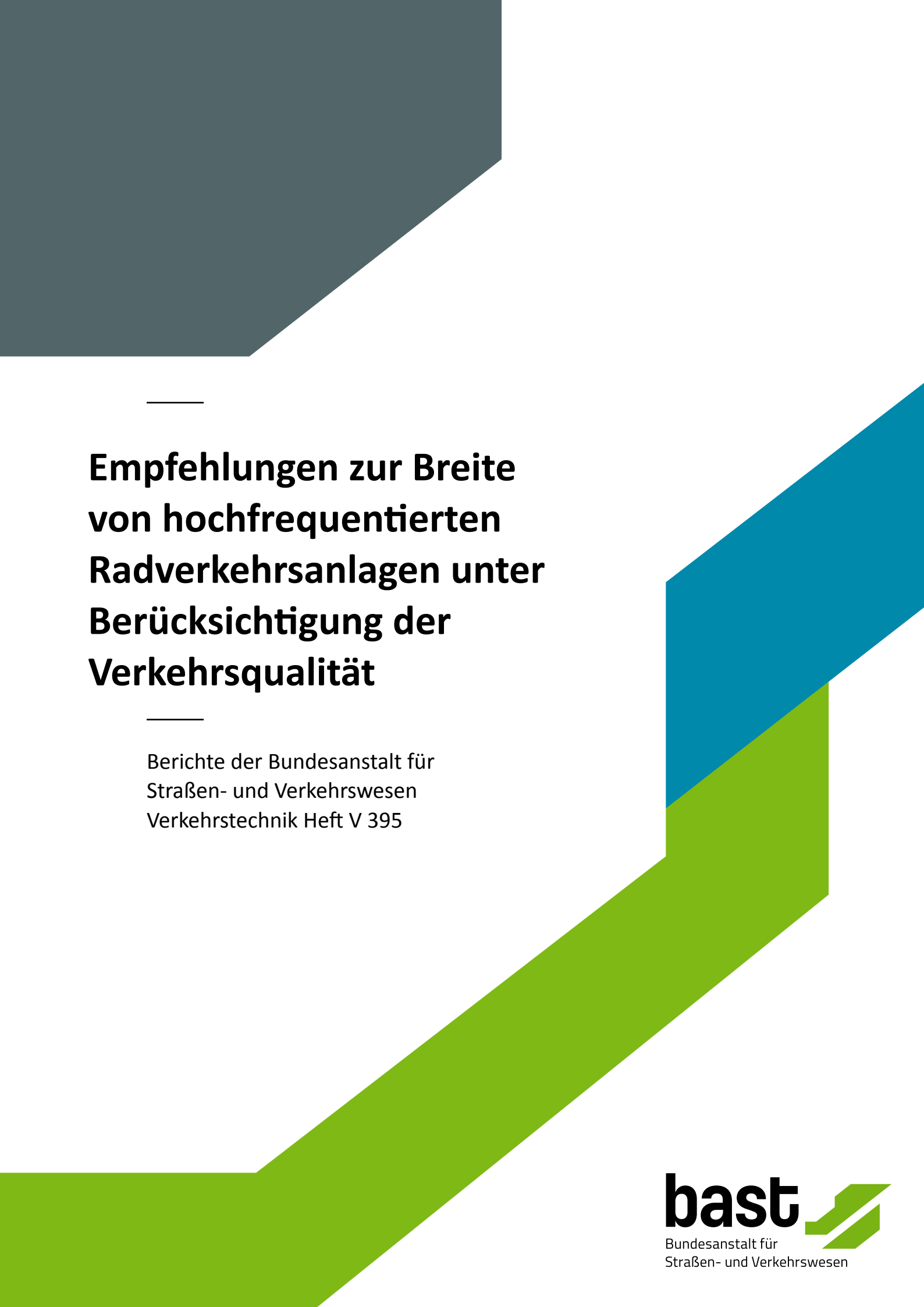




Empfehlungen zur Breite von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung der Verkehrsqualität

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Verkehrstechnik Heft V 395

Empfehlungen zur Breite von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung der Verkehrsqualität

von

Justin Geistefeldt, Alexander Brandenburg

Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen – Planung und Management

Peter Vortisch, Sebastian Buck, Verena Zeidler

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Verkehrswesen

Michael M. Baier

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

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. 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 BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 03.0539
Empfehlungen zur Breite von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen
unter Berücksichtigung der Verkehrsqualität

Fachbetreuung:
Bernhard Kollmus

Referat:
Straßenentwurf, Verkehrsablauf, Verkehrsregelung

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331 | ISBN 978-3-95606-846-1 | <https://doi.org/10.60850/bericht-v395>

Bergisch Gladbach, April 2025

Kurzfassung

Empfehlungen zur Breite von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung der Verkehrsqualität

In der Untersuchung wurde das Fahrverhalten im Radverkehr bei hohem Radverkehrsaufkommen analysiert. Dazu wurden Radar- und Videomessungen des Geschwindigkeits- und seitlichen Abstandsverhaltens an Einzelanlagen des Radverkehrs mit unterschiedlichen Führungsformen, Breiten, Steigungsverhältnissen und Randnutzungen durchgeführt. Bei der empirischen Analyse des Verkehrsablaufs wurde die Zusammensetzung des Fahrradkollektivs in die Auswertung einbezogen. Dabei zeigte sich, dass eine hohe Streuung der Einzelgeschwindigkeiten im Radverkehr vor allem aus einer inhomogenen Zusammensetzung des Fahrradkollektivs resultiert. Neben der Analyse des Verkehrsablaufs an Einzelanlagen wurde der Verkehrsablauf auf drei längeren Radverbindungen, die den Charakter eines Netzabschnitts aufweisen und sich in mehrere Einzelanlagen (Strecken und Knotenpunkte) gliedern, empirisch untersucht. Für die Extrapolation der baulichen und verkehrstechnischen Randbedingungen an den empirisch untersuchten Radverkehrsanlagen wurden Verkehrsflusssimulationen mit dem Programm VISSIM durchgeführt. Im Ergebnis zeigte sich, dass vor allem die Breite der Radverkehrsanlage die Qualität des Verkehrsablaufs beeinflusst. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Vorschlag für ein Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität an Radverkehrsanlagen entwickelt, in dem die Verkehrsdichte als Bewertungskenngröße verwendet wird. Darüber hinaus wurde ein Verfahren zur netzweiten, fahrtgeschwindigkeitsbasierten Bewertung der Angebotsqualität für Radverkehrsanlagen erarbeitet.

Abstract

Recommendations for the width of highly frequented bicycle facilities in consideration of the traffic flow quality

In this research project, the driving behavior in bicycle traffic at high traffic volumes was analyzed, taking into account different bicycle types. The traffic flow was examined on segments of bicycle facilities with different geometric parameters, including facility type, gradient, and width. The speed and lateral distance behavior of bicyclists was analyzed by using radar and video measurements. By considering the proportions of different bicycle types in the analysis, it was found that a large variance of the bicycle speed distribution mainly results from an inhomogeneous composition of bicycle types. In addition to the empirical analysis of the traffic flow at individual segments, the traffic flow on three facilities consisting of several segments and intersections was investigated. The bicycle facilities were modeled with the microscopic traffic simulation tool VISSIM to analyze the impact of different geometric parameters and high proportions of different bicycle types. It was found that the traffic flow quality is mainly influenced by the width of the facility. Based on the results, a new method for the evaluation of traffic flow quality of bicycle facilities was recommended, which applies the traffic density as measure of effectiveness. Furthermore, a procedure for the speed-based evaluation of the traffic flow quality for bicycle facilities was developed.

Summary:

Recommendations for the width of highly frequented bicycle facilities in consideration of the traffic flow quality

1 Objective

In order to achieve a modal shift from motorized individual traffic to bicycle traffic, the travel time ratio between bicycle and car traffic needs to be improved. By planning and implementing bicycle-priority facilities in Germany, the widths of the facilities are exceeded beyond the standard values given in the existing guidelines. To date, only few findings are available regarding the traffic flow at bicycle facilities with high volumes for German conditions, especially when comparing different facility types and percentages of specific bicycle types.

The level of service assessment for bicycle facilities in Germany is based on the methodology given in the German Highway Capacity Manual HBS (FGSV, 2015). The disturbance rate from passing and meeting is used as the service measure for evaluating the traffic flow quality on bicycle facilities. The disturbance rate is determined as a function of the width of the bicycle facility, the gradient, and the percentage of extra-wide bicycles. The method for determining the disturbance rate distinguishes between one-way and two-way flow. In addition to the disturbance rates from passing and meeting maneuvers, the method also takes local disturbances, e. g. due to bus stops, into account. The HBS method is based on empirical results from FALKENBERG et al. (2003), in which the speed behavior of bicyclists on bicycle facilities with mostly low traffic demand was investigated.

The HBS doesn't allow for evaluating traffic flow quality on bicycle facilities consisting of several segments and intersections, because the evaluation of the traffic flow quality of segments and intersections is based on different service measures. The disturbance rate is used as service measure for the evaluation of the traffic flow quality on a single segment, whereas the maximum delay is used to evaluate the traffic flow quality at signalized intersections, and the average delay is used at unsignalized intersections.

The objective of the study is to analyze the driving behavior in bicycle traffic, taking into account different bicycle types and high traffic volumes. Based on the knowledge gained, the evaluation methods for the quality of service assessment in the HBS will be supplemented and extended to include design configurations that have not been sufficiently taken into account to date. In particular, a procedure for the speed-based evaluation of the traffic flow quality for bicycle facilities will be developed in accordance with the German guidelines. This will create a standardized, practice-oriented procedure for determining the required width and evaluating the traffic flow quality for segments of bicycle facilities as well as bicycle facilities that cover several segments and intersections.

2 Methodology

The traffic flow was examined on individual bicycle facilities with different geometric parameters (e. g. facility type, gradient, and width). For this purpose, the speed and lateral distance behavior of bicyclists was analyzed by using radar and video measurements. The proportions of different bicycle types were included in the analysis. Furthermore, GPS tracks were recorded on uphill segments to analyze the change in speed due to the gradient.

In addition to the empirical analysis of single segments, the traffic flow on facilities consisting of several segments and intersections was investigated. For this purpose, travel time measurements were carried out using GPS data from tracking trips as well as Bluetooth measurements.

Furthermore, the traffic flow quality of different bicycle facility types under variable boundary conditions was analyzed and compared. Based on the empirical data and additional traffic flow simulations, highly frequented bicycle facilities with different geometric parameters and bicycle type percentages were modelled and analyzed concerning their capacity, the required width and the traffic flow quality. For this purpose, the simulation model was first calibrated based on the empirical data. For a laboratory example, series of simulations were carried out in which the traffic volume, the width of the facility, the proportions of cargo bikes and pedelecs as well as the volume of the oncoming traffic on two-way bicycle facilities were systematically varied. The empirically determined desired speed distributions were used for the individual bicycle types. Cargo bikes were represented with a larger vehicle width. Based on the simulations, the traffic flow quality was examined using different evaluation methods.

3 Results

In order to analyze the speed behavior, the distributions of the driving speeds of different bicycle types as well as the entire bicycle collective were examined. It turned out that the normal distribution is appropriate to describe the speed distributions. The gradient was found to be the main parameter influencing the speed distribution. As the individual bicycle types showed different speed behaviors, the percentages of individual bicycle types also influence the mean value and the standard deviation of the speed distribution of the entire bicycle collective. The results showed that the highest average speeds are reached at bicycle facilities without gradient at a high percentage of racing bicycles. On bicycle facilities for which a standard deviation of the speed greater than 4 km/h was determined, the share of racing and cargo bicycles is greater than 5 % each. Therefore, a large variance of the bicycle speed distribution mainly results from an inhomogeneous composition of bicycle types. On average, an average speed of 18.8 km/h and a standard deviation of 3.7 km/h were determined for all bicycles on the individual segments without gradient.

The relationship between volume and speed is an essential instrument for road traffic flow analysis. Based on the speed-flow relationship, however, the capacity can only be realistically estimated if a sufficiently large number of intervals in congested conditions is available. As part of the empirical investigation, no bicycle facility had such a high demand that a capacity-related bottleneck occurred. Furthermore, based on the empirical surveys no generally valid correlation between volume and speed on bicycle facilities could be derived by significance tests.

In order to analyze the lateral distance behavior, video measurements were used to determine the lateral distances between the individual bicycles and to the path edges during passing and meeting. The results show that the number of bicyclists in the cross section, the width of the facility, and the type of interaction (meeting, passing or riding next to each other at the same speed) as well as the type of the constructional boundary have an influence on the lateral distance behavior. An influence of the speed and the facility type could not be determined. In general, it could be observed that bicyclists make use of the available width of the bicycle facility and choose larger distances in case of passing or meeting. Furthermore, it was observed that a minimum lateral wheel distance of 1.00 m is usually maintained during passing in one- and two-directional traffic. This minimum lateral distance is already included in the German guidelines.

On some facilities, the speed behavior of groups of bicyclists was additionally investigated. It was found that groups of cyclists travel on average about 1.7 km/h slower than single cyclists on the same facility. In the case of facilities with a high proportion of leisure or drop-off traffic (parents and children), this reduction in speed could be appreciable due to the high proportion of groups compared to solo cyclists.

In addition to the empirical analysis of the traffic flow at individual facility segments, the traffic flow on three facilities consisting of several segments and intersections was investigated. In particular, possible influencing parameters on the travel speed were analyzed based on tracking trips. Overall, the results show that the average travel time is significantly influenced by signalized intersections. The number of stops as well as the delay at the intersections have a significant influence on the average travel speed. An influence of disturbances (e. g. meeting and passing as well as other local disturbances in the driving behavior) on the average travel speed could only be slightly observed.

The series simulations for high volumes and different proportions of different bicycle types revealed that the traffic flow quality is mainly influenced by the width of the facility, whereas the proportions of cargo bikes and pedelecs have a minor impact. Independent of the bicycle type composition, a wider facility offers better opportunities for passing and thus improves the traffic flow quality. The proportions of cargo bikes and pedelecs affect the average travel speeds, but the loss times did not change at the studied facility widths. In particular, a disproportionate increase in traffic flow quality was found between 2.5 and 3.0 m wide facilities.

The influence of the gradient could not be modelled in the simulation and was therefore not investigated. For two-way bicycle facilities, the influence of oncoming traffic could only be observed for very high oncoming traffic volumes in the series simulations. At an oncoming traffic flow below 1,200 bicycles/hour, no influence could be determined.

Based on the results, a method for the evaluation of traffic flow quality at single segments of bicycle facilities was developed, which is based on using traffic density as measure of effectiveness. Furthermore, a procedure for the speed-based evaluation of the traffic flow quality for bicycle facilities consisting of several segments and intersections was developed.

4 Conclusions

The results of the investigation show that the speed and lateral distance behavior in bicycle traffic is significantly influenced by different parameters. The gradient and the composition of bicycle types were determined as parameters influencing the speed behavior. However, a change in the desired speed distribution and its variance does not directly result in a change in the traffic flow quality, as the previous method assumes. Rather, the number of passing between cyclists increases. However, if the facility is sufficiently wide, there is no disturbing influence.

The lateral distance behavior is influenced by the number of bicyclists in the cross section, the width of the facility, and the type of interaction (meeting, passing or riding next to each other at the same speed) as well as the type of the constructional boundary.

The assumption of the HBS quality of service assessment procedure that locally adjacent areas like bus stops reduce bicycle speeds could not be confirmed within the investigation. However, the results are based on relatively small data samples. For a more detailed analysis of local disturbances from adjacent areas, comprehensive evaluations would be necessary.

Further research is also needed for refining the microscopic simulation of bicycle traffic, particularly concerning the model calibration in situations that could not be empirically observed. For example, measurements at protected bike lanes could be useful to obtain a model calibration excluding the effect of bicyclists leaving the facility at high traffic volumes. Regarding bicycle traffic on uphill segments, more extensive measurements of vehicle trajectories could lead to improved flow modeling incorporating the endurance of bicyclists as well as the influence of the length of the uphill segment.

