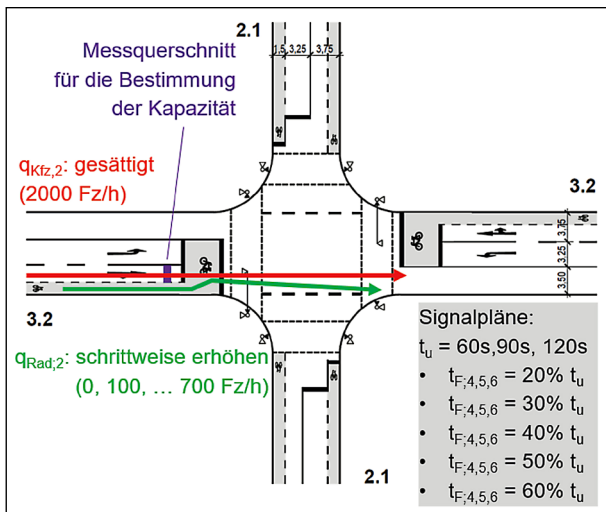


Bild 4-20: Kapazität geradausfahrender Kfz mit geradausfahrenden Radfahrern auf ARAS

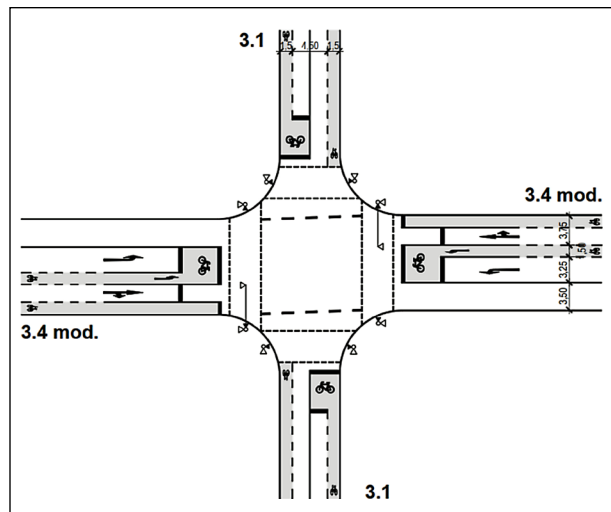


Bild 4-22: Musterknotenpunkt 1

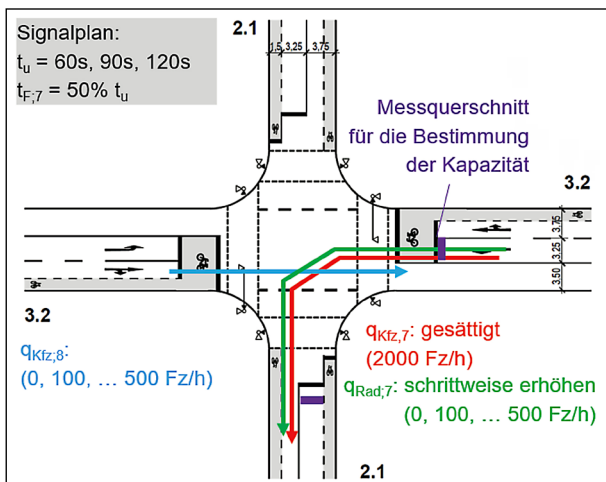


Bild 4-21: Kapazität bedingt verträglich links über einen ARAS abbiegender Kfz

### Szenario 3: Kapazität geradausfahrender Kfz bei geradeaus über einen ARAS fahrenden Radfahrern

Hier wird der Einfluss von auf einem ARAS warten, geradausfahrenden Radfahrern auf die Kapazität der geradausfahrenden Kfz untersucht.

Die Untersuchungen werden am Musterknoten 2 am Zufahrtstyp 3.2 durchgeführt (siehe Bild 4-20).

### Szenario 4: Kapazität bedingt verträglich links über einen ARAS abbiegender Kfz

In diesem Szenario liegt der Fokus auf der Kapazität bedingt verträglich links über einen ARAS abbiegender Kfz in Abhängigkeit der Verkehrsstärke parallel dazu linksabbiegender Radfahrer.

Die Untersuchungen werden am Musterknoten 2 am Zufahrtstyp 3.2 (siehe Bild 4-21) sowie am Mus-

terknoten 1 am Zufahrtstyp 3.4 mod (Bild 4-22) durchgeführt. Da die Ergebnisse weitestgehend identisch sind, sind in Kapitel 4.2 nur die Ergebnisse für den Musterknoten 2 dargestellt.

## 4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen werden in diesem Kapitel dargestellt und erläutert.

### Szenario 1: Kapazität rechtsabbiegender Kfz bei parallel geradeaus fahrenden Radfahrern

Bild 4-23, Bild 4-24 und Bild 4-25 stellen die Ergebnisse der Simulation für die Zufahrtstypen 2.1, 3.2 und 5.3 dar. Da das Verhalten der Radfahrer und der Kfz-Führer an Zufahrtstypen den 2.1 und 5.3 gleich modelliert wird, entfällt die Untersuchung des Szenarios bei Zufahrtstyp 5.3 für  $t_U = 120$

Die Simulationsergebnisse stellen den Zusammenhang zwischen Radverkehrsstärke und Kapazität der Rechtsabbieger für unterschiedliche Freigabezeiten dar. Wie erwartet fällt die Kapazität des rechtsabbiegenden Stromes grundsätzlich in allen Untersuchungsfällen monoton mit steigender Radverkehrsstärke.

Die Kapazität wird hauptsächlich vom Freigabezeitanteil beeinflusst, wobei die Kapazität mit kleiner werdenden Freigabezeitanteilen abnimmt. Zu beobachten ist, dass die Umlaufzeit mit zunehmender Radverkehrsstärke ebenfalls einen Einfluss auf die Kapazität hat. Dieser Effekt ist beim Zufahrtstyp 5.3 (Bild 4-25) größer als bei den Zufahrtstypen 2.1 und 3.2, bei denen der Effekt nur bei kleinen Freigabezeitanteilen sichtbar ist. Wie erwartet, führen kleine-

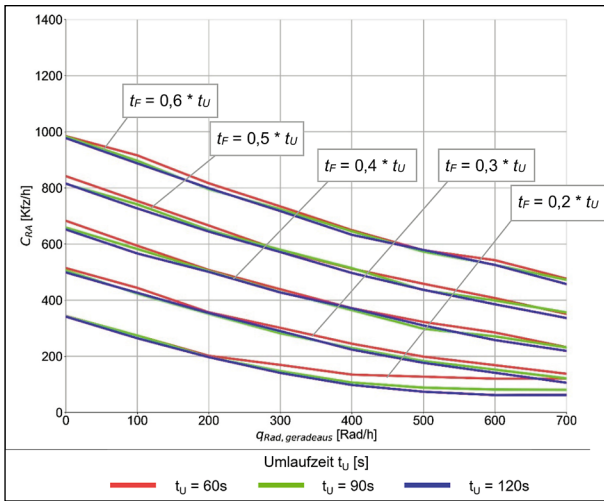


Bild 4-23: Kapazität des Rechtsabbiegers  $C_{RA}$  ( $t_U = 60$  s, 90 s, 120 s) bei geradeausfahrenden Radfahrern (Musterknotenpunkt 2, Zufahrtstyp 2.1)

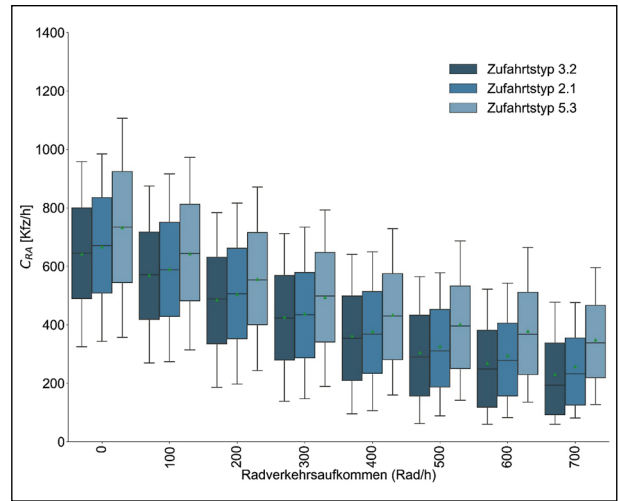


Bild 4-26: Kapazitätsunterschied des Rechtsabbiegers  $C_{RA}$  ( $t_U = 60$  s, 90 s) bei geradeausabfließenden Radfahrern für unterschiedliche Zufahrtstypen

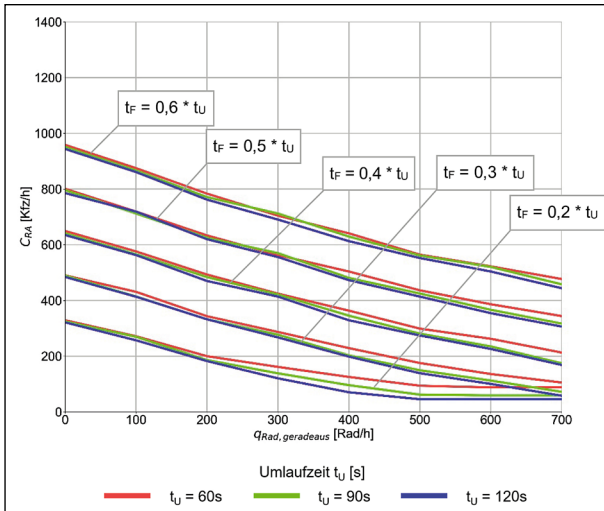


Bild 4-24: Kapazität des Rechtsabbiegers  $C_{RA}$  ( $t_U = 60$  s, 90 s, 120 s) bei geradeausfahrenden Radfahrern (Musterknotenpunkt 2, Zufahrtstyp 3.2)

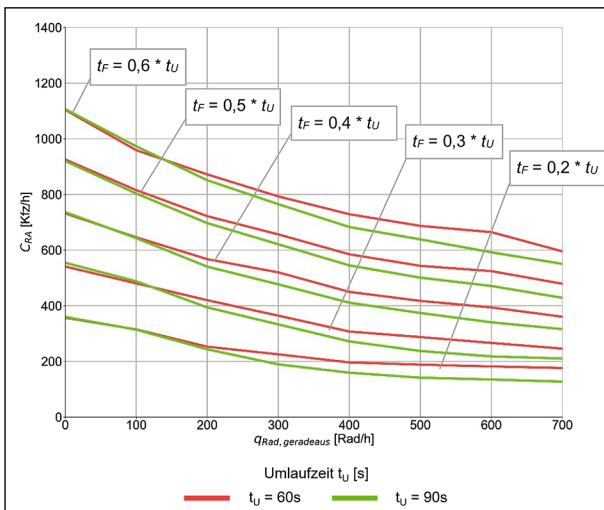
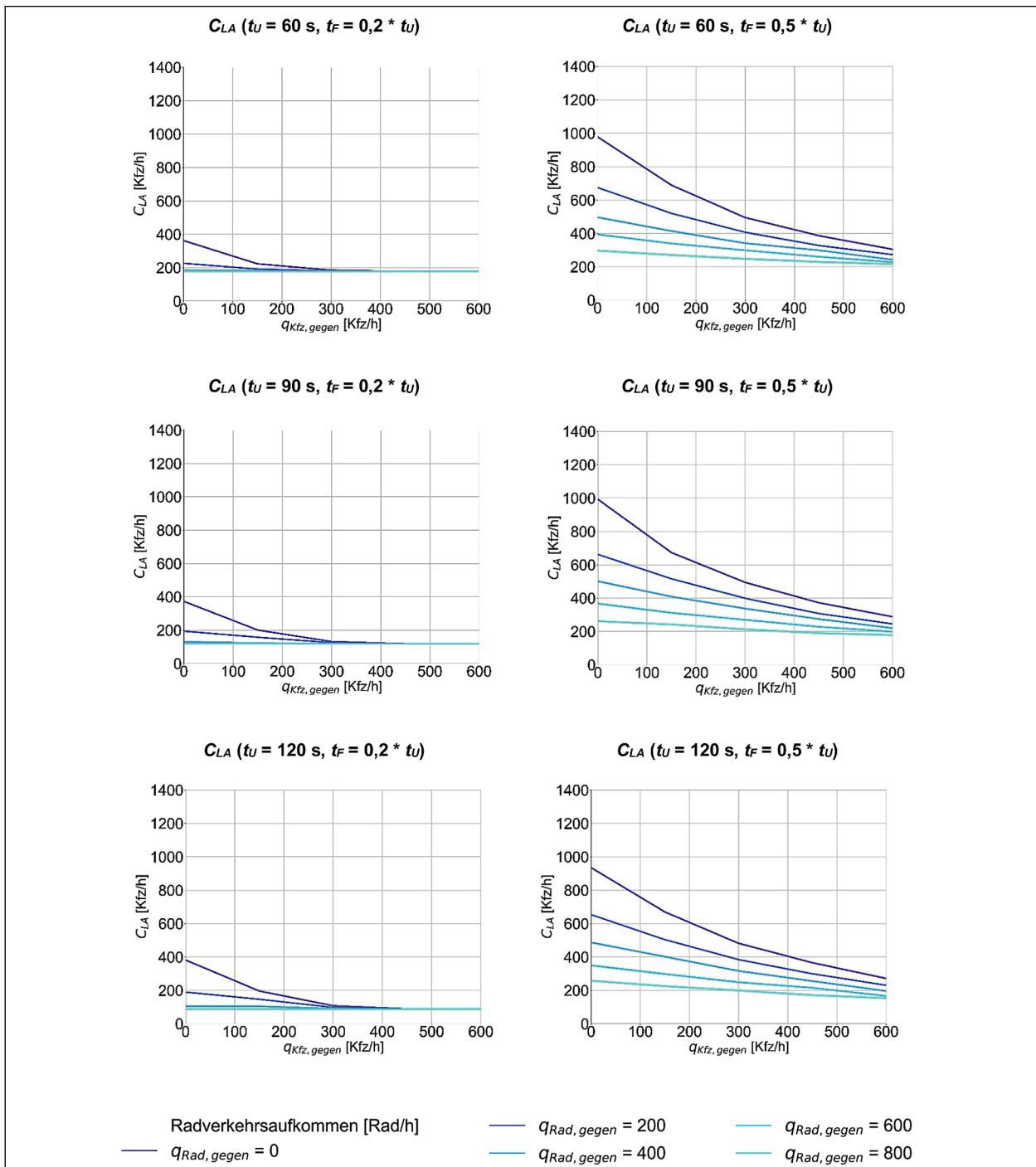


Bild 4-25: Kapazität des Rechtsabbiegers  $C_{RA}$  ( $t_U = 60$  s, 90 s) bei geradeausfahrenden Radfahrern (Musterknotenpunkt 5, Zufahrtstyp 5.3)

re Umlaufzeiten bei gleichem Freigabezeitanteil tendenziell zu größeren Kapazitäten, da während der Phasenwechsel die im Knotenpunkttinnenbereich gestauten Fahrzeuge abfließen können. Dieser Effekt ist beim Zufahrtstyp 5.3 stärker ausgeprägt, da hier der Stauraum zwischen Haltlinie der abbiegenden Kfz und dem Konfliktbereich mit den geradeausfahrenden Radfahrern größer ist.

Die Kapazität nimmt mit zunehmender Radverkehrsstärke ab, aber bei hohen Radverkehrsstärken weniger stark. Am Zufahrtstyp 2.1 ist das ab etwa 400 Rad/h der Fall, wobei der Effekt bei kleinen Freigabezeitanteilen und kleinen Umlaufzeiten am stärksten ausgeprägt ist, da hier die Gesamtkapazität des Rechtsabbiegers von der Kapazität im Phasenwechsel bestimmt wird. Hierbei können ab einer bestimmten Radverkehrsstärke lediglich die Kfz je Umlauf rechtsabbiegen, die sich zwischen Haltlinie und Radfahrerfurt gestaut haben. Der Effekt der weniger stark abnehmenden Kapazität kann auch bei den Zufahrtstypen 3.2 und 5.3 beobachtet werden, wobei er bei Zufahrtstyp 5.3 schon bei etwa 300 Rad/h eintritt (Bild 4-25), was wiederum durch die größere Bedeutung der Kapazität während des Phasenwechsels erklärt werden kann.

Aus den drei untersuchten Zufahrtstypen gehen unterschiedliche Ergebnisse für die Kapazität des rechtabbiegenden motorisierten Verkehrsstromes hervor. Bild 4-26 stellt die Kapazitäten der unterschiedlichen Zufahrtstypen dar. Dabei weist Zufahrtstyp 5.3 die größte und Zufahrtstyp 3.2 die geringste Kapazität des Rechtsabbiegestroms  $C_{RA}$  auf.

Bild 4-27: Kapazität des Linksabbiegers  $C_{LA}$ 

### Szenario 2: Kapazität bedingt verträglich linksabbiegender Kfz bei entgegenkommendem Kfz- und Radverkehr

Dieses Szenario dient der Untersuchung der Kapazitätsreduzierung bedingt verträglicher linksabbiegender Kfz, wenn gleichzeitig geradeausfahrende Radfahrer und Kfz entgegenkommen. Im Rahmen dieses Szenarios wird die Kapazität für  $t_F = 0,2 * t_U$  und  $t_F = 0,5 * t_U$  untersucht. Die Ergebnisse der Si-

mulationsuntersuchungen sind in den Abbildungen in Bild 4-27 dargestellt.

Die Kapazität des bedingt verträglichen linksabbiegender Verkehrsstroms wird von den entgegenkommenden geradeausfahrenden Radfahrern und Kfz stark beeinflusst.