Inhalt

1	Einleitung	10
1.1	Ausgangslage	10
1.2	Ziel und Vorgehen	11
2	Theoretische Grundlagen	12
2.1	Entwurf von Radverkehrsanlagen	12
2.1.1	Führungsformen	12
2.1.2	Qualitätsanforderungen an Radverkehrsanlagen in Deutschland	15
2.1.3	Internationale Regelwerke zum Entwurf von Radverkehrsanlagen	16
2.2	Verkehrsablauf auf Radverkehrsanlagen	26
2.2.1	Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten	26
2.2.2	Kapazität	27
2.3	Bewertung der Verkehrsqualität	28
2.3.1	Verfahren des HBS 2015	28
2.3.2	Verfahren nach den RIN-Hinweisen	32
2.3.3	Internationale Bewertungsverfahren	33
2.4	Mikroskopische Simulation des Radverkehrs	41
2.4.1	Modellierungsansätze zur Mikrosimulation von Radverkehr	41
2.4.2	Modellierung von Radverkehr mit PTV Vissim	42
2.4.3	Bewertung des Verkehrsablaufs im Radverkehr mittels Simulation	44
3	Erhebungskonzept	45
3.1	Untersuchungskollektiv	45
3.1.1	Einzelanlagen	45
3.1.2	Netzabschnitte	46
3.1.3	Steigungsstrecken	47
3.1.4	Erhebungen zur Analyse des Fahrverhaltens in Gruppen	48

3.2	Erhebungsmethodik	49
3.2.1	Querschnittsmessungen	49
3.2.2	GPS-gestützte Befahrungen	50
3.2.3	Bluetooth-Messungen	51
4	Analyse des Verkehrsablaufs an Einzelanlagen	53
4.1	Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitskenngrößen	53
4.1.1	Zusammensetzung des Fahrradkollektivs	53
4.1.2	Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens	54
4.1.3	Geschwindigkeitsverteilung nach Fahrradtyp	56
4.1.4	Zeitlückenverteilung	58
4.1.5	Wunschgeschwindigkeit	59
4.1.6	Analyse der q-v-Beziehung	60
4.1.7	Ganglinien der Verkehrsnachfrage	61
4.1.8	Einfluss aus angrenzenden lokal begrenzten Flächen	62
4.1.9	Analyse des Fahrverhaltens in Gruppen	63
4.2	Bewertung mit dem Verfahren des HBS 2015	65
4.3	Seitliches Abstandsverhalten	66
4.3.1	Einfluss der Breite der Radverkehrsanlage	66
4.3.2	Einfluss der Geschwindigkeit	75
4.4	Geschwindigkeitsverhalten bei aktiven Überholungen	76
4.5	Geschwindigkeitsverhalten an Steigungsstrecken	77
5	Analyse des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten	80
6	Mikroskopische Simulation	85
6.1	Grundlagen	85
6.2	Modellierung der Untersuchungsstrecken	85
6.2.1	Modellaufbau	86
6.2.2	Kalibrierung	88
6.3	Extrapolation der Untersuchungsergebnisse	95
6.3.1	Vorgehensweise	95
6.3.2	Auswertung der Einzelanlagen	97
6.3.3	Auswertung der Netzabschnitte	102

7	Bewertung der Verkehrsqualität auf Radverkehrsanlagen	105
7.1	Strecken von Radverkehrsanlagen	105
7.2	Netzabschnitte von Radverkehrsanlagen	108
8	Zusammenfassung	111
	Literatur	114
	Bilder	118
	Tabellen	120
	Anhang	122
	Anhang A: Beschreibung des Untersuchungskollektivs	123
	Anhang B: Ergebnisse der Analyse des Verkehrsablaufs an Einzelanlagen	137
	Anhang C: Überblick über die Fahrverhaltensparameter	162
	Anhang D: Auswertung des Überholverhaltens auf Einzelanlagen	163
	Anhang E: Sensitivitätsanalyse	164
	Anhang F: Kalibrierung der Steigungsstrecken	167
	Anhang G: Einstellungen für die Reihensimulationen	171
	Anhang H: Ergebnisse der Reihensimulation	176

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Der Radverkehr ist heutzutage ein wichtiger Teil eines Gesamtverkehrskonzepts. Immer mehr Menschen nutzen das Fahrrad als alternatives Verkehrsmittel. Populärer werden seit einigen Jahren auch Pedelecs und E-Bikes, die durch Elektromotoren die Muskelkraft beim Fahren unterstützen. Der Anteil der mit dem Fahrrad zurückgelegten Wege sowie deren Entfernungen steigen in Deutschland weiter an. Der Bund möchte daher die ökologischen Mobilitätsalternativen zum privaten Pkw mit dem in Kraft getretenen Nationalen Radverkehrsplan 2020 (BMVI, 2012) fördern und definiert darin die grundsätzlichen Leitlinien für die Förderung des Radverkehrs der kommenden Jahre.

Um eine Verkehrsverlagerung vom motorisierten Individualverkehr auf den Radverkehr zu erreichen, muss das Fahrtzeitverhältnis zugunsten des Radverkehrs bspw. durch Radschnellverbindungen verbessert werden. Radschnellverbindungen sind direkt geführte und qualitativ hochwertige Verbindungen mit regionaler wie auch überregionaler Bedeutung, für die als Grundannahme von mindestens 2.000 Radfahrern pro Tag ausgegangen wird (GWIASDA, ERLER, 2015). Mit der Planung und Umsetzung von Radschnellverbindungen werden in Deutschland über die bisherigen Regelwerke hinausgehende Breiten angewendet, die im Arbeitspapier „Einsatz und Gestaltung von Radschnellverbindungen“ (AP RSV, FGSV, 2014) dokumentiert sind. Für die Fahrtgeschwindigkeit, die auch die Zeitverluste an Knotenpunkten einschließt, werden die bereits in den Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN, FGSV, 2008) und den Empfehlungen für Radverkehrsanlagen (ERA, FGSV, 2010) definierten Standards übernommen. Neben den Trassierungselementen im Lage- und Höhenplan spielen insbesondere Knotenpunkte eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Qualität einer Radschnellverbindung. Im AP RSV (FGSV, 2014) werden neben den Breitenanforderungen auch Anforderungen hinsichtlich einer Durchschnittsgeschwindigkeit von mindestens 20 km/h und einer maximalen Verlustzeit je Kilometer an Knotenpunkten von 15 s außerorts bzw. 30 s innerorts gestellt. Demnach sollen Radschnellverbindungen in ihrem Streckenverlauf möglichst kreuzungsfrei oder mit Vorrang geführt werden. In Ballungszentren, wo der baulichen Infrastruktur durch ökonomische sowie städtebauliche und ökologische Restriktionen Grenzen gesetzt sind, ist eine vollständig planfreie Führung von Radschnellverbindungen in der Regel nicht möglich. Während verkehrszeichengeregelte Kreuzungen und Einmündungen dem Radverkehr Vorrang gewährleisten können, spielt die Kapazität und die Verkehrsqualität aller Verkehrsteilnehmer an signalisierten Knotenpunkten eine entscheidende Rolle. Die Einbindung des Radverkehrs erfolgt dabei auf der Basis der Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RILSA, FGSV, 2015b), ergänzt durch die ERA (FGSV, 2010) und die Hinweise zur Signalisierung des Radverkehrs (HSRa, FGSV, 2005).

Die Bewertung der Verkehrsqualität von Radverkehrsanlagen in Deutschland erfolgt nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS, FGSV, 2015a). Als maßgebendes Kriterium zur Bewertung der Verkehrsqualität wird dabei die Störungsrate aus Überholungen und Begegnungen verwendet. Die Störungsrate wird in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage sowie von der Steigung und dem prozentualen Anteil an überbreiten Fahrrädern ermittelt. Das Verfahren zur Berechnung der Störungsrate unterscheidet dabei zwischen Einrichtungs- und Zweirichtungsverkehr und berücksichtigt neben den Störungsdaten aus Überhol- und Begegnungsvorgängen zusätzlich punktuelle Störungen, beispielsweise durch Haltestellen des ÖPNV. Anhand von Grenzwerten für die Störungsrate kann die Verkehrsqualität an einer Radverkehrsanlage sechs Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) zugeordnet werden.

Das Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) stützt sich auf empirische Ergebnisse aus der Untersuchung von FALKENBERG et al. (2003), in der mit Hilfe von GPS-gestützten Verfolgungsfahrten und Videobeobachtungen das Geschwindigkeitsverhalten von Radfahrern auf 21 Messstrecken mit unterschiedlichen Führungsformen analysiert wurde. Dabei wurden mittlere Geschwindigkeiten bei freier Fahrt, bei Überholvorgängen und bei Beeinträchtigungen durch andere Radfahrer in Abhängigkeit von der Führungsform ermittelt. In der Untersuchung von FALKENBERG et al. (2003) wurden jedoch größtenteils Radverkehrsanlagen mit geringer Verkehrsnachfrage untersucht. Spezifische Erkenntnisse zum Verkehrsablauf auf Radverkehrsanlagen mit hohem Radverkehrsaufkommen, insbesondere im Vergleich unterschiedlicher Radverkehrsführungen, liegen bislang für deutsche Verhältnisse kaum vor.

Im HBS (FGSV, 2015a) gehen für die Bestimmung der QSV des Radverkehrs auf Strecken Annahmen über die mittlere Geschwindigkeit und deren Streuung ein. Diese Werte werden pauschal mit 18 km/h bzw. 3 km/h angesetzt. Äußere Parameter wie die Lage der Radverkehrsanlage im Netz oder die Netzfunktion,

die Art der Radverkehrsanlage, die Längsneigung, Randnutzungen oder Überschneidungen mit anderen Verkehrsarten bleiben dabei unberücksichtigt. Bei der Nutzung von konventionellen, muskelbetriebenen Fahrrädern haben vor allem die Längsneigung sowie die Länge von Steigungsstrecken maßgebenden Einfluss auf die Geschwindigkeit der Radfahrer. Fahrräder mit Elektroantrieb hingegen können durch elektrische Unterstützung Steigungen im Vergleich zu konventionellen Fahrrädern mit einer höheren Geschwindigkeit befahren. Lastenräder, deren Nutzung ebenfalls zunimmt, fahren dagegen im Mittel langsamer als Fahrräder und Pedelecs. Daher sind in Abhängigkeit von der Längsneigung sowie der Länge von Steigungsstrecken ggf. differenzierte Vorgaben für die Festlegung der Geschwindigkeiten und deren Streuung erforderlich.

Eine Bewertung der Angebotsqualität auf Netzabschnitten, die mehrere Strecken und Knotenpunkte umfassen, ist für den Radverkehr nach dem HBS (FGSV, 2015a) nicht möglich, da die Bewertung der Verkehrsqualität von Strecken und Knotenpunkten auf unterschiedlichen Qualitätskriterien basiert. Maßgebendes Kriterium für die Bewertung der Verkehrsqualität auf einer Strecke ist die Störungsrate, für die Beurteilung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit LSA wird die maximale Wartezeit und an Knotenpunkten ohne LSA die mittlere Wartezeit verwendet.

1.2 Ziel und Vorgehen

Ziel der Untersuchung ist es, das Fahrverhalten im Radverkehr unter Berücksichtigung des Fahrradkollektivs und bei hohem Radverkehrsaufkommen zu analysieren. Damit werden die im HBS (FGSV, 2015a) enthaltenen Bewertungsgrundlagen der Verkehrsqualität ergänzt sowie um bislang nicht ausreichend berücksichtigte Entwurfsituationen erweitert. Insbesondere werden Vorschläge für ein Verfahren zur netzweiten, fahrtgeschwindigkeitsbasierten Bewertung der Angebotsqualität für Radverkehrsanlagen in Anlehnung an die RIN (FGSV, 2008) und den Entwurf der „Hinweise zur Anwendung der RIN“ (FGSV, 2018) entwickelt. Hiermit wird ein einheitliches, praxisgerechtes Vorgehen zur Ermittlung des Breitenbedarfs und zur Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf Radverkehrsanlagen sowie zur Bewertung der Angebotsqualität von Netzabschnitten geschaffen.

Der Verkehrsablauf wird auf Einzelanlagen des Radverkehrs mit unterschiedlichen Breiten, Verkehrswegkategorien, Führungsformen, Randnutzungen und Steigungsverhältnissen untersucht. Dazu werden anhand von Radarmessungen und Videoaufzeichnungen an geeigneten Stellen das Geschwindigkeits- und das seitliche Abstandsverhalten der Radfahrer analysiert. Dabei wird die Zusammensetzung des Fahrradkollektivs in die Auswertung einbezogen.

Neben der empirischen Analyse des Verkehrsablaufs an Einzelanlagen wird der Verkehrsablauf auf längeren Radverbindungen, die den Charakter eines Netzabschnitts aufweisen und sich in mehrere Einzelanlagen (Strecken und Knotenpunkte) gliedern, untersucht. Dazu werden Fahrtzeitmessungen auf Netzabschnitten mit GPS-gestützten Verfolgungsfahrten sowie Bluetooth-Messungen durchgeführt.

Des Weiteren wird die Verkehrsqualität unterschiedlicher Radverkehrsführungen unter wechselnden Randbedingungen analysiert und miteinander verglichen. Anhand der theoretischen Analyse und auf der Grundlage empirischer Daten sowie ergänzender Verkehrsflusssimulationen werden hochfrequentierte Radverkehrsanlagen mit unterschiedlichen Radverkehrsführungen und Fahrradkollektiven im Modell abgebildet und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit, dem Breitenbedarf und der Verkehrsqualität analysiert. Im Ergebnis werden Empfehlungen für den Entwurf und die verkehrstechnische Bemessung von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen abgeleitet und zur Aufnahme in die einschlägigen Regelwerke aufbereitet. Zudem erfolgt die Ableitung eines Verfahrens zur anlagenübergreifenden Bewertung der Angebotsqualität von Netzabschnitten.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird für sämtliche Personenbezeichnungen in diesem Bericht verallgemeinernd das generische Maskulinum verwendet. Mit der Bezeichnung „Radfahrer“ sind somit Radfahrerinnen und Radfahrer gleichermaßen gemeint.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Entwurf von Radverkehrsanlagen

2.1.1 Führungsformen

Vorgaben für die Führung des Radverkehrs auf Landstraßen sind in den Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL, FGSV, 2012) enthalten. Demnach wird der Radverkehr außerorts bei Straßen der EKL 1 ausschließlich straßenunabhängig und bei Straßen der EKL 2 straßenunabhängig oder fahrbahnbegleitend auf Geh- und Radwegen geführt. Bei Straßen der EKL 3 erfolgt die Führung des Radverkehrs in Abhängigkeit von der Kfz- und der Radverkehrsstärke entweder fahrbahnbegleitend auf Geh- und Radwegen oder auf der Fahrbahn. Bei Straßen der EKL 4 erfolgt die Führung ausschließlich auf der Fahrbahn.

Fahrbahnbegleitende Geh- und Radwege werden nach den RAL (FGSV, 2012) in der Regel auf einer Straßenseite als gemeinsame Geh- und Radwege (Zeichen 240 StVO) für Zweirichtungsverkehr mit einer Breite von 2,50 m angelegt. Die Breite von Geh- und Radwegen auf Brücken ist in den Richtzeichnungen für Ingenieurbauten (RiZ-ING, BAST, 2017) geregelt.

Bei Einmündungen und Kreuzungen mit Lichtsignalanlage soll der Radverkehr nach den RAL (FGSV, 2012) gemäß den RiLSA (FGSV, 2015b) in die Signalsteuerung einbezogen werden. Furten sind dabei in der Regel mit einer Breite von 4,00 m zu markieren.

Zur Führung des Radverkehrs an Einmündungen und Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage geben die RAL (FGSV, 2012) vor, dass Radfahrer, die parallel zur übergeordneten Fahrbahn auf einem Sonderweg – in der Regel ein gemeinsamer Geh- und Radweg – über eine untergeordnete Zufahrt einer Straße der EKL 3 geführt werden, aus Sicherheitsgründen nicht bevorrechtigt werden sollen. Wenn Radfahrer parallel zur übergeordneten Fahrbahn auf einem Sonderweg über eine untergeordnete Zufahrt einer Straße der EKL 4 geführt werden, können diese aus Gründen der Verkehrsqualität des Radverkehrs bevorrechtigt werden; dies gilt auch bei Zufahrten der EKL 3, wenn diese vergleichbar gering belastet sind. Markierte Furten sind nach den RAL (FGSV, 2012) in einer Breite von 2,50 m auszuführen.