Beim Vergleich der Simulationsuntersuchungen zeigt sich, dass der Freigabezeitanteil einen großen

Einfluss auf die Kapazität hat. Die Umlaufzeit hat ebenfalls einen Einfluss, der mit steigender Verkehrsstärke der entgegenkommenden Kfz und Radfahrer größer wird. Je größer die Umlaufzeit ist, desto geringer wird bei gleichen Freigabezeitanteilen die Kapazität. Die Kapazität des bedingt verträglichen linksabbiegenden Kfz-Verkehrs entspricht bei  $t_F = 0,2 * t_U$  und  $q_{Rad,gegen} > 600$  Rad/h dem maximal möglichen Abfluss der Pkw im Phasenwechsel für alle untersuchten Umlaufzeiten, unabhängig von  $q_{Kfz,gegen}$  (bei  $t_U = 60$  s und Platz für 3 Pkw im Knoteninnenraum:  $C = 180$  Kfz/h). Somit wird die Kapazitätsgrenze des bedingt verträglichen linksabbiegenden Kfz-Verkehrs erreicht. Die Kapazitätsverringering bei anwachsenden  $q_{Rad,gegen}$  und  $q_{Kfz,gegen}$  ist für den Freigabezeitanteil  $t_F = 0,5 * t_U$  stärker als bei  $t_F = 0,2 * t_U$ , da die Kapazität im Phasenwechsel erst bei höheren Verkehrsstärken  $q_{Rad,gegen}$  und  $q_{Kfz,gegen}$  maßgebend wird.

Für alle Freigabezeitanteile wird die Kapazitätsreduzierung des Linksabbiegerstroms mit Erhöhung der Verkehrsstärken  $q_{Rad,gegen}$  und  $q_{Kfz,gegen}$  stetig geringer. So werden bei  $t_F = 0,2 * t_U$  und  $q_{Kfz,gegen} \geq 300$  Kfz/h sowie  $t_F = 0,5 * t_U$  und  $q_{Kfz,gegen} \geq 600$  Kfz/h fast gleiche Kapazitätswerte für alle untersuchten Radverkehrsbelastungen bei gleicher Umlaufzeit beobachtet.

### Szenario 3: Kapazität geradeausfahrender Kfz bei geradeaus über einen ARAS fahrenden Radfahrern

Hier wird der Einfluss von auf einem ARAS wartenden geradeausfahrenden Radfahrern auf die Kapazität der geradeausfahrenden Kfz untersucht. Die Ergebnisse der Simulation sind in Bild 4-28 dargestellt.

Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Umlaufzeiten und eines steigenden Radverkehrsaufkommens stellt sich heraus, dass die Kapazität der geradeausfahrenden Kfz am Zufahrtstyp 3.2 nahezu unabhängig von der Verkehrsstärke der geradeausfahrenden Radfahrer ist. Dieses Ergebnis ist auf das (beobachtete und so in der Simulation eingestellte) Fahrverhalten der Radfahrer zurückzuführen, wobei geradeausfahrende Radfahrer hauptsächlich auf der rechten Seite des ARAS halten. So wird der Kfz-Verkehr generell kaum beeinflusst. Bei hohen Radverkehrsstärken stauen sich die rechts wartenden Radfahrer zurück, sodass eine stärkere Belegung des ARAS vermieden wird und weitere Radfahrer keinen zusätzlichen kapazitätsmindernden Einfluss auf den Kfz-Verkehr haben.

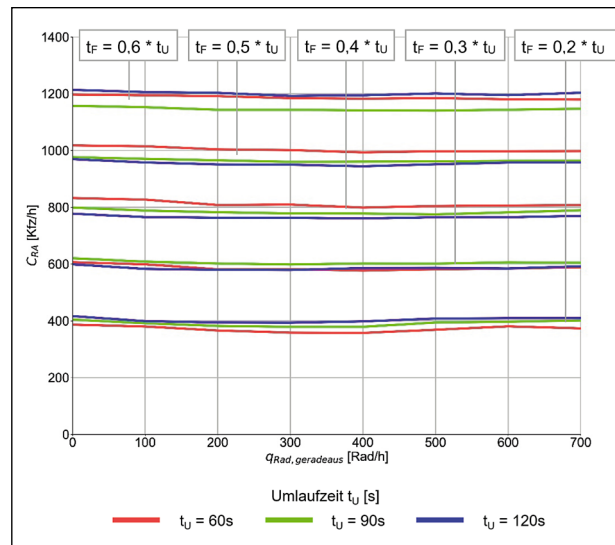


Bild 4-28: Kapazität der geradeausfahrenden Kfz geradeausfahrenden Radfahrern auf ARAS ( $t_U = 60$  s, 90 s, 120 s)

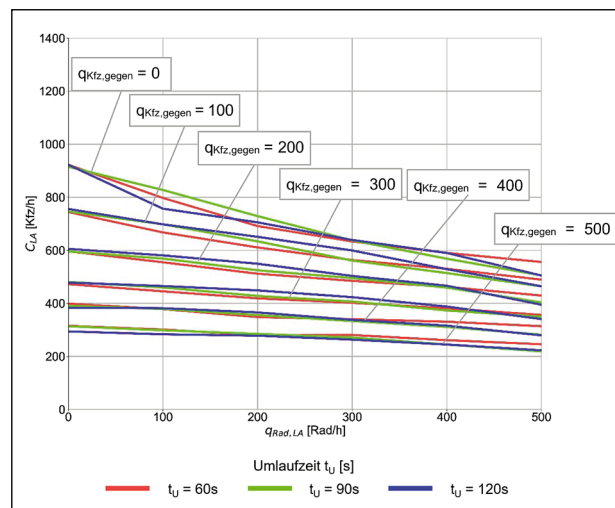


Bild 4-29: Kapazität des Linksabbiegers  $C_{LA}$  mit ARAS Musterknotenpunkt 2 Zufahrtstyp 3.2 ( $t_U = 60$  s, 90 s, 120 s,  $t_F = 0,5 * t_U$ )

### Szenario 4: Kapazität bedingt verträglich links über einen ARAS abbiegender Kfz:

In diesem Szenario liegt der Fokus auf der Kapazität bedingt verträglich links über einen ARAS abbiegender Kfz in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im gleichen Strom linksabbiegender Radfahrer. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Bild 4-29 dargestellt.

Die Kapazität nimmt bei steigender Anzahl linksabbiegender Radfahrer ab. Unabhängig von der Umlaufzeit und bei gleicher  $q_{Rad,LA}$  ist der Kapazitätsunterschied für  $q_{Kfz,gegen} > 300$  Kfz/h geringer als für  $q_{Kfz,gegen} < 300$  Kfz/h.

Da sich durch den ARAS die linksabbiegenden Radfahrer in beiden untersuchten Zufahrtstypen vor

den Fahrzeugen positionieren, hängt die Kapazität der linksabbiegenden Kfz von der Zeitlückenakzeptanz der linksabbiegenden Radfahrer ab. So sind bei steigendem Verkehrsaufkommen der entgegenkommenden Geradesausfahrer kleinere Zeitlücken zu erwarten, was zu einer zusätzlichen Verringerung der Kapazität führt.

## 5 Berechnungsverfahren

Die Analyse des derzeitigen Berechnungsverfahrens im HBS (FGSV, 2015a) in Kapitel 2.3 hat gezeigt, dass der Radverkehr an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage bislang nicht ausreichend berücksichtigt wird. Aufbauend auf den empirischen Erkenntnissen und den Simulationsergebnissen werden nachfolgend Ansätze für mehrere Ergänzungen und/oder Anpassungen des Verfahrens aufgezeigt.

### 5.1 Führung des Radverkehrs auf eigenen Radverkehrsanlagen

Bei Führung auf Radwegen und Radfahrstreifen ist bei hohem Radverkehrsaufkommen durchaus ein Reststau bei Grünende möglich. Die ursprünglichen Überlegungen, diesen Effekt in das Berechnungsverfahren zu integrieren, indem parallel abfließende Radfahrer gegebenenfalls über einen Flächenbezug bei der Bestimmung der Sättigungsverkehrsstärke abgebildet und durch ein Warteschlangensystem mit mehreren Bedienschaltern berücksichtigt werden, werden auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse nicht weiterverfolgt; auch wenn in den empirischen Untersuchungen nur an einem der betrachteten Knotenpunkte in einem einzigen Umlauf ein Reststau bei Grünende von Radfahrern auf einem Radweg oder Radfahrstreifen erfasst wurde. Die Bestimmung der Kapazität im Radverkehr über ein Warteschlangensystem mit mehreren Bedienschaltern erscheint nicht notwendig, da der Abfluss der Radfahrer (hintereinander, teilweise versetzt, teilweise bis überwiegend nebeneinander) von der Breite des Radwegs bzw. Radfahrstreifens abhängt und somit dann bereits über die Sättigungsverkehrsstärke berücksichtigt wird.

Die Berücksichtigung von hohem Radverkehrsaufkommen auf eigenen Radverkehrsanlagen im Berechnungsverfahren ausschließlich durch die Sättigungs-

ungsverkehrsstärke über den Zeitbedarfswert der Radfahrer erscheint deshalb am zielführendsten. Diese Bestimmung sollte, analog wie im Kfz-Verkehr, mittels Anpassungsfaktoren erfolgen, mit denen Effekte berücksichtigt werden, welche einen maßgeblichen Einfluss auf den Zeitbedarfswert haben. Dies sind:

- Breite der Radverkehrsanlage ( $f_{B,Rad}$ ),
- Längsneigung ( $f_{s,Rad}$ ),
- Zusammensetzung des Radverkehrs ( $f_{Z,Rad}$ ).

Die Abhängigkeit der Breite des Radwegs bzw. Radfahrstreifens wurde in den empirischen Untersuchungen festgestellt (vgl. Kapitel 3.3); zur Längsneigung und zur Radverkehrszusammensetzung (z. B. Anteil von Pedelecs und Lastenrädern) konnten keine Erkenntnisse gewonnen werden. Ohne entsprechende empirische Grundlagen können hierzu auch keine simulativen Ergebnisse erzielt werden, da keine Kalibrierung und Validierung dieser Effekte möglich sind.

Somit können auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse lediglich breitenabhängige Anpassungsfaktoren abgeleitet werden. Gemäß den RASSt (FGSV, 2006) beträgt die Regelbreite eines Einrichtungsrads 2,00 m. Eine Breite von 1,60 m ist bei geringer Radverkehrsstärke möglich. Die Regelbreite eines Radfahrstreifens beträgt ohne Markierung ebenfalls 1,60 m (mit Markierung: 1,85 m). Die Differenzierung verschiedener Breiten sollte jedoch entsprechend der Klasseneinteilung in Kapitel S8 des HBS (FGSV, 2015a) für Anlagen des Radverkehrs erfolgen. Danach wird eine Breite von 1,80 m bis 2,00 m als Standardwert gesetzt. Für diesen erfolgt demnach keine Anpassung der Sättigungsverkehrsstärke ( $f_{B,Rad} = 1,00$ ). Bei schmalen Anlagen muss der Anpassungsfaktor  $f_{B,Rad} > 1,00$  sein, da durch das Hintereinanderfahren bzw. -abfließen auf schmalen Radwegen und Radfahrstreifen ein höherer mittlerer Zeitbedarfswert erforderlich ist. Bei breiteren Anlagen ist dementsprechend der Anpassungsfaktor  $f_{B,Rad} < 1,00$  zu wählen. In Tabelle 5-1 sind die Anpassungsfaktoren zur Berücksichtigung

$B_{Rad}$ [m]	$t_{B,Rad}$ [s]	$f_{B,Rad}$ [-]
$\geq 2,00$	1,02	0,75
$1,80 \leq B_{Rad} < 2,00$	1,38	1,00
$1,60 \leq B_{Rad} < 1,80$	1,96	1,40
$< 1,60$	2,25	1,60

Tab. 5-1: Anpassungsfaktoren zur Berücksichtigung der Breite des Radwegs bzw. Radfahrstreifens

der Breite des Radwegs bzw. Radfahrstreifens angegeben. Die gewählten Grenzwerte der Breitenklassen entsprechen denjenigen in Kapitel S8 „Anlagen für den Radverkehr“ des HBS.

Die Anpassungsfaktoren zur Berücksichtigung der Breite des Radwegs bzw. Radfahrstreifens wurden aus den gewonnenen empirischen Erkenntnissen zur Abhängigkeit des mittleren Zeitbedarfswerts von der Breite (vgl. Kapitel 3.3.4) abgeleitet. Da die empirisch erfassten Werte für andere Breiten erfasst wurden, erfolgte eine entsprechende Mittelung der Werte zur Anpassung auf die in Tabelle 5-1 angegebenen Breitenklassen. Dies betrifft beispielsweise die empirisch bestimmten mittleren Zeitbedarfswerte für 2,00 m und 2,50 m breite Anlagen, die mit der Anzahl der jeweiligen Stichprobe gemittelt wurden.

Anpassungsfaktoren für die Längsneigung und die Radverkehrszusammensetzung können aufgrund bislang fehlender Erkenntnisse nicht abgeleitet werden. Hier sind aber Erkenntnisse aus dem derzeit noch laufenden FE 03.0539/2015/OGB „Empfehlungen zur Breite von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung der Verkehrsqualität“ zu erwarten.

Grundsätzlich ist in Bezug auf die Längsneigung für die Ebene keine Anpassung der Sättigungsverkehrsstärke ( $f_{s,Rad} = 1,00$ ) erforderlich. Festzulegen sind dazu noch die obere und untere Längsneigung, für die im Radverkehr an Knotenpunkten ebene Verhältnisse bestehen (z. B.  $-2 \% \leq s_{Rad} \leq 2 \%$ ). Bei größeren Steigungen ist dann ein Anpassungsfaktor  $f_{s,Rad} > 1,00$  anzusetzen, da hierdurch ein höherer mittlerer Zeitbedarfswert erforderlich ist; bei größerem Gefälle ist dementsprechend der Anpassungsfaktor  $f_{s,Rad} < 1,00$  anzusetzen, da hier ein schnellerer Abfluss möglich ist.

Im Hinblick auf die Zusammensetzung des Radverkehrs sind zwei Aspekte zu beachten: Bei einem hohen Anteil von Lastenrädern ist ein höherer Breitenbedarf erforderlich, sodass dann ein Anpassungsfaktor  $f_{z,Rad} > 1,00$  anzusetzen ist, aus dem sich ein höherer mittlerer Zeitbedarfswert ergibt. Bei einem hohen Anteil von Pedelecs ist aufgrund des höheren Beschleunigungsvermögens ein Anpassungsfaktor  $f_{z,Rad} < 1,00$  anzusetzen, da hierdurch ein schnellerer Abfluss möglich ist.

Die Kapazität der Radverkehrsanlage kann dann analog zur Kapazität des Kfz-Verkehrs bei unbe-

hindertem Abfluss bestimmt werden. Auch im Radverkehr sollte dabei in der Abflusszeit ein Zeitzuschlag von + 1 s angesetzt werden, um zu berücksichtigen, dass einige Radfahrer noch einen Teil der Gelbzeit (die bei eigener Signalisierung wegen des fehlenden Gelbsignals nicht angezeigt wird) nutzen.

Zur Integration der vorgeschlagenen Ergänzung in das HBS-Kapitel S4 ist dort – analog zu Kapitel S4.4.2 „Sättigungsverkehrsstärke eines Fahrstreifens“ – ein neues Kapitel S4.4.3 „Sättigungsverkehrsstärke eines Radwegs oder Radfahrstreifens“ zu ergänzen. Die Nummerierung der nachfolgenden Kapitel ist entsprechend anzupassen.

## 5.2 Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen

Die Überlegungen, den Effekt des „Vorbeifahrens rechts“ an der Warteschlange des Kfz-Verkehrs im Zusammenhang mit der Fahrstreifenbreite über einen Anpassungsfaktor für die Verkehrszusammensetzung bei der Sättigungsverkehrsstärke abzubilden, können aufgrund fehlender empirischer Erkenntnisse hierzu aus den empirischen Untersuchungen nicht weiterverfolgt werden. Hier können lediglich Hinweise gegeben werden, denen dann durch geeignete Empirie im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten zu nachzugehen ist.

Das Vorbeifahren rechts ist im Wesentlichen zunächst abhängig von der Breite des Fahrstreifens. Ist diese ausreichend, sodass Radfahrer problemlos an der Warteschlange des Kfz-Verkehrs vorbeifahren können – auch an Schwerverkehrsfahrzeugen –, kann der Kfz-Verkehr bei Freigabe unbeeinflusst vom Radverkehr abfließen. Ebenso kann der Radverkehr unbeeinflusst abfließen. Solche Breiten liegen jedoch in der Regel nicht vor. Deshalb ist das Schwerverkehrsaufkommen zu berücksichtigen.

Bei weitergehenden Untersuchungen ist im Hinblick auf das Vorbeifahren rechts die Führung des Radverkehrs auf Schutzstreifen gesondert zu betrachten. Sind diese vorhanden, ist davon auszugehen, dass die Radfahrer bei reinem Pkw-Verkehr an den wartenden Kfz vorbeifahren können, da sich die Kraftfahrer – so zeigen es zumindest die bisherigen Praxiserfahrungen – in der Regel am Schutzstreifen orientieren und diesen freihal-



ten. Bei geringen Kernfahrbahnbreiten kann es bei Begegnungsfällen von Kfz, insbesondere wenn Schwerverkehrsfahrzeuge beteiligt sind, jedoch dazu kommen, dass der Schutzstreifen von Kfz überfahren wird. Bei Führung ohne Schutzstreifen ist dagegen nicht davon auszugehen, da sich dann selbst Pkw-Fahrer oftmals rechts innerhalb des Fahrstreifens aufstellen (Orientierung am Bord), sodass keine durchgängige Vorbeifahrt für Radfahrer gewährleistet ist. Dies ist oftmals sogar unabhängig von der verfügbaren Fahrstreifenbreite, insbesondere bei Mischfahrstreifen für geradeausfahrenden und rechtsabbiegenden Kfz-Verkehr, da hier letzterer sich tendenziell rechts auf dem Fahrstreifen orientiert.

### 5.3 Anordnung von aufgeweiteten Radaufstellstreifen

Durch die vor dem Kfz-Verkehr stehenden und abfließenden Radfahrer wird, wie die empirischen Untersuchungen gezeigt haben (vgl. Kapitel 3.3), der Abfluss des Kfz-Verkehrs behindert. Diese Behinderung ist jedoch, wie die Simulationsergebnisse zeigen (vgl. Kapitel 4.2), nur bedingt abhängig vom Radverkehrsaufkommen. Erst ab einer Radverkehrsstärke von etwa 100 Rad/h macht sich ein geringer Effekt auf die Kapazität des Kfz-Verkehrs bemerkbar.

Die ursprüngliche Überlegung, diesen Effekt über einen Angleichungsfaktor für die Verkehrszusammensetzung bei der Sättigungsverkehrsstärke abzubilden, wird deshalb nicht weiterverfolgt. Vielmehr erscheint es zielführender zu sein, diesen Effekt durch einen Zeitabschlag in der Abflusszeit des Kfz-Verkehrs zu berücksichtigen. Als pragmatischer, aus den Simulationsergebnissen abgeleiteter Ansatz wird vorgeschlagen, bei einer Radverkehrsstärke von  $q_{Rad} \leq 100$  Rad/h keinen Zeitabschlag, bei einer Radverkehrsstärke von  $q_{Rad} > 100$  Rad/h pauschal einen Zeitabschlag von - 1 s anzusetzen.

Zur Integration der vorgeschlagenen Ergänzung in das HBS-Kapitel S4 ist dort im bestehenden Kapitel S4.4.3 „Kapazität bei unbehindertem Abfluss“ zu Gleichung S4-7 verbal zu ergänzen, dass diese im Radverkehr nur bei einer Radverkehrsstärke von  $q_{Rad} > 100$  Rad/h gilt.

## 5.4 Bedingt verträgliche Rechtsabbiegerströme

Es sind gegenüber den ersten Überlegungen (vgl. Kapitel 2.3) zwei Ansätze zu verfolgen. Zum einen ist der Einfluss bedingt verträglicher Rechtsabbiegerströme auf rechtsabbiegende Radfahrer bei Führung im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen durch Fußgänger auf der rechtsliegenden Furt zu betrachten. Zum anderen ist der Einfluss geradeausfahrender Radfahrer bei Führung im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen sowie auf Radfahrstreifen und Radwegen auf den Abfluss rechtsabbiegender Kfz zu betrachten.

### 5.4.1 Rechtsabbiegender Radverkehr

Der Abfluss bedingt verträglicher Rechtsabbiegerströme kann durch Fußgänger auf der rechtsliegenden Furt beeinträchtigt werden. Im Rahmen der empirischen Untersuchungen konnte jedoch ein solcher Effekt nicht festgestellt werden, was mit den nicht so hohen Fußgängerverkehrsstärken an den betrachteten Knotenpunkten zu begründen ist. Bei den beobachteten Fußgängerverkehrsstärken ergaben sich für die abbiegenden Radfahrer immer ausreichende Lücken im Fußgängerstrom.

Zunächst gilt es zu klären, ab welcher Fußgängerverkehrsstärke überhaupt erst ein Einfluss auf den Abfluss rechtsabbiegender Radfahrer besteht. Hinweise hierauf können gegebenenfalls aus den Erkenntnissen von MILTNER (2003) zum Einfluss von Fußgängern auf rechtsabbiegende Kfz an verkehrszeichengeregelten Knotenpunkten gezogen werden. Bei Radfahrern wird jedoch ein Einfluss erst bei höheren Fußgängerverkehrsstärken zu erwarten sein, da Radfahrer im Gegensatz zu Kfz auch kleinere Lücken im Fußgängerstrom nutzen können (und wie Praxiserfahrungen zeigen, auch nutzen). Geeignete empirische Untersuchungen im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten sind erforderlich, um Zusammenhänge zwischen dem Abfluss bedingt verträglich rechtsabbiegender Radfahrer durch Fußgänger auf der rechtsliegenden Furt eruieren zu können.

### 5.4.2 Rechtsabbiegender Kfz-Verkehr

Zur Berücksichtigung des Einflusses von parallel zu bedingt verträglich rechtsabbiegenden Kfz geführten Radfahrern (und Fußgängern) wird im derzeitigen Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) die Freigabezeit des Kfz-Verkehrs bestimmt, in welcher die Rechtsabbieger ohne Konflikte abfließen können.

Dabei wird u. a. auch die Anzahl der Aufstellplätze zwischen Haltlinie und Furt sowie die Belegungszeit der Furt in Abhängigkeit der Anzahl der Radfahrer und Fußgänger pro Umlauf berücksichtigt. Streng genommen gilt diese Anpassung nur für mehr oder weniger abgesetzte Furten, also bei einer (abgesetzten) Führung des Radverkehrs auf Radwegen. Die Betrachtung von direkt neben dem Kfz-Verkehr geführten Radfahrern im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen sowie auf Radfahrstreifen liegt dem derzeitigen Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) nicht zugrunde, zumal der Einfluss der Radfahrer auf der Furt im Wesentlichen auf Experteneinschätzungen und nicht auf wissenschaftlichen Untersuchungen beruht.

Wie die Simulationsergebnisse zeigen (vgl. Kapitel 4.2), haben direkt neben dem Kfz-Verkehr geführte, geradeausabfließende Radfahrer einen erheblichen Einfluss auf die Kapazität des Rechtsabbiegerstroms im Kfz-Verkehr. Aus diesen Ergebnissen können theoretisch – analog zum derzeitigen Ansatz – Belegungszeiten der fahrbahnnahen Radfahrerfurt in Abhängigkeit der Radverkehrsstärke bzw. der Anzahl der Radfahrer pro Umlauf abgeleitet werden. Zielführender erscheint es jedoch, die Kapazitätsabminderung für den Kfz-Verkehr durch direkt neben diesem geführten, geradeausabfließenden Radfahrer direkt in Abhängigkeit der Radverkehrsstärke (Anzahl der Radfahrer in der betrachteten Stunde) vorzunehmen.

Aus den Simulationsergebnissen ergibt sich, dass die Kapazität des Kfz-Verkehrs von der Radverkehrsstärke auf der nebenliegenden Furt und dem Freigabezeitanteil für den Kfz-Verkehr ( $f_F = t_F / t_U$ ) abhängig ist. Daraus lässt sich ein Faktor für die Ab-

minderung der Kapazität des Kfz-Verkehrs bei unbehindertem Abfluss ableiten. In Bild 5-1 ist der mittels Regressionsrechnung abgeleitete Zusammenhang dargestellt.

Die Kapazität des Rechtsabbiegers ergibt sich damit zu:

$$C_{RA,i} = C_{0,RA,i} \cdot f_{CRA,Kfz} \text{ [Kfz/h]}$$

mit:

$C_{RA,i}$  Kapazität des bedingt verträglich geführten Rechtsabbiegerstroms  $i$  [Kfz/h]

$C_{0,RA,i}$  Kapazität des Rechtsabbiegerstroms  $i$  bei unbehindertem Abfluss nach Gleichung S4-8 des HBS (FGSV, 2015a) [Kfz/h]

$f_{CRA,Kfz}$  Faktor zur Abminderung der Kapazität des Rechtsabbiegers in Abhängigkeit der Radverkehrsstärke auf der nebenliegenden Furt und dem Freigabezeitanteil für den Kfz-Verkehr nach Bild 5-1 [-]

Der Faktor zur Abminderung der Kapazität des Rechtsabbiegers lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_{CRA} = e^{-\left(\frac{1}{\sqrt{f_F} \cdot 1000} - \frac{f_F^2}{q_{s,RA} \cdot 0,85}\right) \cdot q_{Rad}} \text{ [-]} \quad \text{Gl. 5}$$

mit:

$f_{CRA,Kfz}$  Faktor zur Abminderung der Kapazität des Rechtsabbiegers in Abhängigkeit der Radverkehrsstärke auf der nebenliegenden Furt und dem Freigabezeitanteil für den Kfz-Verkehr [-]

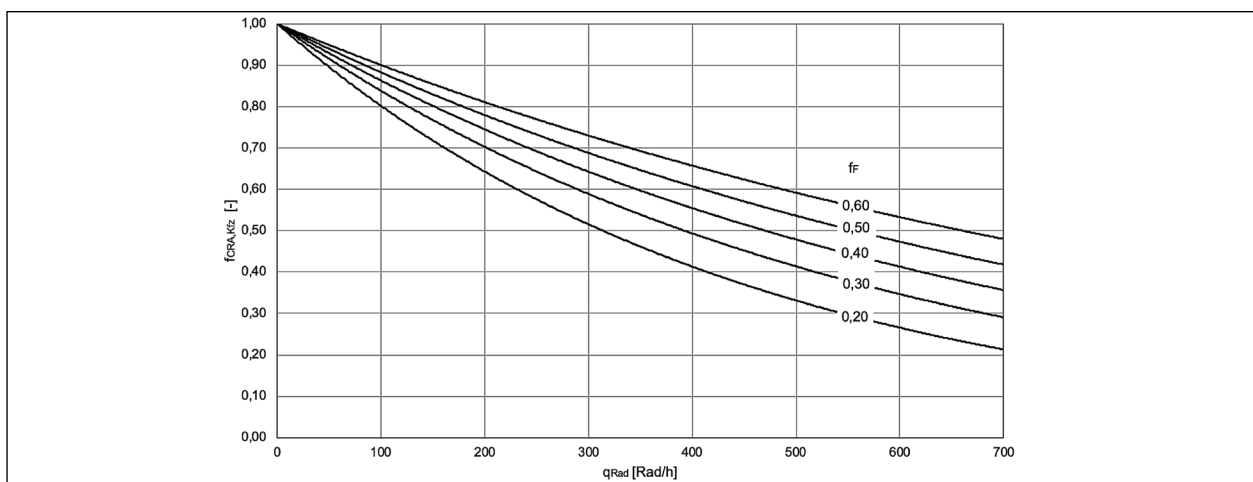


Bild 5-1: Faktor zur Abminderung der Kapazität des Rechtsabbiegers in Abhängigkeit der Radverkehrsstärke auf der nebenliegenden Furt und dem Freigabezeitanteil für den Kfz-Verkehr

$f_F$	Freigabezeitanteil des Rechtsabbiegerstroms [-]
$q_{S,RA}$	Sättigungsverkehrsstärke des Rechtsabbiegerstroms [Kfz/h]
$q_{Rad}$	Radverkehrsstärke auf Radfahrerfurt [Rad/h]

Da die Furt für die Radfahrer in dem hier betrachteten Fall von der Fußgängerfurt räumlich getrennt ist, ist die geringere Kapazität des bedingt verträglich geführten Rechtsabbiegerstroms maßgebend. Dies bedeutet, dass unabhängig voneinander die Kapazität in Abhängigkeit der Radverkehrsstärke gemäß Bild 5-1 sowie die Kapazität in Abhängigkeit der Belegung der Fußgängerfurt mit dem bereits im HBS-Kapitel S4 enthaltenen Zusammenhängen im bestehenden Kapitel S4.4.5 „Kapazität der Rechtsabbieger bei bedingt verträglichem Abfluss“ – die dann nur noch für den Fußgängerverkehr gelten – zu bestimmen sind.

Zur Integration der vorgeschlagenen Anpassung in das HBS-Kapitel S4 ist dort im bestehenden Kapitel S4.4.5 „Kapazität der Rechtsabbieger bei bedingt verträglichem Abfluss“ die Gleichung zur Berechnung der Kapazität des bedingt verträglich geführten Rechtsabbiegerstroms in Abhängigkeit der Radverkehrsstärke auf der nebenliegenden Furt und dem Freigabezeitanteil für den Kfz-Verkehr mit dem Bild 5-1 zu ergänzen.

## 5.5 Bedingt verträgliche Linksabbiegerströme

Es sind zwei Ansätze zu verfolgen: Zum einen die Berücksichtigung des Abflusses linksabbiegender Radfahrer im Vergleich zum Abfluss linksabbiegender Kfz, zum anderen die Berücksichtigung des Einflusses auf linksabbiegender Kfz und Radfahrer durch Radfahrer im Gegenverkehr.

### 5.5.1 Linksabbiegender Radverkehr

In den empirischen Untersuchungen konnte an keinem der betrachteten Knotenpunkte der Einfluss des entgegenkommenden geradeausfahrenden Kfz-Verkehrs auf bedingt verträglich linksabbiegender Radfahrer auf einem Radweg oder Radfahrstreifen beobachtet werden. Da zum Verhalten von bedingt verträglich linksabbiegender Radfahrern in Abhängigkeit vom entgegenkommenden gerade-

ausfahrenden Kfz-Verkehr keine ausreichenden Erkenntnisse vorliegen, die eine Kalibrierung und Validierung von Simulationen erlauben, können auch keine weitergehenden simulativen Erkenntnisse gewonnen werden. Hierzu sind deshalb zunächst weitere Forschungsarbeiten mit empirischen Untersuchungen zu höheren Kfz- und Radverkehrsstärken erforderlich.

### 5.5.2 Linksabbiegender Kfz-Verkehr

Zur Berücksichtigung des Einflusses von Radfahrern im Gegenverkehr ist der derzeitige Ansatz im Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Die ursprüngliche Überlegung, dies beispielsweise über eine Belegungszeit der Konfliktfläche durch den Gegenverkehr zu berücksichtigen, erscheint nicht zielführend. Auch der Ansatz, den im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen sowie auf Radfahrstreifen geführten Radverkehr, anders als im derzeitigen Verfahren des HBS (FGSV, 2015a; die Zusammensetzung des Kfz-Verkehrs wird im derzeitigen Verfahren nur im Hinblick auf den Schwerverkehr berücksichtigt), bei der Bestimmung der Sättigungsverkehrsstärke zu berücksichtigen, erscheint nicht zielführend. Wie die Simulationsergebnisse zeigen (vgl. Kapitel 4.2), haben die Kfz- und Radverkehrsstärken im Gegenverkehr einen erheblichen Einfluss auf die Kapazität des bedingt verträglich geführten Linksabbiegestroms im Kfz-Verkehr. Deshalb ist es sinnvoll, die Kapazitätsabminderung für den Kfz-Verkehr – diese bezieht sich ausschließlich auf die Kapazität beim Durchsetzen des Gegenverkehrs, nicht auf die Kapazität beim Phasenwechsel – durch Kfz und Radfahrer im Gegenverkehr direkt in Abhängigkeit dieser beiden Verkehrsstärken vorzunehmen. Dazu erfolgt eine Umrechnung in Pkw-Einheiten mit  $0,75 \text{ Rad} = 1 \text{ Pkw-E}$ , da hiermit der Zusammenhang zwischen der Gegenverkehrsstärke in Pkw-E und den simulativ ermittelten Kapazitäten der Linksabbieger größer ist als bei einem Ansatz von  $0,5 \text{ Rad} = 1 \text{ Pkw-E}$  wie bisher im HBS.

Der Faktor für die Abminderung der Kapazität des Kfz-Verkehrs beim Durchsetzen des Gegenverkehrs ist in Bild 5-2 dargestellt. Ermittelt werden konnten lediglich die Abminderungsfaktoren der Kapazität des Linksabbiegers beim Durchsetzen des Gegenverkehrs in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Gegenverkehr für die Freigabezeitanteile von  $f_F = 0,20$  und  $f_F = 0,50$ , da nur diese in den Simulationsuntersuchungen betrachtet wurden.

Die Kapazität beim Durchsetzen ergibt sich damit zu:

$$C_{D,i} = C_{0,LA,i} \cdot f_{CD,Kfz} \text{ [Kfz/h]}$$

Gl. 6

mit:

$C_{D,i}$  Kapazität des bedingt verträglich geführten Linksabbiegerstroms  $i$  beim Durchsetzen des Gegenverkehrs [Kfz/h]

$C_{0,LA,i}$  Kapazität des Linksabbiegerstroms  $i$  bei unbehindertem Abfluss nach Gleichung S4-8 des HBS (FGSV, 2015a) [Kfz/h]

$f_{CDKfz}$  Faktor zur Abminderung der Kapazität des Linksabbiegers beim Durchsetzen des Gegenverkehrs in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Gegenverkehr nach Bild 5-2 [-]

Der Faktor zur Abminderung der Kapazität des Linksabbiegers beim Durchsetzen des Gegenverkehrs lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_{CD,Kfz} = e^{-0,009 \cdot q_{gegen}} \text{ [-]} \text{ für } f_F = 0,20$$

bzw.

$$f_{CD,Kfz} = e^{-0,002 \cdot q_{gegen}} \text{ [-]} \text{ für } f_F = 0,50$$

Gl. 7

mit:

$f_{CDKfz}$  Faktor zur Abminderung der Kapazität des Linksabbiegers beim Durchsetzen des Gegenverkehrs in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Gegenverkehr [-]

$q_{gegen}$  Gegenverkehrsstärke [Pkw-E/h]

$f_F$  Freigabezeitanteil des Linksabbiegerstroms [-]

Die abgeleiteten Zusammenhänge gelten nur bei zeitgleicher Freigabe des bedingtverträglich geführten Linksabbiegerstroms und des Gegenverkehrs.

Zudem gelten sie nicht bei Führung des Radverkehrs im Gegenverkehr auf Radwegen und (eher) abgesetzte Furten; dieser Fall wird damit nicht berücksichtigt. Hier könnte wie im derzeitigen Verfahren für bedingt verträgliche Rechtsabbieger ein Ansatz über eine Belegungszeit der Konfliktfläche (also der Furt) zielführend sein. Hierbei wird eine vergleichende Betrachtung hinsichtlich der maßgebenden Kapazitätsabminderung durch den entgegenkommenden Kfz-Verkehr auf der Fahrbahn und den Radverkehr auf der Furt erforderlich sein.