Innerorts werden nach den RAST (FGSV, 2006b) und den ERA (FGSV, 2010) u. a. folgende Führungsformen des Radverkehrs unterschieden:

- Mischverkehr auf der Fahrbahn,
- Mischverkehr mit Schutzstreifen,
- Radfahrstreifen und
- Radweg.

Radwege können durch ihre Benutzungspflicht und Betriebsform (Einrichtungs- oder Zweirichtungsverkehr) unterschieden werden. Radfahrstreifen werden grundsätzlich im Einrichtungsverkehr betrieben.

Darüber hinaus gibt es innerorts auch gemeinsame Geh- und Radwege sowie die Möglichkeit, Gehwege für Radfahrer freizugeben. Diese Führungsformen sind für hohe Radverkehrsstärken jedoch nicht geeignet und werden deshalb nicht weiter berücksichtigt.

Die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen insbesondere mit Schutzstreifen gewinnt in vielen Städten zunehmend an Bedeutung. OHM et al. (2015) untersuchten das Gefährdungspotenzial für Radfahrer auf Hauptverkehrsstraßen im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen. Die dazu durchgeführte Kommunalrecherche zeigte, dass viele Streckenabschnitte mit Schutzstreifen nicht den Kriterien der RAST (FGSV, 2006b) und der ERA (FGSV, 2010) entsprechen. Häufig wurden Schutzstreifen bei größeren Fahrbahnbreiten angeordnet und in solchen Fällen auch Schutzstreifen mit Breiten > 1,50 m markiert. Dies betraf auch vierstreifige Querschnitte, deren Verkehrsaufkommen den Einsatz von Radfahrstreifen und einer begleitenden überbreiten Fahrbahn ermöglichen würde.

Zur Führung des Radverkehrs auf der Fahrbahn werden in den RAST (FGSV, 2006b) und den ERA (FGSV, 2010) unterschiedliche Kfz-Verkehrsstärken als Einsatzbereiche angegeben (vgl. Tab. 2-1). Die RAST (FGSV, 2006b) führen bei Fahrbahnbreiten über 7,00 m einen maximalen Schwerverkehrsanteil von 6 % als weitere Einsatzgrenze an. Zudem können nach den RAST (FGSV, 2006b) die angegebenen Verkehrsstärken bei einem geringen Geschwindigkeitsniveau von $V_{85} < 50$ km/h im Einzelfall überschritten werden.

Fahrbahnbreite	RASt (2006)	ERA (2010)
< 6,00 m	bis 500 Kfz/h	bis 700 Kfz/h
6,00 bis 7,00 m	-	bis 400 Kfz/h
> 7,00 m	800 bis 1.000 Kfz/h	-

Tab. 2-1: Einsatzbereiche zur Führung des Radverkehrs auf der Fahrbahn nach den RAST (FGSV, 2006b) und den ERA (FGSV, 2010)

Die ERA (FGSV, 2010) enthalten über die in Tab. 2-1 genannten Einsatzgrenzen für die Führung des Radverkehrs auf der Fahrbahn hinaus auch Diagramme mit Belastungsbereichen (in Kfz/h) zur Vorauswahl von Radverkehrsführungen bei zwei- und vierstreifigen Stadtstraßen (vgl. Bild 2-1). Die Auswahl ist unabhängig von der Radverkehrsstärke. Anders als in den ERA (FGSV, 2010) angegeben bezieht sich nur das Diagramm für zweistreifige Straßen auf die querschnittsbezogene Kraftfahrzeugverkehrsstärke, das Diagramm für vierstreifige Straßen bezieht sich auf die Kraftfahrzeugverkehrsstärke in einer Fahrtrichtung.

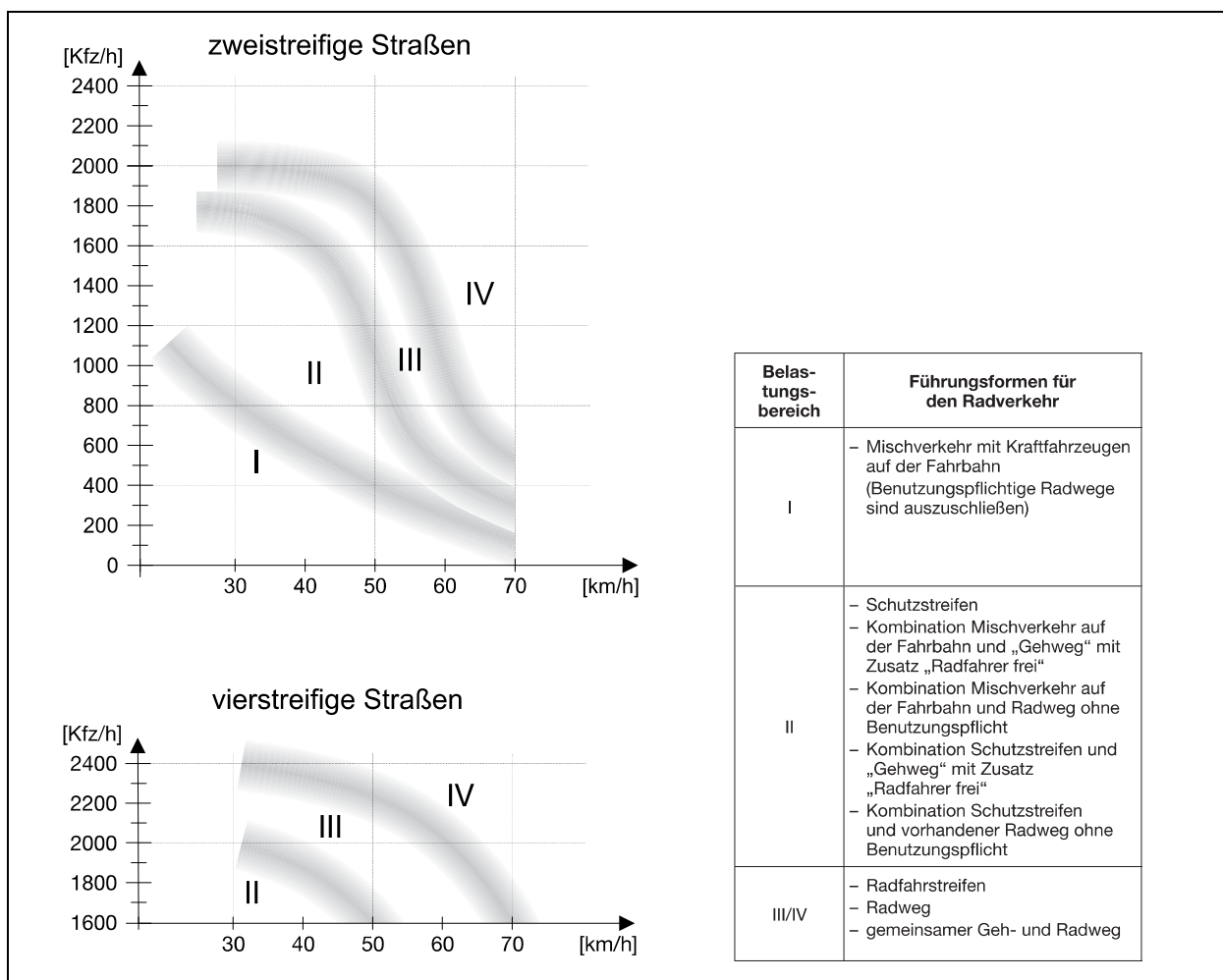


Bild 2-1: Belastungsbereiche zur Vorauswahl von Radverkehrsführungen nach den ERA (FGSV, 2010) für zweistreifige Straßen bezogen auf den Querschnitt und für vierstreifige Straßen bezogen auf die Fahrtrichtung

Im Hinblick auf die Führung von Radfahrern im Mischverkehr mit Kraftfahrzeugen auf der Fahrbahn von Hauptverkehrsstraßen ohne und mit Schutzstreifen bestehen bisher somit nur Einsatzgrenzen und -empfehlungen in Abhängigkeit von der Kraftfahrzeugverkehrsstärke.

Eine weitere Führungsmöglichkeit, ebenfalls im Mischverkehr mit Kraftfahrzeugen, stellen Fahrradstraßen dar. Diese können im Zuge von Hauptverbindungen des Radverkehrs angelegt werden, um hohe Reisegeschwindigkeiten für den Radverkehr zu ermöglichen, wenn der Radverkehr die vorherrschende Verkehrsart ist oder dies planerisch beabsichtigt ist. Andere Fahrzeuge als das Fahrrad müssen mittels Beschilderung zugelassen werden und auf den Radverkehr Rücksicht nehmen. Fahrradstraßen können nach den RAST

(FGSV, 2006b) in Erschließungsstraßen mit Belastungen bis etwa 400 Kfz/h eingesetzt werden, die zulässige Höchstgeschwindigkeit darf nicht mehr als 30 km/h betragen.

Für hohe Radverkehrsstärken geeignet sind sowohl Radfahrstreifen als auch Radwege, bei denen ggf. zwischen fahrbahnbegleitenden und eigenständigen Radwegen zu differenzieren ist. Dies gilt auch im Kontext von solchen Anlagen im Zuge von Radschnellverbindungen.

Radfahrstreifen werden von der auf gleicher Höhe liegenden Fahrbahn für Kfz durch das Zeichen 295 StVO („Fahrbahnbegrenzung“) mit einer Markierungsbreite von 0,25 m getrennt. Die Benutzungspflicht für Radfahrer muss durch das Zeichen 237 StVO („Radweg“) verdeutlicht werden.

Nach den RAST (2006b) beträgt die Mindestbreite von Radfahrstreifen 1,60 m. Bei angrenzenden Parkständen ist ein Sicherheitstrennstreifen vorzusehen. Nach den ERA (FGSV, 2010) sollen Radfahrstreifen bei hohen Kfz- bzw. Radverkehrsstärken, einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit über 50 km/h oder häufigem Auftreten von Fahrrädern mit Anhänger mindestens 2,00 m breit sein.

Fahrbahnbegleitende Radwege werden innerorts im Regelfall beidseitig im Einrichtungsverkehr angelegt. Sie sollen mit deutlicher Differenzierung zu den Gehbereichen angelegt oder markiert und von diesen getrennt werden. Die Benutzungspflicht für Radfahrer wird durch das Zeichen 237 StVO („Radweg“) angeordnet. Fahrbahnbegleitende Radwege können nach den RAST (FGSV, 2006b) in Ausnahmefällen auch mit ein- oder beidseitigem Zweirichtungsradverkehr geführt werden.

Nach den RAST (FGSV, 2006b) beträgt die Regelbreite von Einrichtungsradwegen 2,00 m und von Zweirichtungsfahrbahnen 2,50 m. Nur bei geringer Radverkehrsbelastung kann die Breite auf 1,60 bzw. 2,00 m verringert werden. Nach den ERA (FGSV, 2010) beträgt das Regemaß von baulich angelegten Zweirichtungsradwegen bei einseitiger Führung sogar 3,00 m. Größere Radwegbreiten können nach den RAST (FGSV, 2006b) im Verlauf wichtiger Haupttrouten des Radverkehrsnetzes, bei vorhandenen oder zukünftig zu erwartenden höheren Radverkehrsbelastungen, bei häufig auftretenden Belastungsspitzen, bei intensiver Seitenraumnutzung und bei starkem Gefälle erforderlich werden. Unabhängig von der Breite ist bei Ein- und Zweirichtungsradwegen zu angrenzenden Fahrbahnen sowie Parkstreifen oder -buchten jeweils ein Sicherheitstrennstreifen vorzusehen.

Radschnellverbindungen sind hochwertige Radverkehrsanlagen, die ausschließlich dem Radverkehr dienen, ein durchgängig sicheres und komfortables Fahren mit hohen Geschwindigkeiten ermöglichen. In Deutschland gibt es zahlreiche Bestrebungen zur Etablierung von Radschnellwegen. Verschiedene Potenzial- und Machbarkeitsstudien liegen vor, erste Teile von Radschnellverbindungen sind umgesetzt (z. B. Radschnellweg Göttingen, Radschnellweg Ruhr RS1).

Einsatzbereiche und Entwurfsэлеmente von Radschnellverbindungen wurden von MALIK et al. (2019) erarbeitet. In der Untersuchung wurde ein praxisorientiertes Verfahren zur Potenzialanalyse bzw. -abschätzung entwickelt sowie eine darauf aufbauende Nutzen-Kosten-Analyse für Radschnellverbindungen durchgeführt. Dabei wurden insbesondere die Verlagerungspotenziale von anderen Verkehrsmitteln berücksichtigt. Darüber hinaus erfolgte eine Sicherheitsbewertung vorhandener Streckenabschnitte von Radschnellverbindungen anhand von Verhaltensbeobachtungen und einer Unfallanalyse. Hierbei zeigte sich, dass eine Breite der Radverkehrsanlage von mindestens 4,00 m geeignet ist, um bei hohen Radverkehrsstärken die Interaktionen zwischen den Radfahrern untereinander zu reduzieren.

Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen hat auf diese Entwicklungen reagiert und das Arbeitspapier „Einsatz und Gestaltung von Radschnellverbindungen“ (AP RSV, FGSV, 2014) veröffentlicht. Das AP RSV enthält folgende Entwurfsgrundsätze für Radschnellverbindungen:

- Direkte, weitgehend umwegfreie Linienführung.
- Mögliche Führungsformen innerorts: selbstständig geführte Radverkehrsanlagen (Verlauf unabhängig von Straßen), fahrbahnbegleitende Radwege, Radfahrstreifen (auch mit zugelassenem Busverkehr), Fahrradstraßen, Wege mit zugelassenem land-/forstwirtschaftlichen Verkehr, Straßen mit $V_{zul} = 30$ km/h (bei Vorfahrt an Knotenpunkten).
- Ausgeschlossene Führungsformen: gemeinsame Geh- und Radwege, Gehwege/Bereiche für Fußgänger mit zugelassenem Radverkehr, verkehrsberuhigte (Geschäfts-) Bereiche.
- Grundsätzliche Trennung von Fußgänger- und Radverkehr, möglichst wenig Beeinträchtigung durch Schnittstellen mit dem Kfz-Verkehr.

- Breiten im Zweirichtungsverkehr: 4,00 m zuzüglich Sicherheitstrennstreifen, Breiten im Einrichtungsverkehr: 3,00 m zuzüglich Sicherheitstrennstreifen nach den H BVA (FGSV, 2011) von 0,60 m (mindestens 0,30 m).
- Steigungen von maximal 6 % bei freier Trassierung.

Das AP RSV (FGSV, 2014) behandelt darüber hinaus ausführlich die Ausbildung von Knotenpunkten und Querungsanlagen, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtverkehrsqualität der Radschnellverbindung haben.

Die im AP RSV (FGSV, 2014) vorgeschlagenen Standards für Radschnellwege werden in der aktuellen Planungspraxis teilweise angepasst, siehe z. B. AGFS (2014), GERTZ et al. (2017), GWIASDA und ERLER (2015). So definiert die Stadt Freiburg z. B. im Radverkehrskonzept 2020 (STADT FREIBURG, 2018) drei Kategorien für das Radverkehrsnetz: Vorrang-, Haupt- und Nebenrouten. Für die Vorrangrouten, welche in etwa dem Charakter von Radschnellwegen entsprechen, werden Breiten $\geq 3,00$ m angesetzt, für Haupt- und Nebenrouten Breiten von 2,50 m und für Nebenrouten Breiten $\geq 2,00$ m. Neben der Führung auf der Strecke ist auch die Radverkehrsführung an Knotenpunkten, insbesondere solchen mit LSA, zu beachten. Zur Überquerung von Knotenpunktarmen werden Radfahrstreifen und Radwege auf Radfahrerfurten (in den VwV-StVO als „Radwegefurten“ bezeichnet) geführt. Radfahrerfurten sind stets im Zuge von gekennzeichneten Vorfahrtsstraßen und an Lichtzeichenanlagen zu markieren. Die Furt ist in der Regel 2,00 m breit, jedoch mindestens so breit wie die angrenzenden Radverkehrsanlagen.