Vor Integration der vorgeschlagenen Ergänzung in das HBS-Kapitel 4 (dort in Kapitel S4.4.4) ist zunächst zu diskutieren und ggf. durch ergänzende Untersuchungen zu prüfen, ob dieser Ansatz auch auf versetzte Freigabezeiten von Linksabbieger und Gegenverkehr (Beginn der Freigabezeit des Linksabbiegerstroms nach oder vor der des Gegenverkehrs, Ende der Freigabezeit des Linksabbiegerstroms nach oder vor der des Gegenverkehrs) übertragbar ist.

## 5.6 Indirektes Linksabbiegen von Radfahrern

Bei der Betrachtung des indirekten Linksabbiegens von Radfahrern sind zwei Ansätze zu verfolgen. Zum einen muss die Betrachtung des abbiegenden

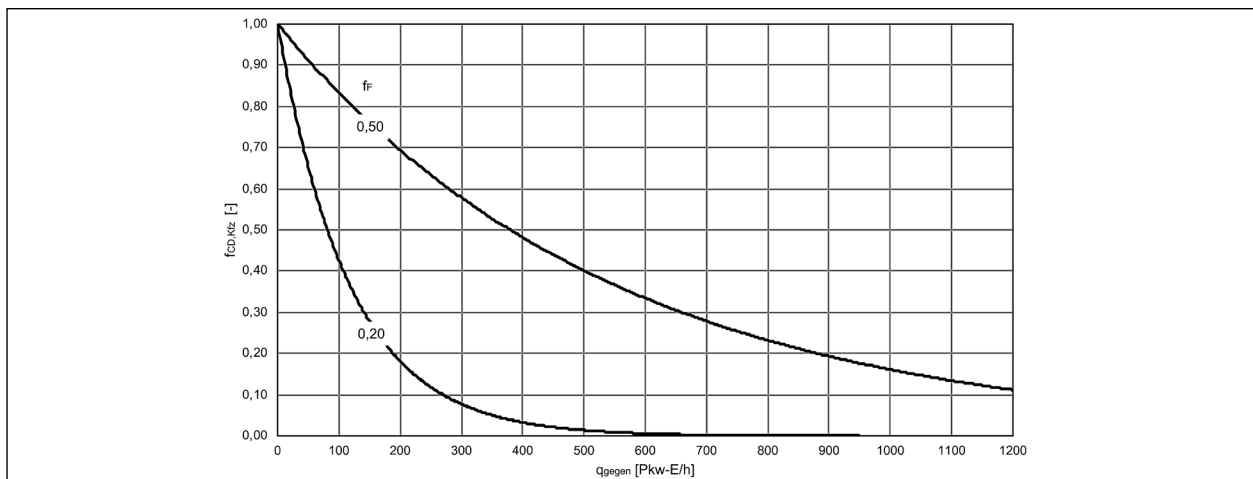


Bild 5-2: Faktor zur Abminderung der Kapazität des Linksabbiegers beim Durchsetzen des Gegenverkehrs in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Gegenverkehr

Radverkehrs erfolgen, zum anderen der Einfluss von indirekt linksabbiegenden Radfahrern auf den Abfluss der in der nachfolgenden Phase – gleichzeitig mit dem indirekten Radfahrerstrom – freigegebenen Kfz im kreuzenden und/oder einbiegenden Strom.

### 5.6.1 Linksabbiegender Radverkehr

Hier gilt es neben der rechnerischen Berücksichtigung im Verfahren selbst – hier ist bei indirektem Linksabbiegen gegebenenfalls ein zweimaliges Warten an einer Lichtsignalanlage erforderlich – auch eine vergleichende Verkehrsqualitätsbewertung von direktem und indirektem Linksabbiegen abzuleiten. Da bei den empirischen Untersuchungen hierzu keine ausreichenden Erkenntnisse gewonnen werden konnten (vgl. Kapitel 3.3), können hier nur Hinweise gegeben werden, die dann durch geeignete Empirie im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten aufzugreifen sind.

Beim indirekten Linksabbiegen müssen Radfahrer gegebenenfalls zweimal warten: Die Gesamtwartezeit ist abhängig von der Ankunft des Radfahrers an der Haltlinie. Kommt dieser bei Grün an, muss er nur auf der Aufstellfläche warten, kommt er bei Rot an, muss er zunächst an der Haltlinie in der Zufahrt, dann nochmals auf der Aufstellfläche warten.

Eine Addition der jeweiligen maximalen Wartezeiten (entspricht an der Haltlinie der Sperrzeit, auf der Aufstellfläche der Zwischenzeit zum nachfolgend freigegebenen kreuzenden und/oder einbiegenden Kfz-Verkehrsstroms) erscheint hier nicht sinnvoll. Vielmehr sollte hierzu die mittlere Wartezeit herangezogen werden. Im Hinblick auf eine vergleichende Bewertung von direktem und indirektem Linksabbiegen sollte deshalb grundsätzlich für den Radverkehr nicht die maximale, sondern die mittlere Wartezeit als maßgebendes Qualitätskriterium zugrunde gelegt werden. Hierzu sind jedoch weiterführende Untersuchungen im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten erforderlich.

### 5.6.2 Abfluss des kreuzenden bzw. einbiegenden Kfz-Verkehrs

Der Einfluss indirekt linksabbiegender Radfahrer auf den nachfolgenden kreuzenden und/oder einbiegenden Kfz-Verkehrsstrom konnte im Rahmen der empirischen Untersuchungen nicht ausreichend erfasst werden. Deshalb können hier nur Hinweise gegeben werden, die dann durch geeignete Empirie

im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten aufzugreifen sind. Ein Ansatz wäre, die Abflusszeit für den Kfz-Verkehrsstrom in Abhängigkeit der Anzahl indirekt linksabbiegender Radfahrer pro Umlauf und deren Abflusszeit (aus mittlerem Zeitbedarfswert) durch einen Zeitabschlag zu reduzieren. Dabei sind ein eventueller Zeitvorsprung für den Radverkehr und der Abstand zwischen Haltlinie des Kfz-Verkehrs und der Aufstellfläche der Radfahrer (Anzahl der Aufstellplätze) einzubeziehen.

Vor dem Hintergrund der verfügbaren Aufstellflächen sind die Einsatzgrenzen des indirekten Linksabbiegens begrenzt. Legt man eine Dichte von etwa  $0,3 \text{ Rad/m}^2$  zugrunde (vgl. Kapitel 3.3), dann können pro Umlauf maximal zehn Radfahrer die Aufstellfläche einschließlich des dahinter liegenden Bereichs über eine Fahrstreifenbreite (bezogen auf die kreuzende Zufahrt) belegen, ohne den in gleicher Richtung auf den Knotenpunkt zufahrenden Rechtsabbieger zu behindern.

Zum Abflussverhalten von Radfahrern aus der Aufstellfläche liegen keine empirischen Erkenntnisse vor. Setzt man einen mittleren Zeitbedarfswert von  $1,8 \text{ s/Rad}$  an (dies entspricht dem Zeitbedarfswert bei  $1,80 \text{ m}$  breiten Radwegen bzw. Radfahrstreifen), ist die Aufstellfläche bei voller Belegung etwa noch  $18 \text{ s}$  nach Freigabe für den Radverkehr belegt. Somit ist in diesem Fall selbst bei einer früheren Freigabe des Radverkehrs von einer Beeinträchtigung des Abflusses des nachfolgenden kreuzenden und/oder einbiegenden Kfz-Verkehrsstroms auszugehen. Die damit einhergehende Kapazitätsabminderung kann ohne empirische Grundlagen jedoch nicht quantifiziert werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Vorgehensweise

Ziel dieses Forschungsprojekts war es, den Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen zu untersuchen und darauf basierend die bestehenden Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Verkehrsqualität zu überprüfen, ggf. anzupassen bzw. zu ergänzen.

In der Grundlagenanalyse wurde zunächst der Stand von Wissenschaft und Technik analysiert. Die Ergebnisse (Erkenntnisse zum Fahrverhalten von

Radfahrern an signalisierten Knotenpunkten sowie zur Interaktion zwischen Kfz und Radfahrern) wurden dargestellt. Es wurden Untersuchungsfälle definiert, die die unterschiedlichen, in den Entwurfsrichtlinien und in der Praxis vorkommenden Führungsformen abdecken. Schließlich wurde das bestehende Berechnungsverfahren des HBS (FGSV, 2015a) hinsichtlich der Berücksichtigung des Radverkehrs analysiert und mögliche Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung abgeleitet.

Im nächsten Schritt wurden Erkenntnisse zum Verkehrsablauf für Kfz und Radverkehr an realen Knotenpunkten mit empirischen Untersuchungen gewonnen. Auf Basis der in der Grundlagenanalyse definierten Untersuchungsfälle wurden zunächst die wichtigsten Zufahrtstypen für die Datenerhebung und -analyse identifiziert. Anschließend wurden geeignete Knotenpunkte in Berlin, Freiburg und München für die Datenerhebung in Abstimmung mit den lokalen Behörden ausgewählt. Dabei wurde auf ein möglichst hohes Radverkehrsaufkommen sowie auf die Möglichkeit, die Ausrüstung für die Videoerhebungen aufbauen zu können, geachtet. Ein hohes Radverkehrsaufkommen bezieht sich dabei nicht ausschließlich auf die absolute Radverkehrsstärke, sondern ist auch in Relation zur Kfz-Verkehrsstärke zu sehen. Bei hohen Kfz-Verkehrsstärken kann in bestimmten Konstellationen eine demgegenüber relativ geringe Radverkehrsstärke schon einen starken Einfluss haben, sodass für diesen Fall diese dann bereits ein hohes Radverkehrsaufkommen darstellt.

Aus den Videos wurden Kenngrößen zum Radverkehrsablauf und Erkenntnisse zur Interaktion zwischen Radfahrern und Kfz ermittelt. Aus den Videodaten wurden Trajektorien aller Verkehrsteilnehmer extrahiert und analysiert, um Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs, zur Entwicklung des Berechnungsverfahrens und zur Kalibrierung und Validierung der Verkehrssimulationen zu berechnen. Die gemessenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Radfahrer wurden auf Basis der Art und Breite der Radverkehrsführung ausgewertet und für die Kalibrierung der Verkehrssimulationen verwendet. Die beobachteten Kenngrößen Dichte im Stand und die Zeitbedarfswerte wurden zur Validierung der Verkehrssimulationen verwendet. Darüber hinaus wurden Belegungszeiten erhoben (Dauer der Belegung von ARAS und Furten durch Radfahrer), die in die Entwicklung und Weiterentwicklung der Berechnungsverfahren eingeflossen sind.

Weitere empirische Erhebungen könnten die hier gewonnenen Daten ergänzen und Erkenntnislücken schließen, beispielsweise:

- Beobachtungen bei Führung des Radverkehrs ohne Schutzstreifen im Mischverkehr bei hohen Radverkehrsstärken, da je nach Fahrstreifenbreite und Verkehrszusammensetzung eine substantielle Behinderung des Kfz-Verkehrs möglich bzw. zu erwarten ist,
- Untersuchungen von Zufahrten bei Radverkehrsstärken, die einen Rückstau nach Freigabezeitende zur Folge haben,
- Untersuchungen zum indirekten Linksabbiegen mit gesonderten Aufstellflächen bei sehr hohen Radverkehrsstärken,
- Analyse der Zeitlückenakzeptanz beim Durchsetzen des Gegenverkehrs. Das Rad durchsetzt den Kfz-Verkehr und umgekehrt.

Zur Erzeugung von Daten für die Überprüfung und Ergänzung der Berechnungsverfahren wurden Simulationsmodelle verwendet, da die empirischen Untersuchungen nicht alle Situationen und nicht das gesamte Wertespektrum relevanter Kfz- und Radverkehrsstärken abdecken konnten. Zunächst wurde das Fahrverhalten der Kfz auf Basis des HBS kalibriert. Das Verhalten der Radfahrer wurde auf Basis der empirischen Untersuchungen, ergänzt durch den Stand von Wissenschaft und Technik, kalibriert (Geschwindigkeiten, Beschleunigungen) und validiert (Dichte im Stand, Zeitbedarfswerte). Insgesamt wurden vier Szenarien teilweise an unterschiedlichen Musterknoten bzw. Zufahrtstypen untersucht. Dazu wurden die Verkehrsstärken verschiedener Radverkehrs- und Kfz-Ströme sowie die Umlaufzeiten und Freigabezeiten systematisch variiert, um den Einfluss der Radverkehrsstärke auf die Kapazität der Kfz für möglichst viele Konstellationen ermitteln und dies den Berechnungsverfahren zugrunde legen zu können.

Die mikroskopische Verkehrssimulation hat sich als besonders geeignetes Instrument zur Erzeugung von relevanten Daten für die Überprüfung und Weiterentwicklung der Berechnungsverfahren herausgestellt. Einerseits kann das Fahrverhalten der Radfahrer und der Kfz im Detail parametrisiert werden, andererseits können die für die Berechnungsverfahren benötigten Daten relativ direkt erzeugt und ausgegeben werden. Zukünftig gewonnene empirische Erkenntnisse können helfen, die Simulationsmodelle noch besser zu kalibrieren. Wäh-

rend zu den Geschwindigkeiten, den Beschleunigungen sowie zum Aufstell- und Abflussverhalten der Radfahrer nun weitgehende Erkenntnisse vorliegen, fehlen vor allem noch detaillierte Informationen zur Zeitlückenakzeptanz, beispielsweise wenn das Rad den Kfz-Verkehr durchsetzt und umkehrt.

## 6.2 Ergebnisse

Aufbauend auf den empirischen und Simulationsergebnissen wurden Ansätze für mehrere Ergänzungen und/oder Anpassungen des Berechnungsverfahrens im HBS aufgezeigt. Konkrete Verfahrensanpassungen bzw. -ergänzungen konnten für folgende Aspekte abgeleitet werden:

- Führung des Radverkehrs auf eigenen Radverkehrsanlagen (Radweg bzw. Radfahrstreifen),
- Berücksichtigung des Einflusses durch vor dem Kfz-Verkehr stehende und abfließende Radfahrer bei Anordnung von ARAS,
- Berücksichtigung des Einflusses neben dem Kfz-Verkehr geführter, geradeausabfließender Radfahrer auf die Kapazität der bedingt verträglich rechtsabbiegenden Kfz,
- Berücksichtigung des Einflusses von Radfahrern im Gegenverkehr auf die Kapazität des Linksabbiegestroms im Kfz-Verkehr.

Zur Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen und den dabei auftretenden Effekt des „Vorbeifahrens rechts“ an der Warteschlange des Kfz-Verkehrs, zur Beeinträchtigung des Abflusses bedingt verträglich rechts- und linksabbiegender Radfahrer durch Fußgänger auf der in der Knotenpunktausfahrt liegenden Furt sowie zur Betrachtung des indirekten Linksabbiegens von Radfahrern konnten keine konkreten Verfahrensergänzungen abgeleitet werden. Hier konnten jeweils nur Hinweise gegeben werden.

## 6.3 Offene Punkte

Zur Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen konnten keine ausreichenden Erkenntnisse gewonnen werden. Es ist aus theoretischen Überlegungen heraus zu erwarten, dass die Kapazität (sowohl im Kfz- als auch im Radverkehr) bei hohem Radverkehrsaufkommen

stark von der Möglichkeit des Überholens bzw. vielmehr des gegenseitigen Vorbeifahrens im Rückstau sowie beim Abfluss abhängt. Zur Überprüfung dieser Hypothesen sind zunächst weitergehende empirische Untersuchungen erforderlich. Daraus gewonnene empirische Erkenntnisse würden die Kalibrierung von Simulationsmodellen erlauben, mit denen z. B. der Einfluss von der Möglichkeit des Überholens bzw. Vorbeifahrens im Reststau auf die Sättigungsverkehrsstärke systematisch untersucht werden könnte. Im Resultat könnten Anpassungsfaktoren für die Sättigungsverkehrsstärke in Abhängigkeit des Radverkehrsanteils, des Schwerverkehrsanteils und der Fahrstreifenbreite ermittelt werden.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde bei der Auswahl der zu untersuchenden Knotenpunkte auf hohe Radverkehrsstärken geachtet (vgl. hierzu auch Kapitel 6.1). Jedoch war an keinem Knotenpunkt bzw. an keiner Fußgängerfurt die Fußgängerverkehrsstärke so hoch, dass eine Beeinträchtigung des Abflusses bedingt verträglich rechts- und linksabbiegender Radfahrer durch Fußgänger auf der Furt beobachtet werden konnte. Zur Analyse dieser möglichen Beeinträchtigung – und entsprechender Auswirkungen auf den Kfz-Verkehr – sollten empirische Erhebungen bei hohen Radverkehrs- und Fußgängerverkehrsstärken durchgeführt werden.

Für das bedingt verträgliche Linksabbiegen fehlen noch detaillierte Erkenntnisse zur Zeitlückenakzeptanz (Radfahrer durchsetzen Kfz-Strom, Kfz durchsetzen Radverkehrsstrom), die in zukünftigen empirischen Untersuchungen gewonnen werden sollten.

Der Einfluss indirekt linksabbiegender Radfahrer auf den nachfolgenden kreuzenden und/oder einbiegenden Kfz-Verkehrsstrom konnte im Rahmen der empirischen Untersuchungen nicht ausreichend erfasst werden. Ebenso konnten keine Situationen beobachtet werden, in denen die verfügbare Aufstellfläche aufgrund zu vieler Radfahrer praktisch nicht ausgereicht hätte. Für entsprechende empirische Erhebungen müssten gezielt Knotenpunkte ausgewählt werden, bei denen indirektes Linksabbiegen vorgesehen ist und diese Führung auch von einem großen Teil der Radfahrer angenommen wird.

In der vorliegenden Untersuchung wurde nicht hinsichtlich der Art der Fahrräder differenziert. Jedoch wird die Fahrzeugzusammensetzung zunehmend heterogener, sodass der Einfluss unterschiedlicher

Fahrradarten (z. B. Lastenräder und Pedelecs) und anderer Fahrzeuge, welche die Anlagen des Radverkehrs mitnutzen dürfen – hier sind vor allem die seit Kurzem zugelassenen E-Roller zu nennen – auf die Kapazität und die Verkehrsqualität zukünftig untersucht und ggf. in das Berechnungsverfahren nach HBS aufgenommen werden sollte.