Von BUSCH et al. (2019) wurden verschiedene Radverkehrsführungen und -signalisierungen an Knotenpunkten mit LSA festgelegt, deren Kombinationen im Kontext der Fahrstreifenanzahl auf der Strecke als praxisrelevant angesehen werden. Dies erfolgte auf der Grundlage der in den RAST (FGSV, 2006b) und den ERA (FGSV, 2010) enthaltenen Führungsformen, den nach den RiLSA (FGSV, 2015b) und den HSRa (FGSV, 2005) möglichen Signalisierungsformen sowie den Kenntnissen aus realisierten Beispielen aus der Praxis. Ziel war es, praxistaugliche Berechnungsverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Verkehrsqualität an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen bereitzustellen. Des Weiteren wurden die Einsatzgrenzen verschiedener Führungs- und Signalisierungsformen für den Radverkehr ermittelt. Die Erarbeitung von Vorschlägen für die Anpassung bzw. Ergänzung des derzeitigen Verfahrens im HBS (FGSV, 2015a) zur Bemessung und Bewertung der Verkehrsqualität von Knotenpunkten mit LSA erfolgte auf der Grundlage von empirischen Untersuchungen und Verkehrsflusssimulationen.

2.1.2 Qualitätsanforderungen an Radverkehrsanlagen in Deutschland

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich im Wesentlichen auf die Verkehrsqualität, wie sie im HBS (FGSV, 2015a) definiert ist. Kriterien wie Belagsqualität, Beleuchtung und Ausstattung (z. B. wegweisende Beschilderung) sowie Winterdienst werden nur am Rande behandelt. Gleichwohl sind dies wichtige Qualitätsanforderungen und auch Voraussetzungen zur Gewährleistung einer hohen Verkehrsqualität.

Zu unterscheiden sind Qualitätsanforderungen, die in den Entwurfsregelwerken definiert sind, und solche, die aus verkehrstechnischer Sicht im HBS (FGSV, 2015a) festgelegt sind. Nachfolgend werden nur die entwurfsbezogenen Qualitätsanforderungen behandelt, verkehrstechnische Qualitätsanforderungen werden in Kapitel 2.3.1 im Zusammenhang mit den Berechnungsverfahren des HBS (FGSV, 2015a) erläutert.

Die ERA (FGSV, 2010) formulieren als eine Aufgabe der Radverkehrsnetzplanung die Zuordnung der Strecken zu Netzkategorien gemäß den RIN (FGSV, 2008) und den damit verbundenen Qualitätsstandards (vgl. Tab. 2-2). Diese gelten für den zielorientierten Alltagsradverkehr. Neben den allgemeinen Anforderungen des alltäglichen zielgerichteten Radverkehrs, der schnelle und direkte Wege bevorzugt, z. B. zur Arbeit oder Ausbildungsstätte, sind die Anforderungen anderer Nutzergruppen, wie Kinder und Jugendliche, ältere Menschen und Fahrradurlauber, gesondert zu berücksichtigen. Diese werden hier nicht weiter betrachtet.

Kategorie		angestrebte Fahr- geschwindigkeiten in km/h ²⁾	daraus abgeleitete maximale Zeitverluste durch Anhalten und Warten je km	Beleuchtung	Wegweisung
AR II	überregionale Radverkehrsverbindung	20 bis 30	15 s	–	x
AR III	regionale Radverkehrsverbindung	20 bis 30	25 s	–	x
AR IV	nahräumige Radverkehrsverbindung	20 bis 30	35 s	–	1)
IR II	innergemeindliche Radschnellverbindung	15 bis 25	30 s	x	x
IR III	innergemeindliche Radhauptverbindung	15 bis 20	45 s	x	x
IR IV	innergemeindliche Radverkehrsverbindung	15 bis 20	60 s	x	1)
IR V	innergemeindliche Radverkehrsanbindung	–	–	–	–
Auf Netzebene anzustrebende Qualitäten: – die Maschenweite des Netzes der Hauptverbindungen (200 bis 1.000 m) soll gewährleisten, dass 90 % der Einwohner maximal 200 m von einer Hauptverbindung entfernt wohnen – minimale Umwege (Umfwegfaktor max. 1,2 gegenüber der kürzestmöglichen Verbindung, max. 1,1 gegenüber parallelen Hauptverkehrsstraßen) und keine zusätzlichen Steigungen – Erfüllung der in der Tabelle 4 (Seite 15) benannten grundlegenden Entwurfsanforderungen hinsichtlich Verkehrssicherheit und Verkehrsqualität des Radverkehrs – Winterdienst auf den Hauptverbindungen des Radverkehrs (mindestens bei AR II, IR II und IR III) – sozial sicher: Übersichtlichkeit, Einsehbarkeit und soziale Kontrolle oder Angebot entsprechender Alternativverbindungen, z. B. zu Nachtzeiten					
1) sofern Teil des Wegweisungsnetzes					
2) einschließlich Zeitverluste an Knotenpunkten (nach den RIN)					

Tab. 2-2: Zielgrößen für Gestaltung und Ausstattung von Verkehrswegen des Alltagsradverkehrs nach den ERA (FGSV, 2010)

Für Radschnellverbindungen werden nach dem AP RSV (FGSV, 2014) über die in Ziffer 2.1.1 genannten Entwurfsgrundsätze hinaus im Hinblick auf den Verkehrsablauf folgende Anforderungen formuliert:

- Sichere Befahrbarkeit auch bei hohen Geschwindigkeiten, Ermöglichung einer Fahrtgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Zeitverluste an Knotenpunkten von mindestens 20 km/h, die Trassierung soll Fahrgeschwindigkeiten von mindestens 30 km/h zulassen.
- Maximale Zeitverluste: 30 s/km innerorts, 15 s/km außerorts.

Die hohen Qualitätsstandards für Radschnellwege sind bei hohen Potenzialen über größere Entfernungen gerechtfertigt, so dass vor allem Radverkehrsverbindungen innerhalb von Kommunen, im Stadt-Umland-Bereich sowie für Verflechtungen mittelgroßer Städte geeignet sind. Das AP RSV gibt einen Entfernungsbereich von 5 bis 15 km an, wobei inzwischen auch deutlich längere Radschnellwege geplant werden, wie z. B. der Radschnellweg Ruhr RS1.

2.1.3 Internationale Regelwerke zum Entwurf von Radverkehrsanlagen

Bei der Wahl einer geeigneten Führungsform für den Radverkehr werden in internationalen Normen und Regelwerken unterschiedliche Kriterien berücksichtigt. Grundsätzlich wird die Führungsform dabei immer in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke und Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugverkehrs ermittelt. Darüber hinaus wird beispielsweise in den Niederlanden (CROW, 2016) und der Schweiz (VSS, 2016) die Radverkehrsstärke in den Entscheidungsprozess miteinbezogen. Weitere Kriterien wie bspw. die Verbindungskategorie der Radverkehrsanlage im Radwegenetz sowie die Lage innerhalb oder außerhalb bebauter Gebiete werden in einigen Ländern ebenfalls berücksichtigt.

Eine Übersicht über die empfohlene Führungsform in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke und Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugverkehrs gemäß internationalen Normen und Regelwerken ist in Tab. 2-3 darge-

stellt. Dabei wurde für unterschiedliche DTV-Klassen und Kfz-Geschwindigkeiten die empfohlene Führungsform gemäß den jeweiligen Regelwerken zusammengestellt. Grundsätzlich gilt: Je höher die Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugverkehrs und je höher die Kfz-Verkehrsstärke ist, desto eher ist ein baulich getrennter Radweg zu realisieren.

DTV [Kfz/d]	Kfz-Geschwindigkeit [km/h]	empfohlene Führungsform				
		Dänemark (CED, 2012)	Niederlande (CROW, 2016)	Schweiz (VSS, 2016)	Frankreich (CEREMA, 2008)	Österreich (FSV, 2014)
2.000	30	Mischverkehr	Mischverkehr	Mischverkehr	Mischverkehr	Mischverkehr
	50	Radfahrstreifen	Mischverkehr / Radweg	Radstreifen ²⁾	Radfahrstreifen	Mischverkehr / Radfahrstreifen
	70	Seitenstreifen ¹⁾	Radweg	Radweg	Radweg	Radfahrstreifen / Radweg
5.000	30	-	Radfahrstreifen / Radweg	Mischverkehr	Mischverkehr	Mischverkehr
	50	Radfahrstreifen / Radweg	Radweg	Radstreifen ²⁾	Radfahrstreifen / Radweg	Mischverkehr / Radfahrstreifen
	70	Radweg mit räuml. Trennung	Radweg	Radweg	Radweg	Radfahrstreifen / Radweg
10.000	30	-	Radfahrstreifen / Radweg	Radstreifen ²⁾	Radfahrstreifen	Mischverkehr / Radfahrstreifen
	50	Radweg	Radweg	Radweg	Radfahrstreifen / Radweg	Radfahrstreifen / Radweg
	70	Radweg mit räuml. Trennung	Radweg	Radweg	Radweg	Radfahrstreifen / Radweg
15.000	30	-	Radfahrstreifen / Radweg	Radstreifen ²⁾	Radweg	Radfahrstreifen / Radweg
	50	Radweg	Radweg	Radweg	Radweg	Radfahrstreifen / Radweg
	70	Radweg mit räuml. Trennung	Radweg	Radweg	Radweg	Radweg

¹⁾ schmalerer Radfahrstreifen, auf dem Parken für Kfz unter Umständen erlaubt ist

²⁾ vergleichbar mit dem Schutzstreifen in Deutschland

Tab. 2-3: Empfohlene Führungsform in Abhängigkeit von der durchschnittlichen täglichen Kfz-Verkehrsstärke und der Kfz-Geschwindigkeit gemäß internationalen Normen und Regelwerken

Im Folgenden werden die Grundlagen zum Entwurf von Radverkehrsanlagen in Dänemark, den Niederlanden, der Schweiz und den USA näher erläutert.

Dänemark

Der Entwurf von Radverkehrsanlagen erfolgt in Dänemark anhand der „Collection of Cycle Concepts“ (CED, 2012) und des Hinweispapiers „Focus on Cycling“ (CPH, 2014). Die „Collection of Cycle Concepts“ stellt ein Konzeptpapier mit dem Ziel der Förderung des Radverkehrs und der Verringerung der Unfälle mit Beteiligung von Radfahrern dar. Zur sicheren Gestaltung von Radverkehrsanlagen fasst das Konzeptpapier detaillierte Informationen hinsichtlich der Anforderungen und der Planung von Radverkehrsanlagen zusammen. Ergänzend soll das Hinweispapier „Focus on Cycling“ (CPH, 2014) dazu beitragen, dass Radverkehrsanlagen in Kopenhagen bestmöglich geplant und gestaltet werden. Es fasst die übergeordneten Verkehrsstrategien der Stadt in Form von Richtlinien zusammen und ist dabei besonders auf die Gestaltung von Knotenpunkten ausgerichtet.

Grundsätzlich wird die konsequente Umsetzung eines für alle Verkehrsteilnehmer möglichst selbsterklärenden Straßenentwurfs unter Beachtung der baulichen und verkehrstechnischen Randbedingungen des jeweiligen Verkehrsweges angestrebt. Anhand der Wunschgeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs und der durchschnittlichen täglichen Kfz-Verkehrsstärke kann eine geeignete Führungsform für den Radverkehr anhand von Grenzwerten ermittelt werden (vgl. Bild 2-2). Bei der Führung des Radverkehrs wird dabei

grundsätzlich zwischen der Führung im Mischverkehr, auf einem Radfahrstreifen, auf einem Seitenstreifen („shoulder lane“ und „kerb lane“) sowie auf einem Radweg im Seitenraum unterschieden. Eine Übersicht des jeweiligen Breitenbedarfs für die einzelnen Führungsformen ist in Bild 2-2 dargestellt.

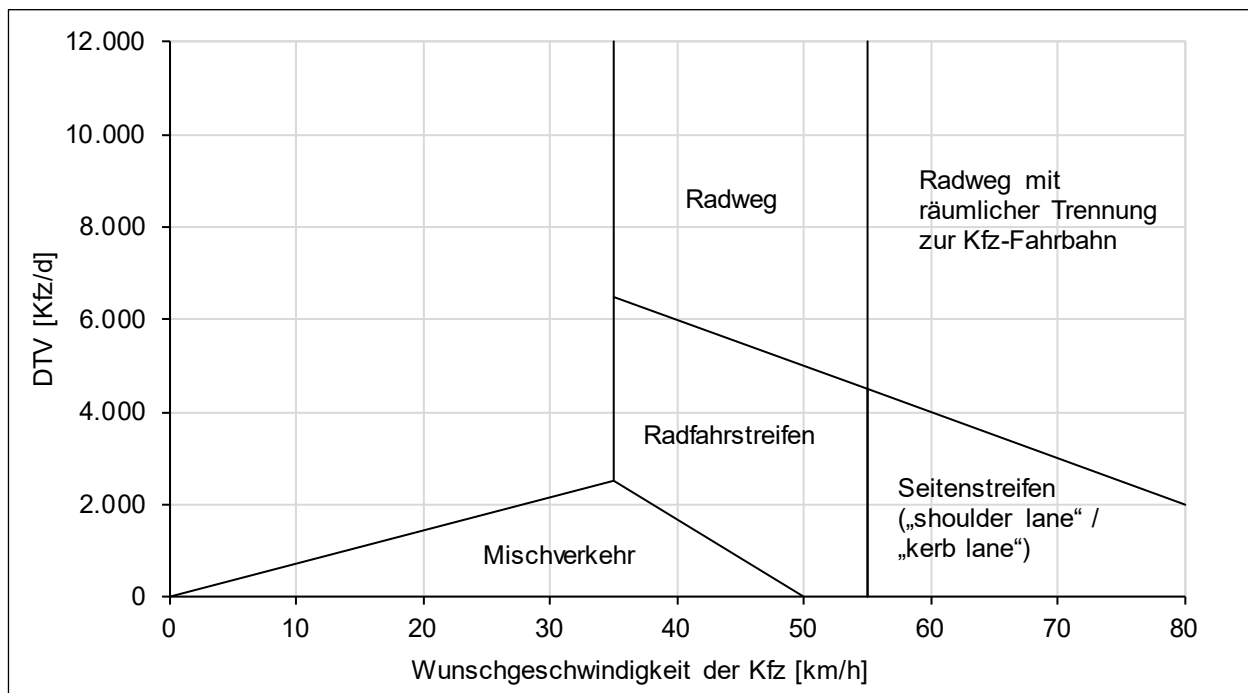


Bild 2-2: Führungsform des Radverkehrs in Abhängigkeit von der Wungeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs und der täglichen Kfz-Verkehrsstärke nach CED (2012)

Führungsform	Normalbreite [m]	Minderbreite [m]	Überbreite [m]
Radfahrstreifen	≥ 1,50	-	≥ 1,70
Seitenstreifen			
- shoulder lane	1,20	0,90	-
- kerb lane	1,50	-	-
Einrichtungsrادweg	2,20	1,70	2,80 – 3,00
- gemeinsamer Geh- und Radweg	1,70	1,50	-
Zweirichtungsrادweg	≥ 2,50	-	-
- gemeinsamer Geh- und Radweg	≥ 3,00	-	-

Tab. 2-4: Breitenbedarf von Radverkehrsanlagen nach Führungsform gemäß CED (2012)

Gemäß der „Collection of Cycle Concepts“ (CED, 2012) ist im innerstädtischen Bereich eine Führung des Radverkehrs im Mischverkehr bei einer geringen Kfz-Verkehrsstärke und Kfz-Geschwindigkeit möglich. Bei Straßenbreiten unter 6,50 m sollte eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h nicht überschritten werden. Dabei erfordern höhere Kfz-Verkehrsstärken entsprechend breitere Fahrbahnquerschnitte. Bei Geschwindigkeiten > 40 km/h sind Verkehrsberuhigungsmaßnahmen (z. B. Bremsschwellen oder Fahrgassenversatz mit entsprechenden „cycle gaps“) zu realisieren oder eine Trennung des Kfz- und Radverkehrs vorzunehmen.

Radfahrstreifen sollen mindestens mit einer Breite von 1,50 m (inkl. 0,30 m breiter, durchgehender Markierung) ausgebaut werden, damit sichere Überholvorgänge möglich sind. Eine rote bzw. braune Färbung von Radfahrstreifen ist ab einer Breite von 1,80 m notwendig, damit Verwechslungen mit Kfz-Fahrbahnen und/oder Parkstreifen vermieden werden. Wenn ein Parkstreifen zwischen der Fahrbahn und dem Radfahrstreifen liegt, wird eine Breite des Radfahrstreifens von 2,00 bis 2,50 m für ein sicheres Überholen und einen ausreichenden Abstand zu sich öffnenden Autotüren empfohlen. Im Idealfall sollte ein 1,00 m breiter Trennstreifen realisiert werden.

Seitenstreifen werden als eine Sonderform des Radfahrstreifens in ländlichen Gebieten („shoulder lane“), auf denen Parken erlaubt ist, oder in städtischen Gebieten („kerb lane“), auf denen Parken verboten ist, genutzt. In der Regel sind Seitenstreifen etwas schmaler als Radfahrstreifen, da diese häufig aus einer Ummarkierung oder einer Fahrbahnerweiterung resultieren. Es soll allerdings vermieden werden, dass eine Straße mit dem Ziel der Markierung eines solchen Seitenstreifens ausgebaut wird. Gemäß den Richtlinien ist bei ausreichenden Platzverhältnissen im innerstädtischen Bereich ein Breitenbedarf von 1,50 m (inkl. 0,30 m Markierung) für Radfahrstreifen anzusetzen. In ländlichen Räumen sind gemäß Konzeptpapier Breiten von 1,20 m (mindestens 0,90 m) inkl. einer 0,30 m breiten Markierung erforderlich.

Bei der Führung des Radverkehrs auf einem Einrichtungsradweg wird bei der Dimensionierung eine Radverkehrsgeschwindigkeit von 30 km/h angestrebt. Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit ist an Straßen mit hohen Kfz-Verkehrsstärken und hohen Geschwindigkeiten der Radverkehr baulich getrennt auf einem Radweg zu führen. Dabei ist eine bauliche Trennung zur Fahrbahn und zum Gehweg durch unterschiedliche Höhenlagen und abschließende Bordsteine, Schwellen, Leitbaken oder Grünstreifen (Breite $\geq 0,60$ m) anzuwenden. Der Höhenunterschied soll zwischen Fahrbahn und Radweg mindestens 7 und maximal 12 cm sowie zwischen Gehweg und Radweg mindestens 5 und maximal 9 cm betragen. Gemäß dem Konzeptpapier (CED, 2012) sollen baulich abgetrennte Radwege sowohl inner- als auch außerorts eine Breite von 2,20 m (mind. 1,70 m) aufweisen, um sichere Überholmanöver zu ermöglichen. Bei stark frequentierten Routen sollte Platz für drei nebeneinanderfahrende Radfahrer zur Verfügung stehen, weshalb Breiten zwischen 2,80 m und 3,00 m anzustreben sind. Bei gemeinsamen Fuß- und Radwegen sind Breiten von 1,70 m (mind. 1,50 m) zu realisieren.

Für Zweirichtungsradwege gelten die gleichen zu realisierenden Höhenunterschiede zur Kfz-Fahrbahn und zum Gehweg wie bei Einrichtungsradwegen. Zweirichtungsradwege finden Anwendung in Erholungsgebieten, als Verbindung zweier Städte, als Radwegsystem innerhalb von Wohngebieten oder entlang von Hauptstraßen mit wenigen Knotenpunkten. Dabei wird differenziert zwischen straßenbegleitenden und selbstständig geführten Radwegen („segregated off-road cycle path“). Erstere sollten nur nach einer ausgiebigen Prüfung sämtlicher Alternativen realisiert werden, können aber an Schulen und Sportplätzen sinnvoll sein, um Querungen der Straße zu vermeiden. Im Hinblick auf die Verkehrssicherheit sollten diese jedoch an Straßen mit vielen Knotenpunkten vermieden werden, da der Kfz-Verkehr häufig nicht mit Radfahrern aus der entgegengesetzten Fahrtrichtung rechnet. Um einen sicheren Verkehrsablauf auf einem Zweirichtungsradweg zu ermöglichen, sollte ein gemeinsamer Geh- und Radweg mindestens 3,00 m breit sein und ein Zweirichtungsradweg mit angrenzendem Gehweg eine Breite von mindestens 2,50 m aufweisen. Innerorts sollte die Trennung zur Kfz-Fahrbahn mindestens 1,00 m breit sein, außerorts sind Abstände $\geq 1,50$ m vorgesehen. Für Hauptstraßen wird ein Abstand von 3,00 m empfohlen, für Autobahnen $\geq 15,00$ m (bei geringeren Abständen sind Schutzplanken erforderlich). Falls in Kurven keine angemessenen Sichtweiten garantiert werden können, sollten beide Fahrtrichtungen durch Trennlinien oder Schutzbaken voneinander getrennt werden. Die generelle Dimensionierung erfolgt ebenfalls für Geschwindigkeiten von 30 km/h. Gefälle bis 3 % sollten für 36 km/h dimensioniert werden, Gefälle bis 5 % für 40 km/h.

Niederlande

Der Entwurf und Betrieb von Radverkehrsanlagen erfolgt in den Niederlanden anhand des „Design Manual for Bicycle Traffic“ (CROW, 2016). Hinsichtlich der Anforderungen an den Entwurf von Radverkehrsanlagen wird das Radverkehrsnetz grundlegend in drei Verbindungskategorien differenziert. Die unterste Verbindungskategorie stellt das Grundnetz („basic structure“) dar, wodurch dem Radverkehr eine gewisse Grundqualität der Verbindung zur Verfügung gestellt wird. Der mittleren Verbindungskategorie, dem Hauptnetz („main cycle network“), werden Strecken mit einer Verteilerfunktion im Radverkehrsnetz zugeordnet. In dieser Verbindungskategorie soll den Radfahrern eine entsprechend hohe Qualität hinsichtlich Durchgängigkeit, Direktheit, Sicherheit, Komfort sowie Attraktivität der Radverkehrsanlage zur Verfügung gestellt werden. Die höchste Verbindungskategorie stellen Radschnellwege („bicycle highways“) dar. Radschnellwege sind regionale Routen mit höchsten Anforderungen an die Entwurfsqualität und den Verkehrsablauf, damit eine effiziente und komfortable Fahrt ermöglicht werden kann und diese auf hoch belasteten Strecken des Kfz-Verkehrs zu einer Verlagerung auf den Radverkehr führen. Die Gestaltung erfolgt für hohe Radverkehrsstärken mit hohen Geschwindigkeiten (bis zu 30 km/h) auf vergleichsweise langen Strecken (bis zu 30 km).

Anhand der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für den Kfz-Verkehr, der täglichen Kfz-Verkehrsstärke, der Verbindungskategorie des Radwegenetzes, der Straßenkategorie sowie der Lage innerhalb oder außerhalb bebauter Gebiete kann eine geeignete Führungsform für den Radverkehr anhand von Grenzwerten gewählt werden (vgl. Tab. 2-5).

innerhalb bebauter Gebiete						
Straßen- kategorie	zul. Höchstge- schwindigkeit für Kfz [km/h]		DTV [Kfz/d]	Verbindungskategorie des Radwegenetzes		
				Grundnetz (< 750 Rad/d)	Hauptnetz ($500 - 2.500$ Rad/d)	Radschnellweg (> 2.000 Rad/d)
Wohnstraße („residential road“)	Schrittgeschwin- digkeit oder 30		< 2.500	Mischverkehr	Mischverkehr / Fahrradstraße	Fahrradstraße (mit Vorrang)
			$2.000 - 5.000$		Mischverkehr / Radfahrstreifen	Radweg / Radfahrstreifen (mit Vorrang)
			> 4.000	Radfahrstreifen / Radweg		
Verteilerstraße („distributor road“)	50	2 x 1 FS	-	Radweg		
		2 x 2 FS				
	70			Radweg mit oder ohne Zulassung von Mopeds		
außerhalb bebauter Gebiete						
Straßen- kategorie	zul. Höchstge- schwindigkeit für Kfz [km/h]		DTV [Kfz/d]	Verbindungskategorie des Radwegenetzes		
				Grundnetz	Hauptnetz oder Radschnellweg (> 500 Rad/d)	
Wohnstraße („residential road“)	60 (oder 30)		< 2.500	Mischverkehr	Fahrradstraße falls $q_{Kfz} < q_{Rad}$ Radweg falls $q_{Kfz} > q_{Rad}$	
			$2.000 - 3.000$	Radweg, ggf. Radfahrstreifen		
			> 3.000	Radweg		
Verteilerstraße („distributor road“)	80		-	Radweg mit oder ohne Zulassung von Mopeds		

Tab. 2-5: Führungsform des Radverkehrs in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für den Kfz-Verkehr, der täglichen Kfz-Verkehrsstärke, der Verbindungskategorie des Radwegenetzes, der Straßenkategorie sowie der Lage innerhalb oder außerhalb bebauter Gebiete nach CROW (2016)

Radwege stellen nach dem „Design Manual for Bicycle Traffic“ (CROW, 2016) die sicherste und komfortabelste Möglichkeit für den Radverkehr in innerstädtischen Gebieten dar, da mögliche Konfliktstellen mit dem Kfz-Verkehr reduziert werden. Innerhalb von geschlossenen Ortschaften sind Mopeds auf Radwegen grundsätzlich nicht erlaubt, außerhalb geschlossener Ortschaften besteht allerdings eine Benutzungspflicht. Radwege sollen im innerstädtischen Bereich aus Gründen der Verkehrssicherheit grundsätzlich für den Einrichtungsradverkehr geplant werden. Dennoch können innerorts Zweirichtungsradwege bevorzugt werden, wenn bspw. dadurch Kreuzungs- und Wendemanöver auf der Fahrbahn vermieden werden können oder die Einrichtung von beidseitigen Einrichtungsradwegen aus Platzgründen nicht möglich ist. Die Breite der baulichen Trennung zur Kfz-Fahrbahn wird in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bestimmt. Bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h ist grundsätzlich ein Trennstreifen von $\geq 1,00$ m Breite erforderlich. Aufgrund von geringen Platzverhältnissen kann in Ausnahmefällen ein schmalerer Trennstreifen mit mindestens 0,35 m Breite realisiert werden.

Bei Zweirichtungsradwegen sollte aus Sicherheitsgründen immer mindestens der Mittelstreifen markiert werden, um Konflikte und Kollisionen mit entgegenkommenden Rad- oder Mopedfahrern zu reduzieren. Dieses Gefährdungspotenzial hängt direkt mit der Auslastung des Zweirichtungsradwegs zusammen. In Einzelfällen kann auch eine bauliche, aber dennoch überfahrbare Trennung realisiert werden. Gestaltet werden Radwege grundsätzlich für eine Radverkehrsgeschwindigkeit von 30 km/h im Hauptnetz bzw. 20 km/h im Grundnetz. Die erforderlichen Breiten im Hauptnetz werden in CROW (2016) in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke des Radverkehrs angegeben (vgl. Tab. 2-6).

Radwege ohne Zulassung von Mopeds			
Einrichtungsradschweg		Zweirichtungsradschweg	
Radverkehrsstärke in der Spitzenstunde je Fahrtrichtung [Rad/h]	Erforderliche Breite [m]	Radverkehrsstärke in der Spitzenstunde in beiden Fahrtrichtungen [Rad/h]	Erforderliche Breite [m]
0 – 150	2,00	0 – 50	2,50
150 – 750	2,50 – 3,00	50 – 150	2,50 – 3,00
> 750	3,50 – 4,00	150 – 350	3,50 – 4,00
		> 350	4,50
Radwege mit Zulassung von Mopeds			
Einrichtungsradschweg		Zweirichtungsradschweg	
Radverkehrsstärke in der Spitzenstunde je Fahrtrichtung [Rad/h]	Erforderliche Breite [m]	Radverkehrsstärke in der Spitzenstunde in beiden Fahrtrichtungen [Rad/h]	Erforderliche Breite [m]
0 - 150	2,00	0 – 50	2,50
150 - 375	3,00	50 – 150	3,00
> 375	4,00	150 – 300	4,00
		> 300	5,00

Tab. 2-6: Breitenbedarf von Radwegen mit und ohne Zulassung von Mopeds nach CROW (2016)

Sofern aufgrund mangelnder Flächenverfügbarkeit auf einer Verteilerstraße („distributor road“) innerorts eine Führung des Radverkehrs auf beidseitigen Einrichtungsradschwegen nicht möglich ist, kann ein Radfahrstreifen mit einer Breite von 2,00 m zur Gewährleistung einer ausreichenden Verkehrsqualität angelegt werden. Dabei ist der Radfahrstreifen über die gesamte Fläche rot zu markieren sowie eine Kennzeichnung mithilfe des Radsymbols vorzunehmen. Es wird grundsätzlich empfohlen, die zulässige Höchstgeschwindigkeit für den Kfz-Verkehr auf 30 km/h zu reduzieren, sobald der Radverkehr auf der Fahrbahn geführt wird. Die Vorgaben bzgl. der Dimensionierung orientieren sich an der Tatsache, dass ein Nebeneinanderfahren bzw. eine Überholung auf dem Radfahrstreifen ohne ein Ausweichen auf die Kfz-Fahrbahn stets gewährleistet werden soll. Die Markierung kann in Abhängigkeit von den verkehrlichen Randbedingungen (z. B. Wohnstraße oder Verteilerstraße) sowohl anhand von unterbrochenen als auch mit durchgängigen, 0,10 m breiten Linien vorgenommen werden. Außerhalb bebauter Gebiete kann der Radverkehr ausschließlich in Wohnstraßen bei Fahrbahnbreiten zwischen 5,80 m und 7,90 m auf einem Radfahrstreifen geführt werden.

Eine Fahrradstraße kann grundsätzlich mit entsprechend vorrangiger Führung des Radverkehrs dort vorgesehen werden, wo bspw. die Verkehrsstärke des Radverkehrs höher ist als die Kfz-Verkehrsstärke, kein ausreichender Platz für eine separate Führung von Kfz- und Radverkehr verfügbar ist oder der Radverkehr gefördert und der Kfz-Verkehr entsprechend reduziert werden soll. Die Breite einer Fahrradstraße wird maßgeblich von den jeweils vorliegenden Randbedingungen beeinflusst, sollte jedoch mindestens 4,50 m betragen.

Während die ersten Radschnellwege in den Niederlanden vorwiegend innerhalb von bebauten Gebieten angelegt wurden, sind neuere Ausführungen insbesondere als Verbindung wichtiger regionaler Zentren und als Zubringer in die Städte entstanden. Um eine direkte Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr auf den Radverkehr zu erreichen, werden Anforderungen an eine hohe Fahrtgeschwindigkeit und eine Wartezeitminimierung an Knotenpunkten gestellt. Aus diesem Grund, aber auch im Hinblick auf die Verkehrssicherheit und die Schadstoffemissionen, wird angestrebt, die Radverkehrsanlagen in städtischen Bereichen durch ruhige Nebenstraßen mit entsprechender Bevorrechtigung zu führen. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass weiterhin eine direkte Verbindung realisiert wird. Für die Dimensionierung wird ein Breitenbedarf von 1,00 m pro Radfahrer angesetzt. Der Breitenbedarf von Radschnellwegen mit und ohne baulich getrennte Fahrtrichtungen ist in Tab. 2-7 dargestellt.