## Literatur

- ANGENENDT, W., BLASE, A., KLÖCKNER, D. (2005) 'Verbesserung der Radverkehrsführung an Knoten'.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) (2015) 'Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen', *Verkehrstechnik*. Deutschland, Heft V257, p. 288.
- City of Copenhagen (2012) Micro simulation of cyclists in peak hour traffic. Copenhagen.
- COWI (2013) 'Micro Simulation of Cyclists in Peak Hour Traffic'. Beispielsammlung des Simulationssoftware PTV Vissim 9.
- FALKENBERG, G. et al. (2003) 'Bemessung von Radverkehrsanlagen unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten', *Berichte Der Bundesanstalt Für Strassenwesen. Unterreihe Verkehrstechnik*, (103).
- FERRARA, T. C. (1977) 'A study of two-lane intersections and crossings under combined motor vehicle and bicycle traffic demands.'
- FGSV (2001) Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.).
- FGSV (2005) 'Hinweise zur Signalisierung des Radverkehrs (HSRa)'. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.).
- FGSV (2006a) Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation -Grundlagen und Anwendung-. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.).
- FGSV (2006b) Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt). Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.).
- FGSV (2010) Empfehlungen für Radverkehrsanlagen (ERA). 2010th edn. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.).
- FGSV (2015a) Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.).
- FGSV (2015b) Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA). Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.).
- FIGLIOZZI, M., WHEELER, N. , MONSERE, C. (2013) 'A Methodology to Estimate Bicyclists' Acceleration and Speed Distributions at Signalized Intersections', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2387, pp. 66–75.
- FLEISCHMANN, M. (1983) Dynamischer Breitenbedarf der Radfahrer. Technischen Universität Wien.
- KWIGIZILE, V. et al. (2017) Real Time Bicycle Simulation Study of Bicyclists' Behaviors and their Implication on Safety. Western Michigan University. Transportation Research Center for Livable ....
- MILTNER, T. (2003) 'Verkehrsqualität an vorfahrt-geregelten Innerortsknotenpunkten', *Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum* (27).
- OHM, D. et al. (2010) 'Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen'.
- OPIELA, K. S., KHASNABIS, S., DATTA, T. K. (1980) 'Determination of the characteristics of bicycle traffic at urban intersections', *Transportation Research Record. Transportation Research Board, National Research Council, National Academy ...*, 743, pp. 30–38.
- PARKIN, J., ROTHERAM, J. (2010) 'Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal', *Transport Policy. Elsevier*, 17(5), pp. 335–341. doi: 10.1016/j.tranpol.2010.03.001.
- PETZOLDT, T. et al. (2017) 'Drivers' gap acceptance in front of approaching bicycles—Effects of



bicycle speed and bicycle type', Safety science. Elsevier, 92, pp. 283–289.

PTV AG (2016) PTV Vissim 9 user manual. Karlsruhe: PTV, AG.

TAYLOR, D. B. (1993) 'Analysis of Traffic Signal Clearance Interval Requirements for Bicycle-Automobile Mixed Traffic', Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1405, pp. 13–20.

TWADDLE, H. (2017) Development of tactical and operational behaviour models for bicyclists based on automated video data analysis. Technische Universität München.

TWADDLE, H., GRIGOROPOULOS, G. (2016) 'Modeling the Speed, Acceleration and deceleration of bicyclists for microscopic traffic simulation'.

WIEDEMANN, R. (1974) 'Simulation des Straßenverkehrsflusses', Schriftenreihe des Institutes für Verkehrswesen, 8 (Universität Karlsruhe).

Bild 3-5: Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz (Kartengrundlage: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org))

Bild 3-6: Kameraperspektive Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz

Bild 3-7: Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße (Kartengrundlage: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org))

Bild 3-8: Kameraperspektive Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße

Bild 3-9: Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße (Kartengrundlage: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org))

Bild 3-10: Kameraperspektive Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße

Bild 3-11: Knotenpunkt FR6 Eschholzstraße/Basler Straße/Lörracher Straße (Kartengrundlage: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org))

Bild 3-12: Kameraperspektive Knotenpunkt FR6 Eschholzstraße/Basler Straße/Lörracher Straße

Bild 3-13: Knotenpunkt B3 Karl-Liebknecht-Straße/Spandauer Straße (Kartengrundlage: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org))

Bild 3-14: Kameraperspektive Knotenpunkt B3 Karl-Liebknecht-Straße/Spandauer Straße

Bild 3-15: Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße (Kartengrundlage: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org))

Bild 3-16: Kameraperspektive Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße

Bild 3-17: UTRaCar bei einer Messkampagne am Moritzplatz in Berlin

Bild 3-18: Beobachtungsbereich der stromabwärtigen Richtung von Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße

Bild 3-19: Beobachtungsbereich der stromaufwärtigen Richtung von Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße

Bild 3-20: Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz (Kapuzinerstraße/Tumblingerstraße/Häberlstraße)

Bild 3-21: Mast bei der Videodatenerhebung am

## Bilder

Bild 1-1: Methodische Vorgehensweise und Arbeitsschritte

Bild 2-1: Mögliche Wege für Linksabbieger (Zufahrt mit ARAS)

Bild 2-2: Fallunterscheidungen aus Kombination der Fahrstreifenanzahl mit der Radverkehrsführung und -signalisierung

Bild 2-3: Belegungszeit  $t_{BZ}$  einer Furt in Abhängigkeit von der Anzahl  $P$  der Radfahrer und Fußgänger pro Umlauf gemäß Bild S-4-10 des HBS (FGSV, 2015a)

Bild 3-1: Knotenpunkt M1 Marsstraße/Seidlstraße (Kartengrundlage: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org))

Bild 3-2: Kameraperspektive Knotenpunkt M1 Marsstraße/Seidlstraße

Bild 3-3: Knotenpunkt M2 Arnulfstraße/Seidlstraße (Kartengrundlage: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org))

Bild 3-4: Kameraperspektive Knotenpunkt M2 Arnulfstraße/Seidlstraße

- Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße
- Bild 3-22: Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße
- Bild 3-23: Knotenpunkt FR6 Eschholzstraße – Basler Straße – Lörracher Straße
- Bild 3-24: Prozesskette der Videobildverarbeitung
- Bild 3-25: Beispieltrajektorien in der Draufsicht am Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße
- Bild 3-26: Platzierung von Optischen Schleifen am Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße
- Bild 3-27: Platzierung der AOIs am Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße
- Bild 3-28: Mittlere Beschleunigung in Abhängigkeit der Art der Fahrradführung
- Bild 3-29: Mittlere Beschleunigung in Abhängigkeit des Zufahrtstyps
- Bild 3-30: Mittlere Beschleunigung in Abhängigkeit der Breite des Radwegs/Radfahrstreifens
- Bild 3-31: Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit an Zufahrt Z3 am Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße (N gibt die Stichprobengröße an)
- Bild 3-32: Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit an Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B3 Karl-Liebknecht-Straße/Spandauer Straße
- Bild 3-33: Mittlere Maximale Geschwindigkeit der Radfahrer in Abhängigkeit des Zufahrtstyps
- Bild 3-34: Mittlere Maximale Geschwindigkeit der Radfahrer in Abhängigkeit der Art der Führungsform
- Bild 3-35: Mittlere Maximale Geschwindigkeit der Radfahrer in Abhängigkeit der Breite des Radwegs/Radfahrstreifens
- Bild 3-36: Kumulierte Verteilungsfunktion der mittleren maximalen Geschwindigkeiten an den Knotenpunkten M1, M3, B3 und FR3
- Bild 3-37: Dichte im Stand der Radfahrer am Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz
- Bild 3-38: Aggregierte Dichte im Stand der Radfahrer an unterschiedlichen Zufahrtstypen
- Bild 3-39: Aggregierte Dichte im Stand der Radfahrer bei unterschiedlichen Führungsformen
- Bild 3-40: Aggregierte Dichte im Stand der Radfahrer bei unterschiedlichen Breiten des Radwegs/Radfahrstreifens
- Bild 3-41: Beispiel für das Aufstellverhalten von Radfahrern an Zufahrt Z4 am Knotenpunkt M2 Arnulfstraße/Seidlstraße
- Bild 3-42: Dichte im Stand der Radfahrer an Zufahrt Z1 für ARAS und erweiterten ARAS am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße
- Bild 3-43: Mittlere Zeitbedarfswerte der Radfahrer an Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz
- Bild 3-44: Mittlere Zeitbedarfswerte der Radfahrer bei unterschiedlichen Breiten des Radwegs/Radfahrstreifens
- Bild 3-45: Mittlere Zeitbedarfswerte der Radfahrer bei unterschiedlichen Führungsformen
- Bild 3-46: Zeitbedarfswerte des ersten abfließenden Radfahrers am Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz
- Bild 3-47: Zeitbedarfswerte des ersten abfließenden Radfahrers bei unterschiedlichen Breiten des Radwegs/Radfahrstreifens
- Bild 3-48: Zeitbedarfswerte des ersten abfließenden Radfahrers bei unterschiedlichen Radverkehrsführungsformen
- Bild 3-49: Platzierung der AOIs zur Auswertung der Belegungszeit am Radfahrerfurt am Knotenpunkt M1 Marsstraße/Seidlstraße
- Bild 3-50: Belegungszeiten der Radfahrerfurt in Abhängigkeit der Anzahl der Furt blockierender Radfahrer an Zufahrten vom Typ 1.1 am Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße
- Bild 3-51: Belegungszeiten der Radfahrerfurt in Abhängigkeit der Anzahl der Furt blockierender Radfahrer an Zufahrten vom

- Typ 4.5 an den Knotenpunkten M1 Marsstraße/Seidlstraße und M2 Arnulfstraße/Seidlstraße
- Bild 3-52: Belegungszeiten der Radfahrerfurt in Abhängigkeit der Anzahl der Furt blockierender Radfahrer an Zufahrten vom Typ 5.3 an den Knotenpunkten M1 Marsstraße/Seidlstraße und M2 Arnulfstraße/Seidlstraße
- Bild 3-53: Belegungszeiten je Radfahrer der Radfahrerfurt in Abhängigkeit der Führungsform
- Bild 3-54: Belegungszeiten letzter Radfahrer am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße (ARAS)
- Bild 3-55: Knotenpunkt FR3 Lehner Straße/Eschholzstraße Beispiel 1: Bedingt verträglich linksabbiegender Kfz wird nicht von linksabbiegender Radfahrer behindert
- Bild 3-56: Knotenpunkt FR3 Lehner Straße/Eschholzstraße Beispiel 2: Bedingt verträglich linksabbiegender Kfz wird nicht von linksabbiegender Radfahrer behindert
- Bild 3-57: Knotenpunkt FR3 Lehner Straße/Eschholzstraße Beispiel 3: Bedingt verträglich linksabbiegender Kfz wird nicht von linksabbiegender Radfahrer behindert
- Bild 3-58: Beeinflussung eines links verträglichen Kfz (ID 592) durch ein Kfz (ID 46) Knotenpunkt M4 München Schellingstraße/Luisenstraße
- Bild 3-59: Beeinflussung eines links verträglichen Radfahrers (ID 551) durch ein Kfz (ID 514) Knotenpunkt M4 München Schellingstraße/Luisenstraße
- Bild 3-60: Darstellung des Aufstellverhaltens der Radfahrenden am Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße
- Bild 3-61: Darstellung des Aufstellverhaltens der Radfahrenden am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße
- Bild 3-62: Wegewahl linksabbiegender Radfahrer am Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße (überbreiter Fahrstreifen mit Markierung für Linksabbieger, ARAS, Radfahrstreifen rechts)
- Bild 3-63: Wegewahl linksabbiegender Radfahrer am Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz (Radfahrstreifen für Geradeausfahrer und indirektes Linksabbiegen, dreistreifige Zufahrt mit Radfahrstreifen zwischen erstem und zweitem Fahrstreifen)
- Bild 3-64: Wegewahl linksabbiegender Radfahrer am Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße (einstreifige Zufahrt, Radfahrer werden auf der Fahrbahn geführt)
- Bild 3-65: Wegewahl linksabbiegender Radfahrer am Knotenpunkt M1 Marsstraße/Seidlstraße (Radfahrstreifen für Geradeausfahrer, vierstreifige Zufahrt mit Radfahrstreifen rechts)
- Bild 4-1: Darstellung des Musterknotenpunktes 2
- Bild 4-2: Simulationsmodell des Musterknotenpunktes 2 (PTV Vissim/PTV AG)
- Bild 4-3: Simulationsmodell des Musterknotenpunktes 2 mit Verkehrsteilnehmern (PTV Vissim/PTV AG)
- Bild 4-4: Qualitative Bewertung des Verhaltens der geradeausfahrenden Radfahrer an ARAS in der Simulation (PTV Vissim/PTV AG)
- Bild 4-5: Qualitative Bewertung des Verhaltens der linksabbiegender Radfahrer an ARAS in der Simulation (PTV Vissim/PTV AG)
- Bild 4-6: Qualitative Bewertung des Verhaltens der geradeausfahrenden und indirekt linksabbiegender Radfahrer an Radfahrstreifen in der Simulation (PTV Vissim/PTV AG)
- Bild 4-7: Beschleunigung der Radfahrer in Abhängigkeit der Geschwindigkeit aus der empirischen Untersuchung und Literatur (City of Copenhagen, 2012; TWADDLE & GRIGOROPOULOS, 2016)
- Bild 4-8: Umsetzung der Beschleunigungsfunktion aus den eigenen Beobachtungen sowie den Erkenntnissen aus der Literatur (PTV Vissim/PTV AG)

- Bild 4-9: Kumulative Verteilungsfunktion für die Mittlere Maximale Geschwindigkeit aller beobachteten Radfahrer (60 s, 90 s, 120 s) bei geradeausfahrenden Radfahrern (Musterknotenpunkt 2, Zufahrtstyp 3.2)
- Bild 4-10: Umsetzung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung aus den eigenen Beobachtungen mit Ergänzung von Wunschgeschwindigkeiten bis 30 km/h (entspricht den Erkenntnissen aus der Literatur) (PTV Vissim/PTV AG)
- Bild 4-11: Vergleich der Dichte im Stand am simulierten Knotenpunkt und mit der empirischen Analyse
- Bild 4-12: Vergleich der Mittleren Zeitbedarfswerte am simulierten Knotenpunkt mit der empirischen Analyse
- Bild 4-13: Vergleich der Belegungszeiten am simulierten Knotenpunkt und aus der empirischen Analyse
- Bild 4-14: Wunschgeschwindigkeitsverteilung für den rechtsabbiegenden Kfz-Verkehr (PTV Vissim/PTV AG)
- Bild 4-15: Wunschgeschwindigkeitsverteilung für den linksabbiegenden Kfz-Verkehr (PTV Vissim/PTV AG)
- Bild 4-16: Vergleich von Empirie und Simulation hinsichtlich der mittleren Wartezeiten je Radfahrer von bedingt verträglich rechtsabbiegenden Pkw
- Bild 4-17: Kapazität rechtsabbiegender Kfz bei parallel geradeaus fahrenden Radfahrern
- Bild 4-18: Musterknotenpunkt 5
- Bild 4-19: Kapazität bedingt verträglich linksabbiegender Kfz bei entgegkommendem Kfz- und Radverkehr
- Bild 4-20: Kapazität geradeausfahrender Kfz mit geradeausfahrenden Radfahrern auf ARAS
- Bild 4-21: Kapazität bedingt verträglich links über einen ARAS abbiegender Kfz
- Bild 4-22: Musterknotenpunkt 1
- Bild 4-23: Kapazität des Rechtsabbiegers  $C_{RA}$  ( $t_U = 60$  s, 90 s, 120 s) bei geradeausfahrenden Radfahrern (Musterknotenpunkt 2, Zufahrtstyp 2.1)
- Bild 4-24: Kapazität des Rechtsabbiegers  $C_{RA}$  ( $t_U = 60$  s, 90 s, 120 s) bei geradeausfahrenden Radfahrern (Musterknotenpunkt 2, Zufahrtstyp 3.2)
- Bild 4-25: Kapazität des Rechtsabbiegers  $C_{RA}$  ( $t_U = 60$  s, 90 s) bei geradeausfahrenden Radfahrern (Musterknotenpunkt 5, Zufahrtstyp 5.3)
- Bild 4-26: Kapazitätsunterschied des Rechtsabbiegers  $C_{RA}$  ( $t_U = 60$  s, 90 s) bei geradeausabfließenden Radfahrern für unterschiedliche Zufahrtstypen
- Bild 4-27: Kapazität des Linksabbiegers  $C_{LA}$
- Bild 4-28: Kapazität der geradeausfahrenden Kfz geradeausfahrenden Radfahrern auf ARAS ( $t_U = 60$  s, 90 s, 120 s)
- Bild 4-29: Kapazität des Linksabbiegers  $C_{LA}$  mit ARAS Musterknotenpunkt 2 Zufahrtstyp 3.2 ( $t_U = 60$  s, 90 s, 120 s,  $t_F = 0,5 * t_U$ )
- Bild 5-1: Faktor zur Abminderung der Kapazität des Rechtsabbiegers in Abhängigkeit der Radverkehrsstärke auf der nebenliegenden Furt und dem Freigabezeitanteil für den Kfz-Verkehr
- Bild 5-2: Faktor zur Abminderung der Kapazität des Linksabbiegers beim Durchsetzen des Gegenverkehrs in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Gegenverkehr

## Tabellen

- Tab. 2-1: Studien zur Wunschgeschwindigkeit von Radfahrern – Überblick
- Tab. 2-2: Einfluss der Längsneigung auf die Wunschgeschwindigkeit von Radfahrern
- Tab. 2-3: Einfluss der Art der Radverkehrsanlage auf die Wunschgeschwindigkeit von Radfahrern
- Tab. 2-4: Weitere untersuchte Einflüsse auf die Wunschgeschwindigkeit von Radfahrern
- Tab. 2-5: Studien zum Beschleunigungsverhalten von Radfahrern - Überblick
- Tab. 2-6: Aufstellpositionen geradeausfahrender und rechtsabbiegender Radfahrer bei ARAS (eigene Darstellung nach ANGENENDT et al. (2005))

- Tab. 2-7: Qualitätsstufen für den Radverkehr in Abhängigkeit der maximalen Wartezeit gemäß HBS (2015)
- Tab. 3-1: Untersuchungsknotenpunkte
- Tab. 3-2: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur Knotenpunkt M1 Marsstraße/ Seidlstraße
- Tab. 3-3: Verkehrsstärken KP M1 Marsstraße/ Seidlstraße
- Tab. 3-4: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur Knotenpunkt M2 Arnulfstraße/ Seidlstraße
- Tab. 3-5: Verkehrsstärken Knotenpunkt M2 Arnulfstraße/Seidlstraße
- Tab. 3-6: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz
- Tab. 3-7: Verkehrsstärken Knotenpunkt M3 Kapuzinerplatz
- Tab. 3-8: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur am Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße
- Tab. 3-9: Verkehrsstärken Knotenpunkt M4 Schellingstraße/Luisenstraße
- Tab. 3-10: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße
- Tab. 3-11: Abmessungen der ARAS Knotenpunkt FR3 Lehener Straße/Eschholzstraße
- Tab. 3-12: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur Knotenpunkt FR6 Eschholzstraße/Basler Straße/Lörracher Straße
- Tab. 3-13: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur der erhobenen Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B3 Karl-Liebknecht-Straße/Spandauer Straße
- Tab. 3-14: Verkehrsstärken Knotenpunkt B3 Karl-Liebknecht-Straße/Spandauer Straße
- Tab. 3-15: Abmessungen der Radverkehrsinfrastruktur der erhobenen Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße
- Tab. 3-16: Abmessungen der ARAS der erhobenen Zufahrt Z1 am Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße
- Tab. 3-17: Verkehrsstärken Knotenpunkt B4 Oranienburger Straße/Friedrichstraße
- Tab. 3-18: Erhebungszeiten
- Tab. 4-1: Ergebnisse der Kalibrierung für den Kfz-Verkehr
- Tab. 4-2: Simulationsszenarien
- Tab. 5-1: Anpassungsfaktoren zur Berücksichtigung der Breite des Radwegs bzw. Radfahrstreifens

## Anhang

### Anhang 1: Videobasierte Verkehrserhebung

In diesem Abschnitt wird die videobasierte Erzeugung von Weg-Zeit-Verläufen, d. h. Trajektorien, der Verkehrsteilnehmer detaillierter auf der Grundlage von Bild 1 erläutert (siehe auch Bild 3-24 im Hauptteil des Zwischenberichts). Darüber hinaus werden insbesondere die Unterschiede zwischen den Erhebungsmethoden der Konsortialpartner DLR und TU München vorgestellt.

#### Schritt 1 – Kamerakalibrierung

Eine kalibrierte Kamera ist die Grundvoraussetzung für die Erhebung verkehrstechnischer Kenngrößen aus videobasiertem Rohmaterial. Demzufolge beinhaltet die Kamerakalibrierung die Schritte „Bestimmung der Inneren Orientierung“ und „Bestimmung der Äußeren Orientierung“. Der erste Schritt dient im Wesentlichen der Modellierung der optischen Kameraparameter und der Imperfektion der verwendeten Objektivs. Die Bestimmung der Äußeren Orientierung dient der Quantifizierung der Transformation der 2D-Bildebene (Pixel) in die 3D-Weltkoordinatenebene, um jedem 2D-Bildpixel einen 3D-Ort im metrischen System (z. B. UTM-System) zuweisen zu können. In der Praxis erfolgt das beispielsweise auf der Grundlage von georeferenzierten Orthophotos, die mit den Bildern des Erhebungsvideos gemappt werden. Dieser Vorgang wird in der Fachliteratur als Bündelblockausgleich bezeichnet.

#### Schritt 2 – Objekterkennung und -klassifizierung / Merkmalerkennung

An dieser Stelle wird zwischen Objekt- und Merkmalerkennung unterschieden. Die Merkmalerkennung dient der Bestimmung von Merkmalen von Objekten. Als Merkmale können Farben, aber auch Ecken, Kanten und auch andere Merkmale dienen. Beispielsweise weisen Fahrzeuge meist klare Ab-

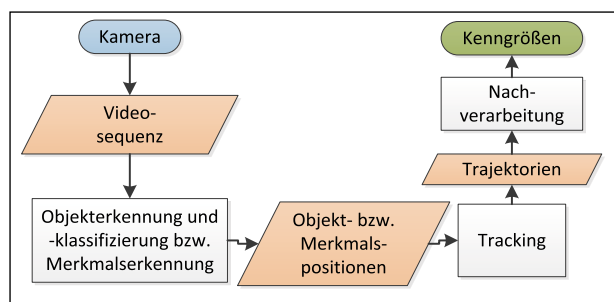


Bild 1: Prozesskette der Videobildverarbeitung

grenzungen durch Kanten und Ecken auf, die es klar von seiner Umgebung (dem Bildhintergrund) trennt. Als Konsequenz besteht ein Objekt aus mehreren Merkmalen, die durch geeignete Methoden zu einem Objekt zusammengefügt werden müssen. Dienlich können beispielsweise die Geschwindigkeitsvektoren der Merkmale dienen, die sich bei einem Objekt zumeist gleich verhalten. Diese Form der Merkmalsgruppierung wird von der TU München verfolgt. Dazu wird die freie Software Traffic Intelligence verwendet.

Alternativ können Objekte durch geeignete Methoden der Künstlichen Intelligenz in Einzelbildern direkt erkannt und klassifiziert werden. Das geschieht in der Praxis beispielsweise mit speziell für solche Zwecke trainierten Neuronalen Netzen. Das DLR verwendet in einer eigenen Entwicklung ein sogenanntes „Faltendes Neuronales Netz“ (convolutional neuronal network – CNN).

In Bild 2 ist das Ergebnis der Anwendung eines CNNs zur Objekterkennung am Beispiel des Knotenpunkts Oranienburger Straße / Friedrichstraße, Berlin, dargestellt. Die Objektboxen enthalten Nummern, die die eindeutigen Identitäten der jeweiligen Objekte kennzeichnen.

#### Schritt 3 – Tracking

Nachdem Objekte in Einzelbildern des Videos erkannt und klassifiziert bzw. bestimmte Objektmerkmale vorliegen und deren Positionen bekannt sind, kommen in der Praxis üblicherweise Assoziationsverfahren, Adaptive Filter oder auch andere Verfahren zur Anwendung, um diesen Objekten oder Merkmalen den dem Video zugrundeliegenden Zeitverlauf zuzuordnen. Das bezeichnet man als Tracking, sodass Orts-Zeit-Verläufe entstehen, die auch Trajektorien genannt werden.

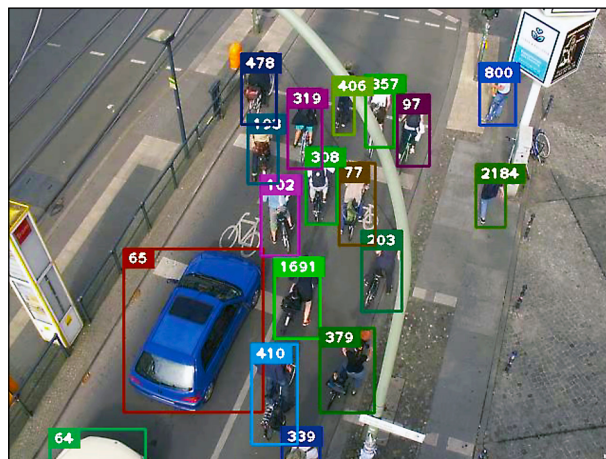


Bild 2: Beispiel für Objekterkennung mit einem CNN

Im Ansatz der TU München ermöglicht das Tool Traffic Intelligence das Tracking einzelner Merkmale, wobei gleichartig bewegte und räumlich begrenzte Merkmale dann einem Objekt zugeordnet werden. Mit Traffic Intelligence können also Objektpositions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren bestimmt werden.

Die Bestimmung von Trajektorien der in den Videosequenzen vorhandenen Verkehrsteilnehmer erfolgt im Ansatz des DLR mithilfe eines adaptiven Filters. Hierbei kam das sogenannte Unscented Kalman Filter (UKF) zum Einsatz, das es ermöglichte, aus gemessenen Objektpositionen die kinematischen Kenngrößen (Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung) der Verkehrsteilnehmer anhand zugrundeliegender normalverteilter Prozess- und Messrauschkenngößen zu modellieren und zu quantifizieren. Im Ergebnis liegt zu jedem Objekt genau je ein Vektor an Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen über die Zeit der Existenz des Objektes vor.

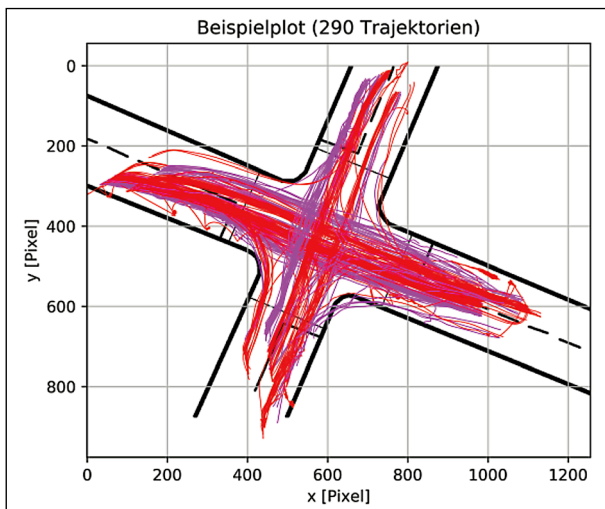


Bild 3: Beispiel für die Erzeugung von Trajektorien mithilfe eines UKF

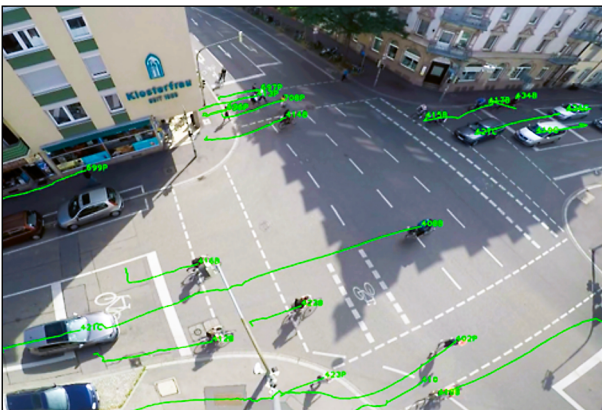


Bild 4: Beispiel für die Erzeugung von Trajektorien mithilfe von Traffic Intelligence

Die Bestimmung der Trajektorien der Objekte sind in beiden Ansätzen von TU München und DLR äquivalent. In Bild 3 ist ein Beispiel für das Ergebnis der Anwendung eines UKF zur Erzeugung von Trajektorien am Knotenpunkt Schellingstraße / Luisenstraße, München, dargestellt. In Bild 4 ist ein Beispiel für die Erzeugung von Trajektorien mithilfe von Traffic Intelligence dargestellt.

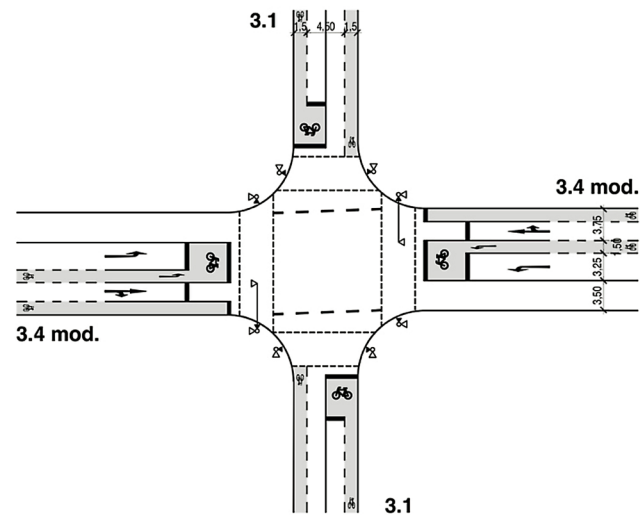
#### Schritt 4 – Qualitätsprüfung und manuelle Nachbearbeitung

Folgende Herausforderungen erfordern die Anwendung komplexerer Methoden der digitalen Bildverarbeitung und teilweise auch eine manuelle Korrektur der erzeugten Trajektorien:

- Durch Verdeckungen von Objekten durch stationäre Objekte wie Lichtmasten oder Beschilderungen (siehe Bild 2) können Trajektorien abreißen oder beginnen von neuem. Das kann zu fehlerhaften anzahl- bzw. zeitbehafteten Kenngrößen führen.
- Durch Anwendung von CNNs zur Objekterkennung und -klassifikation wurden alle Objekte in jedem Einzelbild detektiert und klassifiziert. Je nach Ausleuchtung der Szene und Grad der Verdeckungen kann sich die Größe der Objektboxen (siehe Bild 2) von Bild zu Bild ändern. Das kann zu fehlerhaften Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufen führen.
- Sind zwei Objekte sehr eng räumlich benachbart, kann es durch Überlappungen der Objektboxen zu Identitätswechseln der Objekte kommen. Das kann dazu führen, dass ein Objekt einen Knotenpunkt scheinbar mehrfach befährt.
- Verkehrsteilnehmer werden falsch klassifiziert.
- Verkehrsteilnehmer werden von mehreren Trajektorien charakterisiert.
- Falsch-positive Verkehrsteilnehmer wurden aufgrund der Bewegung des Mastes bei der Erhebung (z. B. durch Windeinfluss) erzeugt.

## Anhang 2: Musterknotenpunkte

## Musterknotenpunkt 1



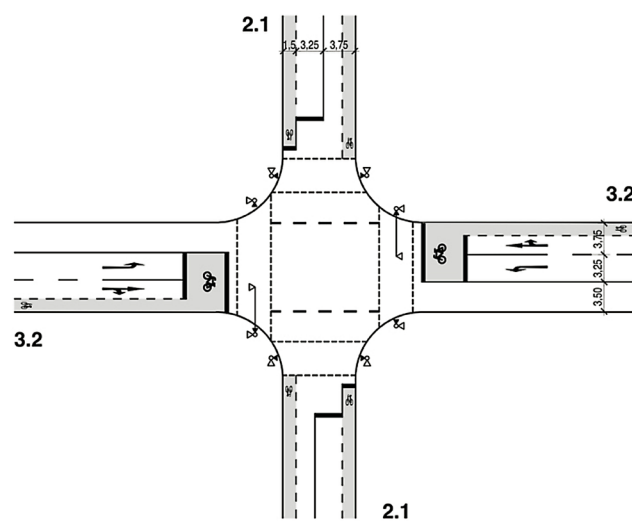
Verkehrsablauf an LSA mit hohem  
Radverkehrsaufkommen

**Musterknotenpunkt (2/2)**  
mit unterschiedlichen Zufahrtstypen, 3.4/3.1

M. 1:500, Stand: Mai 2018



## Musterknotenpunkt 2



Verkehrsablauf an LSA mit hohem  
Radverkehrsaufkommen

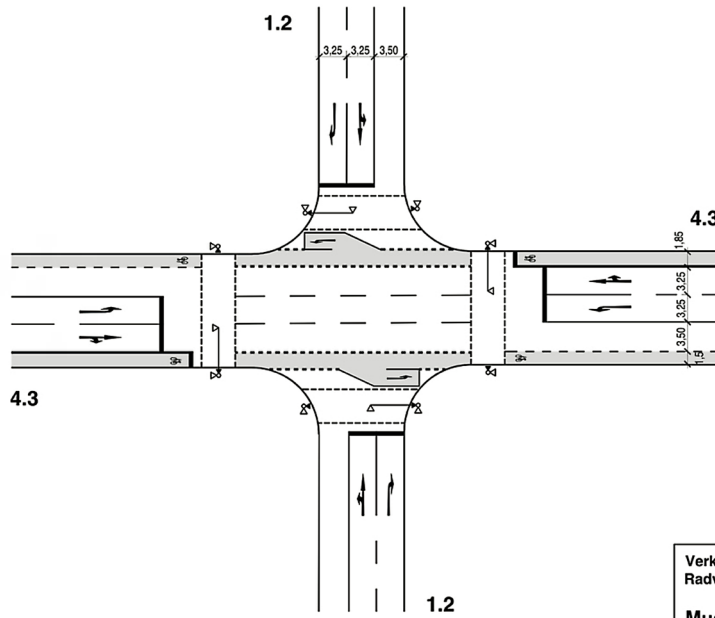
**Musterknotenpunkt (2/2)**  
mit unterschiedlichen Zufahrtstypen, 3.2/2.1

M. 1:500, Stand: Mai 2018





**Musterknotenpunkt 3**



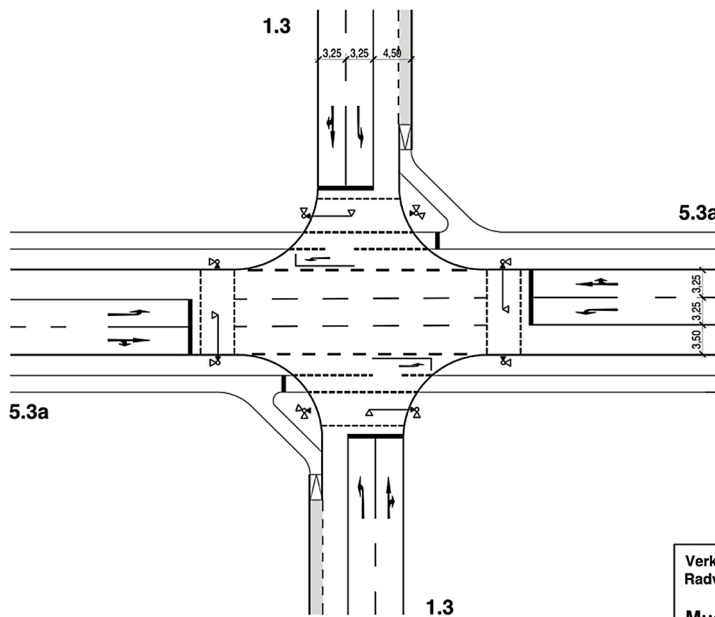
Verkehrsablauf an LSA mit hohem  
Radverkehrsaufkommen