Radschnellwege mit baulich getrennten Fahrtrichtungen		
	Breite [m]	Erläuterung
Breite einer Fahrbahn	3,00	3 x 1,00 m je Fahrtrichtung
Mittelinsel	≥ 0,50	-
Sicherheitsstreifen bei Abgrenzung durch Randsteine oder Pflanzen	0,50	0,25 m je erforderlicher Abtrennung und je Fahrtrichtung
Gesamtbreite	≥ 7,00	-
Radschnellwege ohne baulich getrennte Fahrtrichtungen		
	Breite [m]	Erläuterung
Breite der Fahrbahn	4,00	4 x 1,00 m
Sicherheitsstreifen bei Abgrenzung durch Randsteine oder Pflanzen	0,50	0,25 m je erforderlicher Abtrennung und je Fahrtrichtung
Zuschlag bei hoher Radverkehrsstärke oder hoher Geschwindigkeitsunterschiede (z. B. Mopeds)	0,50 bis 1,00	> 3.000 Rad/24h
Abzug bei geringer Radverkehrsstärke oder unwesentlichen Geschwindigkeitsunterschieden	0,50 bis 1,00	< 1.000 Rad/24h

Tab. 2-7: Breitenbedarf von Radschnellwegen nach CROW (2016)

Schweiz

In der Schweiz dient die Arbeitshilfe „Anlagen für den Veloverkehr“ (TBA, 2018) der Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern als Zusammenstellung der Umsetzungsmöglichkeiten aktueller Praxiserkenntnisse und Forschungsergebnisse hinsichtlich des Entwurfs von Radverkehrsanlagen. Die Inhalte beruhen auf derzeit gültigen Gesetzen, Verordnungen und verschiedenen VSS-Normen. Das Handbuch „Planung von Velorouten“ des Bundesamtes für Straßen (ASTRA, 2008) dient als Unterstützung für die Planung und Umsetzung nutzerfreundlicher, sicherer und kontinuierlicher Radverkehrsnetze und stellt ein Instrument für die Realisierung zusammenhängender Velorouten dar. In dem Kontext ist es – neben den bereits bestehenden Normen, Richtlinien und Empfehlungen, die sich nahezu ausschließlich auf einzelne Verkehrsanlagen beziehen – als Erweiterung und weitere Hilfe für die Praxis anzusehen. Im Vordergrund steht der gesamte Planungsprozess, beginnend bei der anfänglichen, übergeordneten Netzplanung bis hin zur endgültigen Projektierung. Der Forschungsbericht „Grundlagen für die Dimensionierung von sicheren Veloverkehrsanlagen“ (VSS, 2016) dient als Sammlung der wesentlichen Gestaltungsparameter von Radverkehrsanlagen. Es werden Empfehlungen für die Wahl der im Einzelfall zu verwendenden Führungsform und deren Dimensionierung gegeben.

Hinsichtlich der Führungsformen wird in der Schweiz grundsätzlich zwischen

- Mischverkehr auf der Fahrbahn,
- Radstreifen, die sowohl getrennt als auch gemeinsam (d. h. im Mischverkehr) mit dem Kfz-Verkehr auf der Fahrbahn geführt werden können,
- Velowegen (separate Radwege oder gemeinsame Geh- und Radwege) und
- Velostraßen (Fahrradstraßen)

differenziert. Die Wahl der geeigneten Führungsform hängt in der Praxis immer von den Randbedingungen des Einzelfalls ab. Anhand der Tab. 2-8 kann in Abhängigkeit von der Kfz-Verkehrsstärke, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der Radverkehrsstärke eine empfohlene Führungsform bestimmt werden. (VSS, 2016).

Geschwindigkeit (MIV) [km/h]	DTV [Kfz/d]	Radverkehr	Schulweg	empfohlene Führungsform				
30	≤ 5.000	viel	nein	Mischverkehr	oder	Fahrradstraße		
			ja	Mischverkehr	oder	Fahrradstraße		
		wenig	nein	Mischverkehr				
			ja	Mischverkehr				
	> 5.000	viel	nein	Radstreifen	evtl.	Fahrradstraße	evtl.	Radweg
			ja	Radstreifen	evtl.	Fahrradstraße	evtl.	Radweg
		wenig	nein	Mischverkehr	evtl.	Radstreifen		
			ja	Mischverkehr	evtl.	Radstreifen	evtl.	Radweg
50 oder 60	≤ 5.000	viel	nein	Radstreifen	oder	Radweg	oder	Radfahrstreifen
			ja	Radstreifen	oder	Radweg	oder	Radfahrstreifen
		wenig	nein	Mischverkehr	oder	Radstreifen		
			ja	Radstreifen	oder	Radfahrstreifen	evtl.	Mitben. Gehweg
	> 5.000	viel	nein	Radstreifen	oder	Radweg	evtl.	Radfahrstreifen
			ja	Radweg	oder	unabh. Führung		
		wenig	nein	Radstreifen	oder	Radweg	evtl.	Radfahrstreifen
			ja	Radweg	oder	unabh. Führung	evtl.	Geh- u. Radweg
80	≤ 5.000	viel	nein	Radweg	oder	Radfahrstreifen	oder	unabh. Führung
			ja	Radweg	oder	Radfahrstreifen	oder	unabh. Führung
		wenig	nein	Geh- u. Radweg	oder	unabh. Führung		
			ja	Geh- u. Radweg	oder	unabh. Führung		
	> 5.000	viel	nein	Radweg	oder	Geh- u. Radweg	oder	unabh. Führung
			ja	Radweg	oder	Geh- u. Radweg	oder	unabh. Führung
		wenig	nein	Geh- u. Radweg	oder	unabh. Führung		
			ja	Geh- u. Radweg	oder	unabh. Führung		

Tab. 2-8: Empfohlene Führungsform des Radverkehrs in Abhängigkeit von der Kfz-Verkehrsstärke, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der Radverkehrsstärke gemäß VSS (2016)

Radstreifen stellen eine Führungsform des Radverkehrs auf Fahrbahnniveau dar. Ihre Ausführung erfolgt sowohl mit unterbrochenen als auch mit durchgehenden Trennlinien, um eine Abgrenzung zum Kfz-Verkehr zu erreichen. Dabei stellt die letztgenannte Markierungsart eher eine Ausnahme dar, welche nur punktuell und räumlich begrenzt (z. B. aus Gründen der Verkehrssicherheit) beim Übergang zwischen Radstreifen und gemeinsamen Geh- und Radwegen, vor Knotenpunkten und Kreisverkehren oder bei unübersichtlichen Rechtskurven zur Anwendung kommt (VSS, 2016). Anlagen mit unterbrochener Linie dürfen – wie in Deutschland auf Schutzstreifen – im Bedarfsfall und wenn der Radverkehr nicht behindert wird auch vom Kfz-Verkehr genutzt werden. Im Gegensatz dazu dürfen durchgezogene Linien, entsprechend dem Radfahrstreifen in Deutschland, vom Kfz-Verkehr weder überfahren noch überquert werden. Darüber hinaus besteht aber auch für die Radfahrer die Pflicht, sich lediglich innerhalb des Radstreifens aufzuhalten, so dass eine entsprechende Breite der Radverkehrsanlage erforderlich ist.

Der Breitenbedarf von Radstreifen ist in Tab. 2-9 zusammengefasst. Im Anwendungsfall erfolgt die tatsächliche Bemessung anhand des maßgebenden Begegnungsfalles auf der Verkehrsanlage (TBA, 2018). Ein Breitenverhältnis zwischen Fahrbahn und Radfahrstreifen von zwei zu eins sollte grundsätzlich realisiert werden. Des Weiteren gelten die Werte nur, wenn zudem eine lichte Breite von 0,50 m gegenüber festen Hindernissen und 0,30 m gegenüber Anlagen des Straßeneigentümers (z. B. Signale, Brückengeländer, Zäune oder Hecken) eingehalten wird. Abweichungen von der angegebenen Normalbreite sollten nur dann vorgenommen werden, wenn dementsprechend günstige oder ungünstige Verhältnisse vorliegen und auch zukünftig zu erwarten sind. Dabei sollte stets beachtet werden, dass Überholvorgänge zwischen zwei Fahrrädern normalerweise nicht innerhalb eines Radstreifens möglich sind und es in solchen Fällen immer zu Konfliktsituationen mit dem motorisierten Verkehr kommt. Ein entsprechender Breitenzuschlag mithilfe der aufgeführten Überbreiten ist daher vorzusehen, wenn bspw. eine Steigung ≥ 4 %, ein DTV > 15.000 Kfz/d oder ein Schwerverkehrsanteil > 6 % vorliegt.

Es wird davon ausgegangen, dass die angeordneten Radstreifen zumeist beidseitig zur Fahrbahn angelegt werden. Bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit ≤ 50 km/h und einem Gefälle von mehr als 6 % (bzw. zwischen 3 % und 6 % bei einem DTV < 10.000 Kfz/d) ist eine Markierung des abwärts führenden Radstreifens nicht zwingend erforderlich. Eine rote Einfärbung der Radstreifen wird grundsätzlich nur dann vorgenommen, wenn z. B. in Verzweigungsbereichen eine erhöhte Gefahr aufgrund ungünstiger Verkehrs- und Sichtverhältnisse besteht, sodass es zu Konflikten zwischen Radfahrern und dem querenden Kfz-Verkehr kommt. Insgesamt sollten diese farbigen Markierungen nur in Ausnahmefällen angewandt werden (TBA, 2018).

Ausgewiesene Velowege entlang einer Straße dienen im Wesentlichen der räumlichen Trennung des Kfz- und Radverkehrs. Sie werden parallel zur Kfz-Fahrbahn geführt, sind jedoch baulich durch einen Trennstreifen abgetrennt (TBA, 2018). Falls ein ausschließlich für den Radverkehr vorbehaltener Radweg vorhanden ist, besteht auch eine Benutzungspflicht für die Radfahrer. Gemeinsame Geh- und Radwege im innerstädtischen Bereich sollen grundsätzlich vermieden und falls möglich durch separat geführte Rad- und Gehwege ersetzt werden. Außerorts sind gemeinsame Führungen möglich, falls dem Fuß- und/oder dem Radverkehr von vornherein nur eine geringe Bedeutung zugemessen wird. In Tab. 2-9 ist der Breitenbedarf von Velowegen dargestellt. Anwendungsvoraussetzung ist auch hier, dass lichte Breiten von 0,50 m gegenüber festen Hindernissen und 0,30 m gegenüber Anlagen des Straßeneigentümers eingehalten werden. Die angegebenen Minderbreiten können realisiert werden, wenn bspw. eine Strecke mit geringem Rad- und Fußverkehrspotenzial vorliegt oder die Strecke ein beidseitig freies Lichtraumprofil von mehr als 0,50 m aufweist. Falls bspw. eine Steigung > 4 %, ein fehlendes seitliches Lichtraumprofil oder eine Strecke mit hohem Rad- und Fußverkehrspotenzial vorliegt, sind dagegen Breitenzuschläge von mindestens 0,50 m erforderlich. Grundsätzlich soll eine Längsneigung von ≤ 3 % für lange Abschnitte, ≤ 5 % für Strecken bis 100 m und ≤ 10 % für Rampen bis 20 m eingehalten werden.

Führungsform	Normalbreite [m]	Minderbreite [m]	Überbreite [m]
Radstreifen			
- innerorts	1,50	im konkreten Einzelfall zu entscheiden	1,55 – 1,85
- außerorts	1,80		1,85 – 2,00
zwischen Fahrstreifen			
- innerorts	1,80		1,85 – 2,00
- außerorts	2,00		-
Veloweg			
- Einrichtungsrادweg	2,50	$\geq 1,50$	3,00
- Zweirichtungsrادweg	3,00	$\geq 2,50$	3,50 – 4,50
- Trennstreifen zw. Radweg und Fahrbahn	1,00	0,80	max. 2,00
Velobahn			
- Einrichtungsrادweg	3,00	-	-
- Zweirichtungsrادweg	4,00 - 5,00	-	-
- Fahrradstraße	5,00	-	-

Tab. 2-9: Breitenbedarf von Radverkehrsanlagen gemäß TBA (2018) und ASTRA (2015)

Das Grundlegendokument „Velobahnen“ (ASTRA, 2015) ordnet die bislang auf internationaler Ebene bestehenden Planungsgrundsätze für Radschnellwege in den Kontext der schweizerischen Regelwerke und Normen ein. Der Begriff „Velobahn“ bezeichnet eine Verbindung, welche qualitativ hochwertig wichtige Ziele miteinander verbindet und ein entsprechend komfortables Fahren ermöglicht. Aufgrund der übergeordneten Zielsetzung – einer verkürzten Fahrtzeit für den Radverkehr – und den daraus resultierenden Entwurfsanforderungen entsprechen Velobahnen den Radschnellwegen in Deutschland. Velobahnen können sowohl außerorts – wenn möglich auf separaten, vom Kfz-Verkehr getrennten Trassen – als auch innerorts unter Mitbenutzung der Kfz-Fahrbahn angeordnet werden. Um hohe Fahrtgeschwindigkeiten und möglichst unterbrechungsfreie Fahrten zu gewährleisten, sollten Knotenpunkte möglichst planfrei realisiert werden. An vorfahrtgeregelten Knotenpunkten sollte der Radverkehr mit Vorrang geführt oder an Lichtsignalanlagen priorisiert gesteuert werden. Die erforderlichen Breiten einer Velobahn richten sich nach dem Platzbedarf für das Nebeneinanderfahren bzw. dem Begegnungsfall zwischen Radfahrern. Basierend auf Erfahrungswerten ist eine Breite von 4,00 m für das Nebeneinanderfahren von zwei Radfahrern bei gleichzeitiger Überholung oder Begegnung mit einem dritten Radfahrer erforderlich. Eine Breite von 5,00 m wird

für das Nebeneinanderfahren von zwei Radfahrern bei gleichzeitiger Überholung oder Begegnung mit zwei weiteren Radfahrern benötigt.

USA

Der „Urban Bikeway Design Guide“ (NACTO, 2014) enthält, ergänzend zu den geltenden Handbüchern wie dem „Guide for the Development of Bicycle Facilities“ (AASHTO, 2012) und dem „Manual on Uniform Traffic Control Devices“ (FHWA, 2009), praxisorientierte Planungs- und Entwurfsgrundlagen für Radverkehrsanlagen in den USA. Grundsätzlich wird in den USA bei Radverkehrsanlagen zwischen Radfahrstreifen („Bike Lane“), Radwegen („Cycle Track“) und Fahrradstraßen mit einer Priorisierung des Radverkehrs („Bicycle Boulevards“) differenziert. Die Wahl einer geeigneten Führungsform hängt in der Praxis immer von den Randbedingungen des Einzelfalls ab. Maßgebenden Einfluss hat dabei die zulässige Höchstgeschwindigkeit für den Kfz-Verkehr, die durchschnittliche tägliche Kfz-Verkehrsstärke, die Verbindungsfunktion der Straße, die Flächenverfügbarkeit, das Fahrradkollektiv sowie die anhand des HCM (TRB, 2016) ermittelte Verkehrsqualität.

Radfahrstreifen liegen an den Rändern der Kfz-Fahrbahn und dürfen ausschließlich durch Radfahrer befahren werden. Für die Radfahrer wird eine Fläche bereitgestellt, auf der ohne Interaktionen mit dem Kfz-Verkehr die Geschwindigkeit und das Fahrverhalten frei gewählt werden kann. Dennoch kann es in manchen Fällen bspw. zum Überholen anderer Radfahrer erforderlich sein, den Radfahrstreifen zu verlassen. Eine räumliche Trennung vom Kfz-Verkehr erfolgt dabei durch eine 0,10 bis 0,15 m breite, durchgehende Markierung (AASHTO, 2012).

Bei Streckenabschnitten mit hohen Verkehrsstärken, zulässigen Höchstgeschwindigkeiten ≥ 35 mph (ca. 56 km/h) oder hohen Schwerverkehrsanteilen kann ein größerer Abstand zwischen dem Kfz- und dem Radverkehr mithilfe von Radfahrstreifen mit Sicherheitszone („Buffered Bike Lane“) realisiert werden (AASHTO, 2012). Dabei handelt es sich um normale Radfahrstreifen, für die als Trennung zwischen Kfz- und Radverkehr eine zusätzliche Sicherheitszone markiert wird. Die Trennung vom Kfz-Verkehr erfolgt durch zwei durchgehende Markierungen (innen 0,10 m breit, außen 0,15 bis 0,20 m breit) und eine diagonale Schraffur. Grundsätzlich ist eine Mindestbreite von 0,45 m für die Sicherheitszone vorgesehen. Die zusätzliche Sicherheitszone fördert das subjektive Sicherheitsgefühl der Radfahrer und ermöglicht ein Überholen anderer Radfahrer ohne Benutzung der Kfz-Fahrbahn. Grundsätzlich können ebenfalls Radfahrstreifen realisiert werden, auf denen der Radverkehr in der entgegengesetzten Fahrtrichtung des Kfz-Verkehrs geführt wird („Contra-flow Bike Lane“). Hierbei ist eine Trennung vom Kfz-Verkehr durch zwei durchgehende gelbe Markierungen notwendig, um den Radverkehr deutlich vom entgegengesetzt fahrenden Kfz-Verkehr abzugrenzen. An Einbahnstraßen mit viel Lieferverkehr, vielen ÖPNV-Haltestellen oder häufigen Parkmanövern ist die Führung des Radverkehrs auf linksseitigen Radfahrstreifen („Left-Side Bike Lane“) möglich (NACTO, 2014). Hierbei handelt es sich um normale Radfahrstreifen, welche aber auf der linken Seite der Fahrbahn angeordnet werden. Die grundsätzliche Gestaltung erfolgt dabei wie für normale Radfahrstreifen.