**Musterknotenpunkt (4/2)**  
mit unterschiedlichen Zufahrtstypen, 4.3/1.2

M. 1:500, Stand: Mai 2018



**Musterknotenpunkt 4**



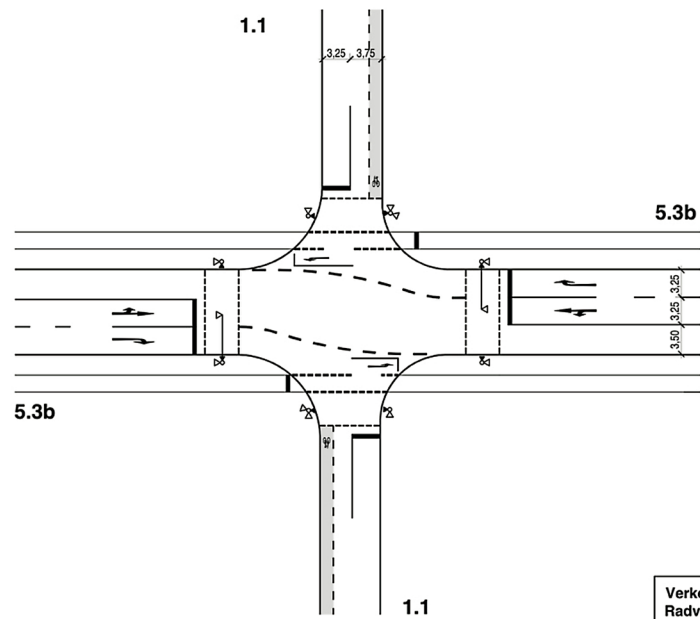
Verkehrsablauf an LSA mit hohem  
Radverkehrsaufkommen

**Musterknotenpunkt (4/2)**  
mit unterschiedlichen Zufahrtstypen, 5.3a/1.3

M. 1:500, Stand: Mai 2018



### Musterknotenpunkt 5



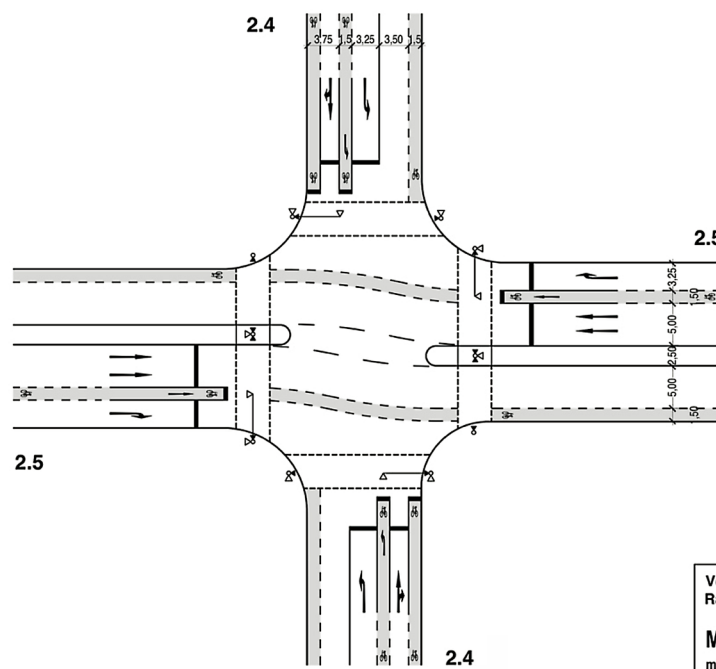
Verkehrsablauf an LSA mit hohem  
Radverkehrsaufkommen

**Musterknotenpunkt (4/2)**  
mit unterschiedlichen Zufahrtstypen, 5.3b/1.1

M. 1:500, Stand: Mai 2018



### Musterknotenpunkt 6



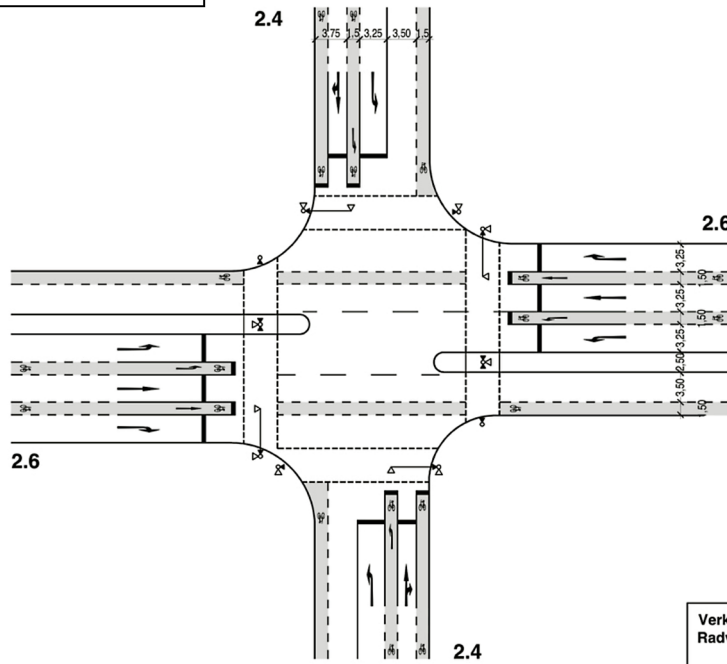
Verkehrsablauf an LSA mit hohem  
Radverkehrsaufkommen

**Musterknotenpunkt (4/2)**  
mit unterschiedlichen Zufahrtstypen, 2.5/2.4

M. 1:500, Stand: Mai 2018



### Musterknotenpunkt 7



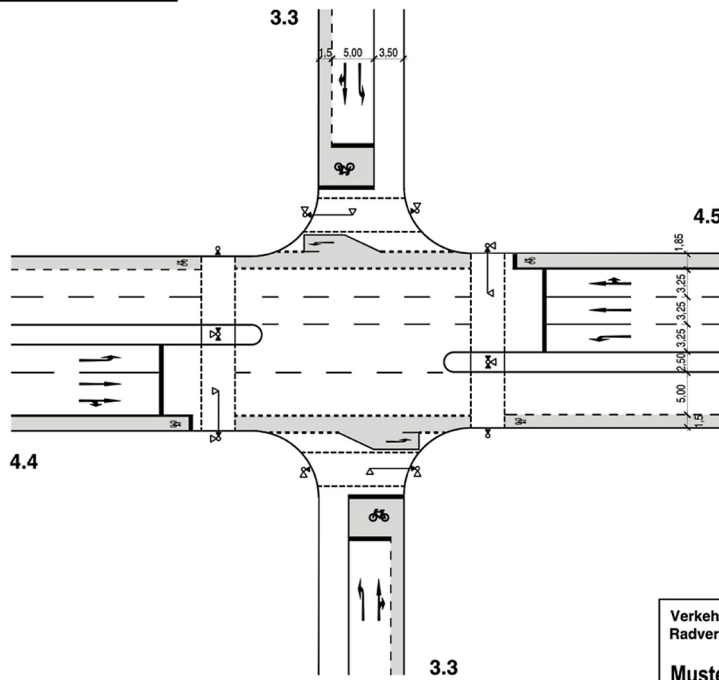
Verkehrsablauf an LSA mit hohem Radverkehrsaufkommen

Musterknotenpunkt (4/2)  
mit unterschiedlichen Zufahrtstypen, 2.6/2.4

M. 1:500, Stand: Juni 2018



### Musterknotenpunkt 8



Verkehrsablauf an LSA mit hohem Radverkehrsaufkommen

Musterknotenpunkt (4/4)  
mit unterschiedlichen Zufahrtstypen, 4.4/4.5/3.3

M. 1:500, Stand: Mai 2018



### Anhang 3: Fahrverhaltensparameter PTV Vissim

#### Überblick

Fahrsituation	Fahrverhalten Kfz	Fahrverhalten Rad
nur Kfz (kein Mischverkehr)	Kfz	-
Mischverkehr	Kfz	Rad (Mischverkehr, rechts)
Schutzstreifen, Radfahrstreifen	-	50 % Rad (Mitte), 50 % Rad (beliebig)
Radweg	-	Rad (beliebig)
ARAS	Kfz	Rad (ARAS)

#### Fahrverhalten „Kfz“

**Fahrverhalten** (Nr.: 10000, Name: Kfz)

Tab: Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Vorausschauweite: min.: 0.00 m, max.: 250.00 m

Zurückschauweite: min.: 0.00 m, max.: 150.00 m

Vorübergehende Unaufmerksamkeit: Dauer: 0 s, Wahrscheinlichkeit: 0.00 %

Gleichmäßiges Aufrückverhalten

Stillstandsabstand für statische Hindernisse: 0.50 m

Fahrzeugfolgenmodell: Wiedemann 74

Modellparameter: Mittlerer Stillstandsabstand: 2.50 m, additiver Einfluss Sicherheitsabstand: 2.55, multiplik. Einfluss Sicherheitsabstand: 1.55

Buttons: OK, Abbrechen

**Fahrverhalten** (Nr.: 10000, Name: Kfz)

Tab: Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Grundverhalten: Freie Fahrstreifenwahl

Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route): eigene, Folgefahrzeug

Maximale Verzögerung: eigene: -4.00 m/s<sup>2</sup>, Folgefahrzeug: -3.00 m/s<sup>2</sup>

- 1 m/s<sup>2</sup> pro Entfernung: 100.00 m

Akzeptierte Verzögerung: eigene: -1.00 m/s<sup>2</sup>, Folgefahrzeug: -1.00 m/s<sup>2</sup>

Wartezeit bis zur Diffusion: 60.00 s  Langsamfahrbereiche überbrücken

Min. Nettoweglücke (vorne/hinten): 0.50 m  Intelligentes Einfädeln

Auf langsameren Fahrstreifen wenn Kollisionszeit mind.: 11.00 s  Nach Routenentscheidung stromabwärts von Routenend suchen

Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand: 0.60

Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen: -3.00 m/s<sup>2</sup>

Kooperativer Fahrstreifenwechsel

Max. Geschwindigkeitsdifferenz: 10.80 km/h

Max. Kollisionszeit: 10.00 s

Querkorrektur der Hinterkante

Maximale Geschwindigkeit: 3.00 km/h

aktiv während der Zeit von 1.00 s bis 10.00 s nach Beginn des Fahrstreifenwechsels

Buttons: OK, Abbrechen

**Fahrverhalten** (Nr.: 10000, Name: Kfz)

Tab: Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Wunschposition bei freier Fahrt: Fahrstreifenmitte

Seitenabstand zu Fahrzeugen auf Nachbarfahrstreifen halten

Versetztes Aufstellen

Nächste Abbiegerichtung berücksichtigen

Kollisionszeitgewinn: 2.00 s

Min. Längs-Geschwindigkeit: 3.60 km/h

Zeit zwischen Richtungswechseln: 0 s

Standardverhalten beim Überholen auf dem gleichen Fahrstreifen oder Nachbar-Fahrstreifen

Auf gleichem Fahrstreifen überholen: Mindestseitenabstand

links: Abstand im Stand: 0.20 m bei 0 km/h

rechts: Abstand beim Fahren: 1.00 m bei 50 km/h

Ausnahmen beim Überholen von Fahrzeugen der folgenden Fahrzeugklassen

Anz	FzKlasse	l b hl	l b hr	MinSeitAbstStillst	MinSeitAbstFahr
1	60: Zweirad	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.20	1.00

Buttons: OK, Abbrechen

**Fahrverhalten** (Nr.: 10000, Name: Kfz)

Tab: Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Reaktion nach Grünende

Gelbverhalten: Einmalige Entscheidung

Wahrscheinlichkeitsfaktoren: Alpha: 4.00, Beta 1: -0.36, Beta 2: 0.70

Reaktion nach Rotende

Rotgelb-Verhalten: Warten (wie bei rot)

Reaktionszeitverteilung:

Reduzierter Sicherheitsabstand nahe einer Haltlinie

Faktor: 0.60

Beginn stromaufwärts der Haltlinie: 100.00 m

Ende stromabwärts der Haltlinie: 100.00 m

Buttons: OK, Abbrechen

### Rad (Mischverkehr, rechts)

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20001 Name: Rad (Mischverkehr, rechts)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Vorausschauweite  
min.: 20.00 m  
max.: 250.00 m  
10 Vorderfahrzeuge

Zurückschauweite  
min.: 20.00 m  
max.: 150.00 m

Vorübergehende Unaufmerksamkeit  
Dauer: 0 s  
Wahrscheinlichkeit: 0.00 %

Gleichmäßiges Aufrückverhalten  
 Stillstandsabstand für statische Hindernisse: 0.50 m

Fahrzeugfolgmodell  
Wiedemann 99

Modellparameter  
CC0 (Stillstandsabstand): 0.50 m  
CC1 (Folgeabstand): 1: 0.5 s  
CC2 (Längs-Oszillation): 2.00 m  
CC3 (Wahrnehmungsschwelle für Folgen): -20.00  
CC4 (neg. Geschwindigkeitsdifferenz): -0.25  
CC5 (pos. Geschwindigkeitsdifferenz): 0.25  
CC6 (Einfluss Geschwindigkeit auf Oszillation): 1.00  
CC7 (Beschleunigung bei Oszillation): 0.20 m/s<sup>2</sup>  
CC8 (Beschleunigung aus Stillstand): 1.80 m/s<sup>2</sup>  
CC9 (Beschleunigung bei 80 km/h): 0.01 m/s<sup>2</sup>

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20001 Name: Rad (Mischverkehr, rechts)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Grundverhalten: Rechtsfahrgebot

Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route)

	eigene	Folgefahrgew
Maximale Verzögerung:	-4.00 m/s <sup>2</sup>	-3.00 m/s <sup>2</sup>
- 1 m/s <sup>2</sup> pro Entfernung:	100.00 m	100.00 m
Akzeptierte Verzögerung:	-1.00 m/s <sup>2</sup>	-1.00 m/s <sup>2</sup>

Wartezeit bis zur Diffusion: 60.00 s  Langsamfahrbereiche überbr  
Min. Nettoweglücke (vorne/hinten): 0.50 m  Intelligentes Einfädeln  
Auf langsameren Fahrstreifen wenn Kollisionszeit mind. 11.00 s  Nach Routenentscheidung stromabwärts von Routenend suchen  
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand: 0.60  
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen: -3.00 m/s<sup>2</sup>

Kooperativer Fahrstreifenwechsel  
Max. Geschwindigkeitsdifferenz: 10.80 km/h  
Max. Kollisionszeit: 10.00 s

Querkorrektur der Hinterkante  
Maximale Geschwindigkeit: 3.00 km/h  
aktiv während der Zeit von 1.00 s bis 10.00 s nach Beginn des Fahrstreifenwechsels

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20001 Name: Rad (Mischverkehr, rechts)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Wunschposition bei freier Fahrt: Fahrstreifenmitte

Seitenabstand zu Fahrzeugen auf Nachbarfahrstreifen halten  
 Versetztes Aufstellen  
 Nächste Abbiegerichtung berücksichtigen

Kollisionszeitgewinn: 0 s  
Min. Längs-Geschwindigkeit: 0.00 km/h  
Zeit zwischen Richtungswechseln: 0 s

Standardverhalten beim Überholen auf dem gleichen Fahrstreifen oder Nachbar-Fahrstreifen  
Auf gleichem Fahrstreifen überholen Mindestseitenabstand  
 links Abstand im Stand: 0.10 m bei 0 km/h  
 rechts Abstand beim Fahren: 0.30 m bei 50 km/h

Ausnahmen beim Überholen von Fahrzeugen der folgenden Fahrzeugklassen

Anz	FzKlasse	ÜbhL	ÜbhR	MinSeitAbstStillst	MinSeitAbstFahr
1	10: Pkw	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.10	0.30
2	60: Zweirad	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.30	0.80
3	61: Zweirad	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.30	0.80

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20001 Name: Rad (Mischverkehr, rechts)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Reaktion nach Grünende  
Gelbverhalten: Kontinuierliche Prüfung  
Wahrscheinlichkeitsfaktoren: Alpha: 1.59  
Beta 1: -0.26  
Beta 2: 0.27

Reaktion nach Rotende  
Rotgelb-Verhalten: Fahren (wie bei grün)  
Reaktionszeitverteilung:

Reduzierter Sicherheitsabstand nahe einer Haltlinie  
Faktor: 0.80  
Beginn stromaufwärts der Haltlinie: 100.00 m  
Ende stromabwärts der Haltlinie: 100.00 m

OK Abbrechen

## Rad (Mitte)

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20002 Name: Rad (Mitte)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Vorausschauweite  
min.: 20.00 m  
max.: 250.00 m  
10 Vorderfahrzeuge

Zurückschauweite  
min.: 20.00 m  
max.: 150.00 m

Vorübergehende Unaufmerksamkeit  
Dauer: 0 s  
Wahrscheinlichkeit: 0.00 %

Gleichmäßiges Aufrückverhalten  
 Stillstandsabstand für statische Hindernisse: 0.50 m

Fahrzeugfolgemodell  
Wiedemann 99

Modellparameter  
CC0 (Stillstandsabstand): 0.80 m  
CC1 (Folgeabstand): 1: 0.5 s  
CC2 (Längs-Oszillation): 2.00 m  
CC3 (Wahrnehmungsschwelle für Folgen): -20.00  
CC4 (neg. Geschwindigkeitsdifferenz): -0.25  
CC5 (pos. Geschwindigkeitsdifferenz): 0.25  
CC6 (Einfluss Geschwindigkeit auf Oszillation): 1.00  
CC7 (Beschleunigung bei Oszillation): 0.20 m/s<sup>2</sup>  
CC8 (Beschleunigung aus Stillstand): 1.80 m/s<sup>2</sup>  
CC9 (Beschleunigung bei 80 km/h): 0.01 m/s<sup>2</sup>

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20002 Name: Rad (Mitte)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Grundverhalten: Rechtsfahrgebot

Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route)

	eigene	Folgefahrzeug
Maximale Verzögerung:	-4.00 m/s <sup>2</sup>	-3.00 m/s <sup>2</sup>
- 1 m/s <sup>2</sup> pro Entfernung:	100.00 m	100.00 m
Akzeptierte Verzögerung:	-1.00 m/s <sup>2</sup>	-1.00 m/s <sup>2</sup>

Wartezeit bis zur Diffusion: 60.00 s  Langsamfahrbereiche überh  
Min. Nettoweglücke (vorne/hinten): 0.50 m  Intelligentes Einfädeln  
Auf langsameren Fahrstreifen wenn Kollisionszeit mind.: 11.00 s  Nach Routenentscheidung stromabwärts von Routenend suchen  
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand: 0.60  
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen: -3.00 m/s<sup>2</sup>

Kooperativer Fahrstreifenwechsel  
Max. Geschwindigkeitsdifferenz: 10.80 km/h  
Max. Kollisionszeit: 10.00 s

Querkorrektur der Hinterkante  
Maximale Geschwindigkeit: 3.00 km/h  
aktiv während der Zeit von 1.00 s bis 10.00 s nach Beginn des Fahrstreifenwechsels

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20002 Name: Rad (Mitte)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Wunschposition bei freier Fahrt: Fahrstreifenmitte

Seitenabstand zu Fahrzeugen auf Nachbarfahrstreifen halten  
 Versetztes Aufstellen  
 Nächste Abbiegerichtung berücksichtigen  
Kollisionszeitgewinn: 0 s  
Min. Längs-Geschwindigkeit: 0.00 km/h  
Zeit zwischen Richtungswechseln: 0 s

Standardverhalten beim Überholen auf dem gleichen Fahrstreifen oder Nachbar-Fahrstreifen  
Auf gleichem Fahrstreifen überholen Mindestseitenabstand  
 links Abstand im Stand: 0.10 m bei 0 km/h  
 rechts Abstand beim Fahren: 0.30 m bei 50 km/h

Ausnahmen beim Überholen von Fahrzeugen der folgenden Fahrzeugklassen

Anz.	FzKlasse	ÜbhL	ÜbhR	MinSeitAbstStillst	MinSeitAbstFahr

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20002 Name: Rad (Mitte)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Reaktion nach Grüne

Gelbverhalten: Kontinuierliche Prüfung

Wahrscheinlichkeitsfaktoren: Alpha: 1.59  
Beta 1: -0.26  
Beta 2: 0.27

Reaktion nach Rotende  
Rotgelb-Verhalten: Fahren (wie bei grün)  
Reaktionszeitverteilung:

Reduzierter Sicherheitsabstand nahe einer Haltlinie  
Faktor: 0.80  
Beginn stromaufwärts der Haltlinie: 100.00 m  
Ende stromabwärts der Haltlinie: 100.00 m

OK Abbrechen

### Rad (Beliebig)

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20003 Name: Rad (Beliebig)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Vorausschauweite  
min.: 20.00 m  
max.: 250.00 m  
10 Vorderfahrzeuge

Zurückschauweite  
min.: 20.00 m  
max.: 150.00 m

Vorübergehende Unaufmerksamkeit  
Dauer: 0 s  
Wahrscheinlichkeit: 0.00 %

Gleichmäßiges Aufrückverhalten  
 Stillstandsabstand für statische Hindernisse: 0.50 m

Fahrzeugfolgemodell  
Wiedemann 99

Modellparameter  
CC0 (Stillstandsabstand): 0.80 m  
CC1 (Folgeabstand): 1: 0.5 s  
CC2 (Längs-Oszillation): 2.00 m  
CC3 (Wahrnehmungsschwelle für Folgen): -20.00  
CC4 (neg. Geschwindigkeitsdifferenz): -0.25  
CC5 (pos. Geschwindigkeitsdifferenz): 0.25  
CC6 (Einfluss Geschwindigkeit auf Oszillation): 1.00  
CC7 (Beschleunigung bei Oszillation): 0.20 m/s<sup>2</sup>  
CC8 (Beschleunigung aus Stillstand): 1.80 m/s<sup>2</sup>  
CC9 (Beschleunigung bei 80 km/h): 0.01 m/s<sup>2</sup>

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20003 Name: Rad (Beliebig)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Grundverhalten: Rechtsfahrgebot

Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route)

	eigene	Folgefahrzeug
Maximale Verzögerung:	-4.00 m/s <sup>2</sup>	-3.00 m/s <sup>2</sup>
- 1 m/s <sup>2</sup> pro Entfernung:	100.00 m	100.00 m
Akzeptierte Verzögerung:	-1.00 m/s <sup>2</sup>	-1.00 m/s <sup>2</sup>

Wartezeit bis zur Diffusion: 60.00 s  Langsamfahrbereiche überfliegen  
Min. Nettoweglücke (vorne/hinten): 0.50 m  Intelligentes Einfädeln  
Auf langsameren Fahrstreifen wenn Kollisionszeit mind.: 11.00 s  Nach Routenentscheidung  
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand: 0.60  stromabwärts von Routenend suchen

Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen: -3.00 m/s<sup>2</sup>

Kooperativer Fahrstreifenwechsel  
Max. Geschwindigkeitsdifferenz: 10.80 km/h  
Max. Kollisionszeit: 10.00 s

Querkorrektur der Hinterkante  
Maximale Geschwindigkeit: 3.00 km/h  
aktiv während der Zeit von 1.00 s bis 10.00 s nach Beginn des Fahrstreifenwechsels

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20003 Name: Rad (Beliebig)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Wunschposition bei freier Fahrt: Beliebig

Seitenabstand zu Fahrzeugen auf Nachbarfahrstreifen halten  
 Versetztes Aufstellen  
 Nächste Abbiegerichtung berücksichtigen

Kollisionszeitgewinn: 0 s  
Min. Längs-Geschwindigkeit: 0.00 km/h  
Zeit zwischen Richtungswechseln: 0 s

Standardverhalten beim Überholen auf dem gleichen Fahrstreifen oder Nachbar-Fahrstreifen

Auf gleichem Fahrstreifen überholen Mindestseitenabstand

links Abstand im Stand: 0.10 m bei 0 km/h  
 rechts Abstand beim Fahren: 0.20 m bei 50 km/h

Ausnahmen beim Überholen von Fahrzeugen der folgenden Fahrzeugklassen

Anz.	FzKlasse	ÜbhL	ÜbhR	MinSeitAbstStillst	MinSeitAbstFahr

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20003 Name: Rad (Beliebig)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Reaktion nach Grünende  
Gelbverhalten: Kontinuierliche Prüfung

Wahrscheinlichkeitsfaktoren: Alpha: 1.59  
Beta 1: -0.26  
Beta 2: 0.27

Reaktion nach Rotende  
Rotgelb-Verhalten: Fahren (wie bei grün)  
Reaktionszeitverteilung:

Reduzierter Sicherheitsabstand nahe einer Haltlinie  
Faktor: 0.80  
Beginn stromaufwärts der Haltlinie: 100.00 m  
Ende stromabwärts der Haltlinie: 100.00 m

OK Abbrechen

## Rad (ARAS)

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20004 Name: Rad (ARAS)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Vorausschauweite  
min.: 20.00 m  
max.: 250.00 m  
10 Vorderfahrzeuge

Zurückschauweite  
min.: 20.00 m  
max.: 150.00 m

Vorübergehende Unaufmerksamkeit  
Dauer: 0 s  
Wahrscheinlichkeit: 0.00 %

Gleichmäßiges Aufrückverhalten  
 Stillstandsabstand für statische Hindernisse: 0.00 m

Fahrzeugfolgemodell  
Wiedemann 99

Modellparameter  
CC0 (Stillstandsabstand): 0.40 m  
CC1 (Folgeabstand): 1: 0.5 s  
CC2 (Längs-Oszillation): 2.00 m  
CC3 (Wahrnehmungsschwelle für Folgen): -20.00  
CC4 (neg. Geschwindigkeitsdifferenz): -0.25  
CC5 (pos. Geschwindigkeitsdifferenz): 0.25  
CC6 (Einfluss Geschwindigkeit auf Oszillation): 1.00  
CC7 (Beschleunigung bei Oszillation): 0.20 m/s<sup>2</sup>  
CC8 (Beschleunigung aus Stillstand): 1.80 m/s<sup>2</sup>  
CC9 (Beschleunigung bei 80 km/h): 0.01 m/s<sup>2</sup>

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20004 Name: Rad (ARAS)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Grundverhalten: Rechtsfahrgebot

Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route)  
eigene | Folgefahzeug

Maximale Verzögerung: -4.00 m/s<sup>2</sup> | -3.00 m/s<sup>2</sup>  
- 1 m/s<sup>2</sup> pro Entfernung: 100.00 m | 100.00 m  
Akzeptierte Verzögerung: -1.00 m/s<sup>2</sup> | -1.00 m/s<sup>2</sup>

Wartezeit bis zur Diffusion: 60.00 s  Langsamfahrbereiche überh  
Min. Nettoweglücke (vorne/hinten): 0.50 m  Intelligentes Einfädeln  
Auf langsameren Fahrstreifen wenn Kollisionszeit mind.: 11.00 s  Nach Routenentscheidung  
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand: 0.60  stromabwärts von Routenend  
suchen  
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen: -3.00 m/s<sup>2</sup>

Kooperativer Fahrstreifenwechsel  
Max. Geschwindigkeitsdifferenz: 10.80 km/h  
Max. Kollisionszeit: 10.00 s

Querkorrektur der Hinterkante  
Maximale Geschwindigkeit: 3.00 km/h  
aktiv während der Zeit von 1.00 s bis 10.00 s nach Beginn des Fahrstreifenwechsels

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20004 Name: Rad (ARAS)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Wunschposition bei freier Fahrt: Rechts

Seitenabstand zu Fahrzeugen auf Nachbarfahrstreifen halten  
 Versetztes Aufstellen  
 Nächste Abbiegerichtung berücksichtigen  
Kollisionszeitgewinn: 0 s  
Min. Längs-Geschwindigkeit: 0.00 km/h  
Zeit zwischen Richtungswechseln: 0 s

Standardverhalten beim Überholen auf dem gleichen Fahrstreifen oder Nachbar-Fahrstreifen  
Auf gleichem Fahrstreifen überholen Mindestseitenabstand  
 links Abstand im Stand: 0.20 m bei 0 km/h  
 rechts Abstand beim Fahren: 0.20 m bei 50 km/h

Ausnahmen beim Überholen von Fahrzeugen der folgenden Fahrzeugklassen

Anz.	FzKlasse	ÜbhL	ÜbhR	MinSeitAbstStillst	MinSeitAbstFahr

OK Abbrechen

**Fahrverhalten** ? x

Nr.: 20004 Name: Rad (ARAS)

Folgeverhalten | Fahrstreifenwechsel | Querverhalten | LSA-Steuerung | Meso

Reaktion nach Grüne

Gelbverhalten: Kontinuierliche Prüfung

Wahrscheinlichkeitsfaktoren: Alpha: 1.59  
Beta 1: -0.26  
Beta 2: 0.27

Reaktion nach Rotende  
Rotgelb-Verhalten: Fahren (wie bei grün)  
Reaktionszeitverteilung:

Reduzierter Sicherheitsabstand nahe einer Haltlinie  
Faktor: 0.60  
Beginn stromaufwärts der Haltlinie: 100.00 m  
Ende stromabwärts der Haltlinie: 100.00 m

OK Abbrechen



## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2020

- V 321: **Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**  
Diegmann, Wursthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00
- 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 <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 325: **Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete**  
D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 326: **Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen**  
Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50
- V 327: **Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse**  
Frenken, Mahmoudi € 16,50
- V 328: **Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**  
Meisel, Balzer-Hebborn, Ellmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 329: **Streckenbezogene Glättevorhersage**  
Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50
- V 330: **Führung des Radverkehrs an Landstraßen**  
Baier, Leu, Rittershaus  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 331: **Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw**  
Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00
- V 332: **Räumliche Linienführung von Autobahnen**  
Lippold, Zösch  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 333: **Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit**  
Hänisch, Heidebrunn € 17,00
- V 334: **Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**  
Lindner, Kluth, Ruhnau, Schulze € 17,00
- V 335: **Ermittlung aktualisierter Grundlagen für Beschleunigungsvergütungen in Bauverträgen**  
Geistefeldt, Hohmann, von der Heiden, Finkbeiner € 16,00
- V 336: **Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten**  
Ungureanu, Ilić, Radon, Rothe, Reichert, Schober, Stamatakis, Heinrich € 18,50
- V 337: **Bridge-WIM Pilotversuch – Begleitung und Auswertung**  
Kathmann, Scotti, Kucera € 18,50

## 2021

- V 338: **Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs**  
Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 339: **Aktualisierung der Datenbank MARLIS**  
Schneider, Turhan, Pelzer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 340: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017**  
Fitschen, Nordmann € 31,00
- V 341: **Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen**  
Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 342: **Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz**  
Peter, Janko, Schick, Waßmuth, Friedrich, Bawidamann € 21,00
- V 343: **Kreisverkehre an Landstraßen Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtsgestaltung auf die Verkehrssicherheit**  
Schmotz, Schröter, Schemmel, Lippold, Schulze € 21,50
- V 344: **Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen**  
Popp, Eggers, Heidebrunn, Cortes € 21,00
- V 345: **Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissionsdaten der Straße und meteorologischen Daten**  
Liepert, Skowronek, Eberlei, Crljenkovic, Müller, Schady, Elsen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 346: **Zusammenhang reduzierter Geräuschgrenzwerte mit den in-use Geräuschemissionen bei unterschiedlichen Verkehrssituationen**  
Müller, Huth, Liepert € 15,00
- V 347: **Chancen in der Verkehrsbeeinflussung durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation**  
Schwietering, Löbbering, Spangler, Gabloner, Busch, Roszak, Dobmeier, Neumann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 348: **Einsatz und Verkehrssicherheit von Fußgängerüberwegen**  
Bohle, Busek, Schröder € 18,50
- V 349: **Straßenbepflanzung und Verkehrssicherheit – Ermittlung unfallbeeinflussender Merkmale auf Basis empirischer Modelle unter besonderer Berücksichtigung der Bepflanzung im Seitenraum an Landstraßen**  
Schreck-von Below € 22,00
- V 350: **Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**  
Bartolomaeus, Strigari, Sammet  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 351: **Effektivität und Wirtschaftlichkeit der Streustofflagerung – TAUSALA II**  
Holldorb, Cypra, Pape  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2022

### V 352: **Abriebe von Fahrbahnoberflächen**

Düring, Schmidt, Johannsen € 19,00

### V 353: **Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten**

Gay, Grimm, Otto, Partzsch, Gersdorf, Gierisch, Löwe, Schütze € 16,00

### V 354: **Anwendung der Methode BIM in Konformität mit den Regelwerken der FGSV und des IT-Ko**

Radenberg, Müller, König, Hagedorn, Geistefeldt, Hohmann, Heinrichs, Stiehler, Kortemeyer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 355: **Pilotversuch des Rechtsabbiegens von Rad Fahrenden bei Rot**

Niestegge, Schüller, Hantschel, Schröter, Gerike  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 356: **Entwicklung von Einsatzkriterien für Fußgänger-schutzanlagen mit unterschiedlichen Grundstellungen**

Medicus, Schmotz, Gerike, Reinartz, Baier  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 357: **Qualifizierung der in Deutschland verwendeten Fahrzeug-Rückhaltesysteme mit verbessertem Schutz für Motorradfahrer nach den aktuellen europäischen Spezifikationen**

Klöckner, Gärtner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 358: **Nutzenpotenziale von eCall im Verkehrsmanagement**

Schaarschmidt, van Driel, Reinthaler, Nitsche, Aleksa  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 359: **Management von Neophyten – Ein Überblick über die aktuelle Situation auf Straßenbegleitflächen**

Bartels  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 360: **Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen – Hauptstudie**

Stephan, Ehm, Kamaruddin  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 361: **Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur**

Hess, Lohmeier, Mielecke, Kunz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 362: **Simulation des hochautomatisierten Fahrens auf Autobahnen mit kollektiver Streckenbeeinflussung**

Hilgers, Krabbe, Haug, Grimm, Kutter, Tempelhahn, Schwietering, Füg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 363: **PERTA – Passive Sicherheit in der Straßenausstattung**

Tomasch, Radeschnig, Dünser, Sinz, Gstrein  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 364: **Verkehrsträgerübergreifender Austausch von Erneuerbarer Energie**

Chvanova, Haller, Leprich, U. Mayr, C. Mayr, Oßwald, Altmock, Gemmer, Michaels, Wagner € 23,50

### V 365: **Bundesweite Verkehrsdaten 2019**

Schneider, Pelzer, Gallus, Dick, Lensing  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2023

### V 366: **Akzeptanz und Verkehrssicherheit des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen**

Schüller, Niestegge, Hantschel, Kühn, Gerike, Huber  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 367: **In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen**

Schulze  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### V 368: **Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen**

Friedrich, Bawidamann, Peter, Waßmuth in Vorbereitung

### V 369: **Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen**

Fritz, Grigoropoulos, Katha, Baier, Reinartz, Schuckließ, Jung-hans, Lücken, Leonhardt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://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.