Auf Radwegen wird der Radverkehr baulich getrennt von der Kfz-Fahrbahn und mindestens durch Markierungen vom Fußverkehr separiert geführt. Radwege können im Einrichtungs- und im Zweirichtungsradverkehr angeordnet werden (AASHTO, 2012). Es ist möglich, diese auf Fahrbahn- oder Gehwegniveau sowie auf einer Zwischenebene („Raised Cycle Track“) anzuordnen. Bei der Führung des Radverkehrs auf Fahrbahnniveau kann die bauliche Trennung dabei bspw. durch einen Bordstein oder Grünstreifen erfolgen. Für die bauliche Trennung von erhöhten Radwegen zum Kfz-Verkehr können Bordsteine, niedrige Bepflanzungen sowie abgeschrägte Bordsteine (Breite $\geq 0,30$ m, Neigung 1:4) verwendet werden. Ebenfalls ist eine bauliche Trennung anhand eines Parkstreifens zwischen der Kfz-Fahrbahn und dem Radweg (Breite der baulichen Trennung $\geq 0,90$ m) möglich. Die Höhenunterschiede der Anlagen sollten dabei zwischen Kfz-Fahrbahn und Radweg 2,5 bis 15 cm und zwischen Geh- und Radweg 0 bis 12,5 cm betragen. Einseitig straßenbegleitende Zweirichtungsradwege („Two-Way Cycle Track“) können sowohl auf der Höhe der Kfz-Fahrbahn als auch erhöht angeordnet werden. Bei Zweirichtungsradwegen ist zusätzlich eine unterbrochene, gelbe Markierung als Mitteltrennlinie vorgesehen (NACTO, 2014).

Eine Übersicht des Breitenbedarfs jeder Führungsform gibt Tab. 2-10.

Führungsform	Normalbreite [m]	Minderbreite [m]	Überbreite [m]
Radfahrstreifen	≥ 1,50	≥ 1,20	≥ 1,80
- mit Sicherheitszone	≥ 1,95	-	≥ 2,10
- im Gegenverkehr	≥ 1,50	-	-
- linksseitig	≥ 1,50	-	≥ 1,80
Radweg			
- Einrichtungsradweg	≥ 1,50	-	≥ 2,10
- erhöht, eine Richtung	≥ 2,00	≥ 1,50	-
- Zweirichtungsradweg	≥ 3,65	≥ 2,40	-
- gemeinsamer Geh- u. Radweg	≥ 3,00	-	≥ 3,40

Tab. 2-10: Breitenbedarf von Radverkehrsanlagen gemäß NACTO (2014) und AASHTO (2012)

2.2 Verkehrsablauf auf Radverkehrsanlagen

2.2.1 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten

Die mittlere lokale Geschwindigkeit ist eine einfach zu erhebende Kenngröße und ein wichtiges Kriterium für die Beschreibung des Verkehrsablaufs auf einer Radverkehrsanlage. Im Gegensatz zum Kfz-Verkehr kann im Radverkehr nicht von einer grundsätzlich einheitlichen Voraussetzung für das Erreichen einer bestimmten Geschwindigkeit aller Verkehrsteilnehmer ausgegangen werden. Die Wunschgeschwindigkeit eines Radfahrers ist von individuellen Faktoren, wie bspw. dem körperlichen Leistungsvermögen, der Erfahrung im Radverkehr und den kognitiven Fähigkeiten sowie vom Fahrradtyp (muskelbetrieben oder mit elektrischer Unterstützung) abhängig. Des Weiteren haben bauliche Randbedingungen, wie bspw. die Längsneigung, die Sichtweite und die Führungsform der Radverkehrsanlage, Einfluss auf die Wunschgeschwindigkeit eines Radfahrers.

In gängigen internationalen Regelwerken zum Entwurf und zur Bemessung von Radverkehrsanlagen werden daher Bereiche für die mittlere Geschwindigkeit im Radverkehr genannt. Im amerikanischen „Guide for the Development of Bicycle Facilities“ (AASHTO, 2012) wird eine mittlere Geschwindigkeit von 13 bis 24 km/h als Bereich für einen durchschnittlichen erwachsenen Radfahrer definiert. Des Weiteren werden Bereiche der mittleren Geschwindigkeit mit Berücksichtigung des Einflusses der Längsneigung genannt. An Steigungsstrecken beträgt die mittlere Geschwindigkeit 8 bis 19 km/h und an Gefällestrecken 32 bis 50 km/h, wobei keine nähere Differenzierung anhand der Länge und der prozentualen Längsneigung der Steigungs- bzw. Gefällestrecke vorgenommen wird. Einen vergleichbaren Bereich der mittleren Geschwindigkeit von 15 bis 23 km/h definiert das niederländische „Design Manual for Bicycle Traffic“ (CROW, 2016). An Gefällestrecken kann die mittlere Geschwindigkeit bis zu 35 km/h erreichen. Des Weiteren fahren Rennradfahrer grundsätzlich mit einer höheren mittleren Geschwindigkeit von ca. 30 km/h. In den ERA (FGSV, 2010) werden für den Radverkehr an ebenen Strecken Geschwindigkeiten zwischen 20 und 30 km/h angesetzt. Auf eine erhöhte Geschwindigkeit von über 40 km/h an längeren Gefällestrecken wird ebenfalls hingewiesen. Als typische Beschleunigungsraten im Radverkehr werden in internationalen Regelwerken 0,5 bis 1,5 m/s² (AASHTO, 2012) bzw. 0,8 bis 1,2 m/s² (CROW, 2016) angegeben.

Um den Verkehrsablauf und das Geschwindigkeitsverhalten auf Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen zu analysieren, wurden u. a. in den Untersuchungen von THOMPSON et al. (1997), LIN et al. (2008), PARKIN und ROTHERAM (2010), BERNARDI und RUPI (2015), SCHLEINITZ et al. (2017) und BOUFOUS et al. (2018) Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. In der Untersuchung von PARKIN und ROTHERAM (2010) wurde anhand von Messergebnissen das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten von Radfahrern in Abhängigkeit von der Längsneigung analysiert. In der Ebene wurde eine mittlere Geschwindigkeit von 21,6 km/h erreicht. Anhand einer linearen Regression wurde eine Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit um 1,44 km/h je Prozentpunkt Gefälle und eine Reduktion um 0,86 km/h je Prozentpunkt Steigung festgestellt. Bei der Analyse des Einflusses des Geschlechts auf die mittlere Geschwindigkeit wurde ein geringer Unterschied festgestellt, wobei männliche Radfahrer mit um durchschnittlich 1,5 km/h höheren Geschwindigkeiten fahren.

Der Einfluss der Breite der Radverkehrsanlage sowie der Einfluss von Fußgängern auf die Geschwindigkeiten im Radverkehr wurde in der Untersuchung von BOUFOUS et al. (2018) analysiert. Dabei zeigte sich, dass Radfahrer mit umso höheren Geschwindigkeiten fahren, je breiter der Radweg und je ausgeprägter

die Trennung zwischen Rad- und Fußverkehr ist. Der Einfluss von Fußgängern, anderen Radfahrern (in Fahrtrichtung und Gegenrichtung) sowie des Kfz-Verkehrs auf die gefahrene Geschwindigkeit wurde in einer Untersuchung von BERNARDI und RUPI (2015) ermittelt. Dabei zeigte sich, dass bei der Führung im Mischverkehr der Schwerverkehrsanteil den größten Einfluss auf die Geschwindigkeiten der Radfahrer hat. Auf gemeinsamen Geh- und Radwegen konnten Geschwindigkeitsreduktionen bedingt durch Fußgänger um maximal 30 % festgestellt werden. Infolge anderer Radfahrer auf der Radverkehrsanlage wurde eine Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeit um bis zu 7 % ermittelt. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass die Häufigkeit von Störungen einen größeren Einfluss auf die Geschwindigkeiten hat als die Intensität der Störungen.

In den vergangenen Jahren stieg der Marktanteil an Pedelecs am Gesamtfahrradmarkt in Deutschland kontinuierlich an. Im Jahr 2017 betrug der Marktanteil bereits 19 % (ZIV, 2018). Nahezu alle verkauften Pedelecs unterstützen den Fahrer dabei mit maximal 250 Watt bis 25 km/h. Die Auswirkungen der elektrischen Unterstützung auf die Geschwindigkeiten im Radverkehr wurden u. a. in den Untersuchungen von SCHLEINITZ et al. (2017) und ALRUTZ et al. (2015) analysiert. Grundsätzlich zeigte sich, dass Pedelec-Fahrer im Mittel schneller fahren als Radfahrer ohne elektronische Unterstützung. Die mittlere Differenz zwischen muskelbetriebenen Fahrrädern und Pedelecs liegt dabei zwischen 2 und 3 km/h, wobei die mittleren Pedelec-Geschwindigkeiten im Bereich von 19 bis 24 km/h liegen. Die festgestellten Differenzen variieren in Abhängigkeit von der jeweiligen Radverkehrsanlage und dem Alter der Radfahrer. Im freien Verkehrsfluss ist die Differenz allgemein stärker ausgeprägt. Ebenfalls konnte an Steigungsstrecken eine größere Differenz festgestellt werden. Es zeigte sich allerdings, dass Pedelecs im Beschleunigungsverhalten nahezu keine Unterschiede zu muskelbetriebenen Fahrrädern aufweisen.

2.2.2 Kapazität

In der Planung, dem Management und der Bewertung von Straßenverkehrsanlagen ist die Kapazität einer Anlage eine der maßgebenden Kenngrößen. Die Kapazität ist gemäß den Begriffsbestimmungen der FGSV (2020) definiert als die „größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom unter den gegebenen baulichen, verkehrlichen und betrieblichen Bedingungen erreichen kann“. Überschreitet die Verkehrsnachfrage die Kapazität, kommt es zum Zusammenbruch des fließenden Verkehrs.

Makroskopische Modelle beschreiben den Verkehrsfluss anhand von Kenngrößen des gesamten Fahrzeugkollektivs ohne Betrachtung einzelner Fahrzeuge. Zu den makroskopischen Kenngrößen zählen die mittlere momentane Geschwindigkeit v , die Verkehrsstärke q und die Verkehrsdichte k . Der Zusammenhang zwischen q , k und v kann durch die Zustandsgleichung beschrieben werden:

$$q = k \cdot v \quad (2-1)$$

mit

q = Verkehrsstärke [Fz/h]

k = Verkehrsdichte [Fz/km]

v = mittlere momentane Geschwindigkeit [km/h]

Dementsprechend ist lediglich die Kenntnis über zwei der drei Kenngrößen erforderlich, um die Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen vollständig beschreiben zu können.

Anhand von Verkehrsflussmodellen – basierend auf dem jeweiligen q - v -Zusammenhang – kann die Kapazität als Scheitelpunkt der Modellfunktion bestimmt werden. Einen geeigneten Ansatz zur Beschreibung des fließenden und gestauten Zustands im Kfz-Verkehr anhand einer durchgehenden Funktion stellt der Ansatz nach VAN AERDE (1995) dar.

Während für den Kfz-Verkehr ein fundierter Kenntnisstand zur Ermittlung der anlagenspezifischen Kapazität vorliegt, liegen noch vergleichsweise wenige Erkenntnisse zur Kapazität von Radverkehrsanlagen vor. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass im Radverkehr bisher kaum Streckenabschnitte mit einer so hohen Nachfrage vorliegen, dass es zu kapazitätsbedingten Engpässen kommt.

Maßgebenden Einfluss auf die Anzahl der Radfahrer, die einen Querschnitt einer Radverkehrsanlage in einem Zeitintervall passieren können, hat die Breite der Radverkehrsanlage. Zur Vergleichbarkeit werden die Kapazitäten im Radverkehr daher üblicherweise in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage

ermittelt. Eine Übersicht über die Ergebnisse von Untersuchungen der Kapazitäten im Radverkehr sowie der in Regelwerken definierten Kapazitätswerte ist in Tab. 2-11 dargestellt. Die Ermittlung der Kapazität im Radverkehr erfolgte teilweise basierend auf bekannten Ansätzen aus dem Kfz-Verkehr mit der Modellierung und Analyse des Fundamentaldiagramms. Die Kapazitätswerte der einzelnen Untersuchungen weisen deutliche Unterschiede auf. Dies ist auf die Vielzahl der bisher kaum näher untersuchten baulichen und verkehrstechnischen Einflussgrößen auf die Kapazität einer Radverkehrsanlage zurückzuführen.

Quelle	Land	Kapazität [Rad/h/m]	Erläuterung
TRB (2000)	USA	1333 666	Einrichtungsradsverkehr Zweirichtungsradsverkehr
HOMBURGER (1976)	USA	2600	-
BOTMA (1995)	Niederlande	3200	-
MOHURD (2012)	China	1600 – 1800 1400 – 1600	mit räumlicher Trennung ohne räumliche Trennung
LIU et al. (1993)	China	1800 – 2100	-
JIN et al. (2015)	China	1800 2348 2727	E-Bike-Anteil = 0 % E-Bike-Anteil = 70 % E-Bike-Anteil = 100 %

Tab. 2-11: Kapazitätswerte von Radverkehrsanlagen

In der Untersuchung von JIN et al. (2015) wurden anhand der v-k-Modelle nach GREENSHIELDS (1935), GREENBERG (1959), UNDERWOOD (1961), NEWELL (1961), DRAKE et al. (1967), PIPES (1967), MACNICOLAS (2008) sowie WANG et al. (2011) Kapazitäten von insgesamt elf Radverkehrsanlagen mit unterschiedlichen Breiten in der chinesischen Großstadt Hangzhou bestimmt. Dazu wurden an den Radverkehrsanlagen die Geschwindigkeit, die Verkehrsdichte sowie die Verkehrsstärken für unterschiedliche Verkehrszustände gemessen. Zusätzlich wurden der Fahrradtyp, das Geschlecht sowie das Alter der Radfahrer erfasst. Die einzelnen v-k-Modelle wurden anhand der erhobenen empirischen Daten mit der nicht-linearen Methode der kleinsten Quadrate (LEVENBERG-MARQUARDT-Algorithmus) für jede Radverkehrsanlage kalibriert. Für jedes kalibrierte Modell der einzelnen Radverkehrsanlagen wurde eine Kapazität ermittelt. Anschließend wurden alle 88 Kapazitätswerte der einzelnen Radverkehrsanlagen gemittelt, wodurch eine Kapazität von 2.348 Rad/h/m bestimmt wurde. Anhand von Regressionsmodellen wurde der Einfluss des E-Bike-Anteils auf die Kapazität analysiert. Dabei zeigte sich, dass bei einem E-Bike-Anteil von 100 % die Kapazität 1,5-mal so hoch ist wie bei einem E-Bike-Anteil von 0 %. Des Weiteren wurde mit einer Regressionsanalyse festgestellt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Kapazität einer Radverkehrsanlage und der Breite der Radverkehrsanlage vorliegt, welches eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Anlagen gewährleistet.

2.3 Bewertung der Verkehrsqualität

2.3.1 Verfahren des HBS 2015

Bei den Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) zur Bewertung der Verkehrsqualität im Radverkehr wird nach Strecken sowie Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage differenziert.

Strecken

Das Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität auf Strecken von Radverkehrsanlagen dient dem Nachweis, dass die zu erwartende Verkehrsnachfrage mit der erwünschten Qualität abgewickelt werden kann. Das Verfahren gilt ausschließlich für Strecken im Zuge von Radwegen und Radfahrstreifen.

Die Verkehrsqualität auf Strecken wird im Wesentlichen durch die Breite der Radverkehrsanlage bestimmt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die nach den RAST (FGSV, 2006b) bzw. für außerörtliche Radverkehrsanlagen nach den RAL (FGSV, 2012) vorgesehenen Regelbreiten, die sich aus funktionalen Erfordernissen begründen, in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle eine mindestens ausreichende Verkehrsqualität gewährleisten. Daher ist nach dem HBS (FGSV, 2015a) die Bewertung der Verkehrsqualität von

Strecken im Zuge von Radwegen und Radfahrstreifen nur bei sehr hoher Verkehrsnachfrage im Radverkehr sinnvoll.

Das Verfahren bewertet nur den Einfluss der Breite von Radverkehrsanlagen auf die Verkehrsqualität des Radverkehrs. Andere Beeinträchtigungen des Radverkehrs wie unstetige Linienführung, mangelhafte Fahrbahnoberflächen oder Störungen durch andere Verkehrsarten sind nicht Gegenstand des Verfahrens.

Wesentliches Kriterium zur Bewertung der Verkehrsqualität ist die Möglichkeit der Radfahrer, sich beim Fahren im Rahmen der Streckencharakteristik und der verkehrsrechtlichen Regelungen sowie der eigenen Fähigkeiten freizügig, d. h. ohne Beeinträchtigung durch andere Radfahrer, fortzubewegen. Da vielfältige Einflussfaktoren, wie die Motivation und Kondition des einzelnen Radfahrers sowie die Ausrüstung und Ausstattung des Fahrrads, ein breites Spektrum an Geschwindigkeiten der Radfahrer zur Folge haben, wird die Störungsrate aus Überholungen oder Begegnungen, die sich in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage sowie aus punktuellen Einflüssen ergibt, als Maß für die Verkehrsqualität verwendet.

Neben der Breite der Radverkehrsanlage wird zunächst nach der Art der Nutzung der Radverkehrsanlage – Einrichtungsverkehr oder Zweirichtungsverkehr – unterschieden. Auch die Linienführung hat einen Einfluss: im Lageplan auf die Anzahl der Störungen, im Höhenplan auf die Höhe und Verteilung der Geschwindigkeiten der Radfahrer. Aufgrund nicht hinreichender Erkenntnisse werden diese jedoch nicht berücksichtigt. Das Verfahren setzt eine gestreckte Linienführung voraus.

Steigungen erhöhen zusätzlich den Breitenbedarf der Radfahrer. Dies wird dadurch berücksichtigt, dass die Breite der Radverkehrsanlage in Abhängigkeit von der Steigung auf ein fiktives Maß reduziert wird.

Die Radverkehrsstärke ist die wesentliche Einflussgröße für die Anzahl der Überholungen auf Radverkehrsanlagen mit Einrichtungsverkehr und für die Anzahl der Begegnungen auf Radverkehrsanlagen mit Zweirichtungsverkehr. Die Zusammensetzung des Fahrradkollektivs ist in der Regel sehr heterogen, dies wird durch eine Verteilung der Geschwindigkeiten berücksichtigt. Fahrräder mit Elektroantrieb werden dabei vereinfachend wie normale Fahrräder behandelt.

Zusätzliche Einflüsse können sich aus überbreiten Fahrrädern (z. B. Dreiräder, Fahrräder mit Anhänger) ergeben. Sie werden im Verfahren dadurch berücksichtigt, dass die Breite der Radverkehrsanlage auf ein fiktives Maß reduziert wird.

Nach Festlegung der fiktiven Breite einer Radverkehrsanlage zur Berücksichtigung von Steigungen und überbreiten Fahrrädern für jede Teilstrecke der betrachteten Strecke werden die Überholungsrate auf Strecken mit Einrichtungsverkehr bzw. die Begegnungsrate auf Strecken mit Zweirichtungsverkehr in Abhängigkeit von der Radverkehrsstärke bestimmt und daraus die Störungsrate aus Überholungen bzw. Begegnungen in Abhängigkeit von der fiktiven Breite der Radverkehrsanlage ermittelt. Zusätzlich erfolgt die Bestimmung der Störungsrate aus punktuellen Störeinflüssen aus unmittelbar an die Radverkehrsanlage angrenzenden, lokal begrenzten Flächen wie z. B. Haltestellen des ÖPNV. Die gesamte Störungsrate einer Teilstrecke ergibt sich durch Addition der zuvor bestimmten einzelnen Störungsraten.

Aus den Störungsdaten der einzelnen Teilstrecken wird abschließend eine Störungsrate der gesamten Strecke gebildet. Die Bewertung der Verkehrsqualität der gesamten Strecke erfolgt durch Zuordnung dieser Störungsrate zu einer Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs gemäß Tab. 2-12.

QSV	Störungsrate SR [S/(Rad · km)]	
	Einrichtungsverkehr	Zweirichtungsverkehr
A	< 1	< 10
B	< 3	< 30
C	< 5	< 50
D	< 10	< 100
E	> 10	> 100
F	– ¹⁾	– ¹⁾

¹⁾ Die QSV F kann mit diesem Kriterium nicht zutreffend definiert werden.

Tab. 2-12: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs auf Strecken im Zuge von Radwegen und Radfahrstreifen in Abhängigkeit von der Störungsrate nach dem HBS (FGSV, 2015a)

Dem Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) liegen empirisch abgeleitete Werte für die mittlere Geschwindigkeit der Radfahrer und die Standardabweichung der Geschwindigkeiten zu Grunde. Die tatsächliche mittlere Geschwindigkeit der Radfahrer und deren Standardabweichung können je nach Lage und Bedeutung der Radverkehrsanlage und für unterschiedliche Nutzergruppen von diesen Werten abweichen. Nach dem HBS (FGSV, 2015a) können diese in solchen Fällen als spezifische Parameter durch Geschwindigkeitsmessungen bestimmt werden. Dazu ist es in der Regel ausreichend, die Geschwindigkeiten von 100 frei fahrenden Radfahrern zu erfassen.

Das HBS (FGSV, 2015a) ermöglicht auch die Anwendung alternativer Verfahren, wenn die für das Verfahren definierten Randbedingungen nicht gegeben sind, z. B. weil der Einfluss von Begegnungen auf Überholungen im Zweirichtungsverkehr analysiert werden soll. In solchen Fällen kann die Bewertung mit Hilfe anderer geeigneter Verfahren wie beispielsweise der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation erfolgen. Dabei muss das im Berechnungsverfahren zu Grunde gelegte Qualitätskriterium – hier die Störungsrate – als Ergebnisgröße ermittelt werden, um die Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs bestimmen zu können. Dafür sind Einzelstörungen aus Begegnungen und Überholungen zu bestimmen. Das kann durch Simulation und Gewichtung der seitlichen Annäherung der Radfahrer untereinander auf der tatsächlichen Breite der Radverkehrsanlage oder pauschal über die fiktive Breite der Radverkehrsanlage geschehen.

Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage

Das für den Radverkehr maßgebende Kriterium für die Bestimmung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage ist die maximale Wartezeit, die auf die vollständige Querung einer Zufahrt bezogen ist. Dies gilt auch dann, wenn der Radverkehr auf der Fahrbahn gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr geführt wird. In Tab. 2-13 sind die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage angegeben.

QSV	Kfz-Verkehr mittlere Wartezeit t_w [s]	ÖPNV auf Sonderfahstreifen ¹⁾ mittlere Wartezeit t_w [s]	Fußgänger- und Radverkehr ²⁾ maximale Wartezeit $t_{w,max}$ [s]
A	≤ 20	≤ 5	≤ 30
B	≤ 35	≤ 15	≤ 40
C	≤ 50	≤ 25	≤ 55
D	≤ 70	≤ 40	≤ 70
E	> 70	≤ 60	≤ 85
F	– ³⁾	> 60	> 85 ⁴⁾

¹⁾ Die Werte gelten auch für den ÖPNV, der durch eine verkehrsabhängige Steuerung priorisiert wird.

²⁾ Die Grenzwerte gelten für den Radverkehr auch, wenn er auf der Fahrbahn gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr geführt wird.

³⁾ Die QSV F ist erreicht, wenn die nachgefragte Verkehrsstärke q über der Kapazität C liegt ($q > C$).

⁴⁾ 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. 2-13: Grenzwerte für die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der verschiedenen Verkehrsarten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage nach dem HBS (FGSV, 2015a)

Die maximale Wartezeit im Radverkehr entspricht bei gemeinsamer Führung mit dem Fußgängerverkehr im Seitenraum der Sperrzeit des Fußgänger- und Radverkehrsstroms, bei gemeinsamer Führung mit dem Kfz-Verkehr auf der Fahrbahn der Sperrzeit des zugehörigen Kfz-Verkehrsstroms und bei Führung auf einem Radfahrstreifen mit gesonderter Signalisierung der Sperrzeit des Radverkehrsstroms. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Rückstau von Radfahrern bei Freigabezeitende nicht auftritt. Die maximale Wartezeit ist für jede Querungsrichtung gesondert zu bestimmen und einer Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs zuzuordnen.

Bei Querung einer Zufahrt über zwei durch eine Mittelinsel getrennte Furten sind zusätzlich die Wartezeiten auf der Mittelinsel zu berücksichtigen. Die Bestimmung der maximalen Wartezeit bei Querung einer Zufahrt über mehr als zwei durch Verkehrsinseln getrennte Furten sowie bei Querung von zwei Zufahrten (zur

Beurteilung der Verkehrssituation von Radfahrern, die die diagonal gegenüberliegende Ecke eines Knotenpunkts erreichen wollen) wird im HBS (FGSV, 2015a) gesondert behandelt.

Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage

An Einmündungen und Kreuzungen mit Vorfahrtbeschilderung hat die Führungsform des Radverkehrs einen wesentlichen Einfluss. Radverkehr im Mischverkehr auf der Fahrbahn (mit oder ohne Schutzstreifen) wird im Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr behandelt. Radverkehr auf Radverkehrsanlagen (Radfahrstreifen, Radweg oder gemeinsamer Geh- und Radweg) wird gesondert behandelt. Die Verkehrsqualität für Radfahrer, die an Kreisverkehren im Seitenraum geführt werden und die Fahrbahn überqueren, lässt sich mit dem Verfahren nicht bewerten; hier können alternative Verfahren angewendet werden.

Für Radverkehrsströme auf der Fahrbahn sowie auf Radverkehrsanlagen an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage dient die mittlere Wartezeit als Qualitätskriterium. Zur Einteilung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs gelten dabei unterschiedliche Grenzwerte der mittleren Wartezeit (vgl. Tab. 2-14).

QSV	mittlere Wartezeit t_w [s]			
	Regelung durch Vorfahrtbeschilderung		Regelung „rechts vor links“	
	Fahrzeugverkehr auf der Fahrbahn	Radverkehr auf Radverkehrsanlagen und Fußgänger	Kreuzung	Einmündung
A	≤ 10	≤ 5	} ≤ 10	} ≤ 10
B	≤ 20	≤ 10		
C	≤ 30	≤ 15	≤ 15	} ≤ 15
D	≤ 45	≤ 25	≤ 20	
E	> 45	≤ 35	≤ 25	≤ 20
F	– ¹⁾	> 35	> 25 ²⁾	> 20 ²⁾

¹⁾ Die QSV F ist erreicht, wenn die nachgefragte Verkehrsstärke q_i über der Kapazität C_i liegt ($q_i > C_i$).

²⁾ In diesem Bereich funktioniert die Regelungsart „rechts vor links“ nicht mehr.

Tab. 2-14: Grenzwerte für die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der verschiedenen Verkehrsarten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage nach dem HBS (FGSV, 2015a)

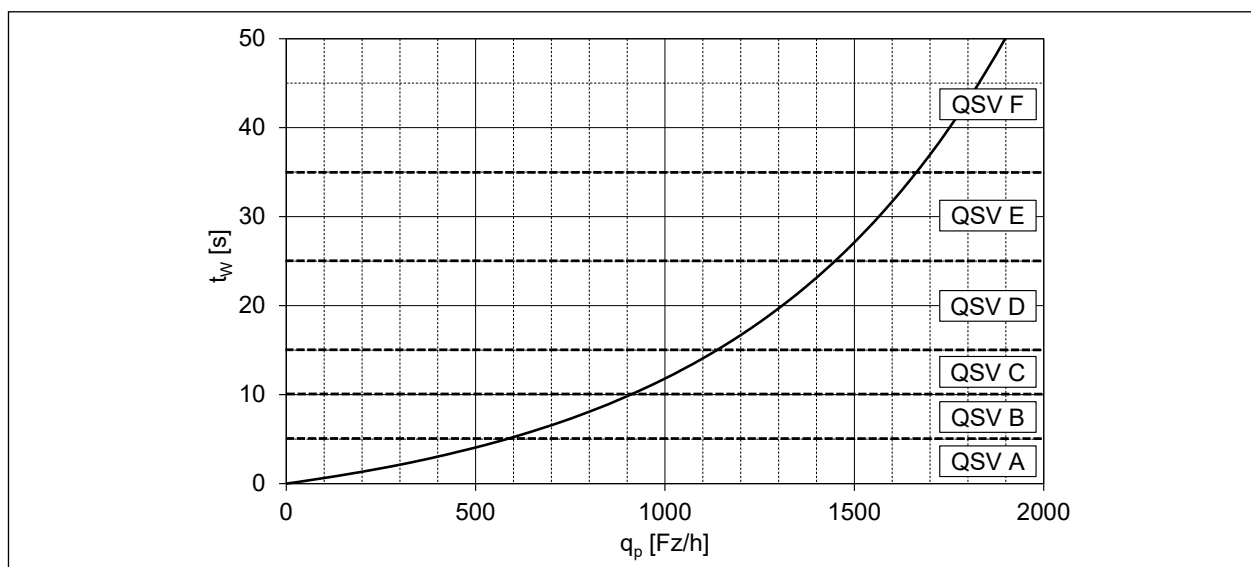


Bild 2-3: Mittlere Wartezeit für Fußgänger- und Radverkehrsströme in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke der maßgebenden Hauptströme an Einmündungen und Kreuzungen mit Vorfahrtbeschilderung nach dem HBS (FGSV, 2015a)

Die mittlere Wartezeit für den Radverkehr auf Radverkehrsanlagen an Einmündungen und Kreuzungen mit Vorfahrtbeschilderung ergibt sich in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke der maßgebenden vorfahrtberechtigten Ströme (Hauptströme) nach Bild 2-3. Für Radfahrer, die auf der Fahrbahn geführt werden, gelten die für den Fahrzeugverkehr bestimmten mittleren Wartezeiten.

2.3.2 Verfahren nach den RIN-Hinweisen

Die RIN (FGSV, 2008) enthalten allgemeine Hinweise zur Planung und Gestaltung von Netzen für den Radverkehr und deren Verkehrswege (Strecken und Knotenpunkte). Zudem sind nach Verkehrswegekategorien differenzierte Zielvorgaben für angestrebte Fahrtgeschwindigkeiten für den Alltagsradverkehr enthalten, die auch die notwendigen Wartezeiten an Knotenpunkten umfassen (vgl. Tab. 2-15). Diese Werte basieren auf wenigen empirischen Werten und stellen somit vielmehr Einschätzungen oder Setzungen dar. Diese gilt es kritisch zu überprüfen.

Kategoriengruppe		Kategorie		Standard-entfernungs-bereich [km]	angestrebte Fahrtgeschwindigkeiten [km/h ¹⁾]
AR	außerhalb bebauter Gebiete	AR II	überregionale Radverkehrsverbindung	10 – 70	20 – 30
		AR III	regionale Radverkehrsverbindung	5 – 35	20 – 30
		AR IV	nähräumige Radverkehrsverbindung	bis 15	20 – 30
IR	innerhalb bebauter Gebiete	IR II	innergemeindliche Radschnellverbindung	–	15 – 25
		IR III	innergemeindliche Radhauptverbindung	–	15 – 20
		IR IV	innergemeindliche Radverkehrsverbindung	–	15 – 20
		IR V	innergemeindliche Radverkehrsanbindung	–	–

¹⁾ einschließlich Zeitverluste an Knotenpunkten

Tab. 2-15: Kategorien von Verkehrswegen des Radverkehrs und angestrebte Fahrtgeschwindigkeiten für den Alltagsradverkehr nach den RIN (FGSV, 2008)

Für die Hinweise zur Anwendung der RIN (FGSV, 2018) wurde ein Verfahren für die Bewertung der netzabschnittsbezogenen Angebotsqualität erarbeitet, in dem konkret auch ein erster Ansatz zur Bestimmung der zu erwartenden mittleren Fahrtgeschwindigkeiten des Radverkehrs auf Netzabschnitten entwickelt und dargelegt wurde. Somit wird nunmehr ein Vergleich mit den in den RIN vorgegebenen Zielgrößen der angestrebten Fahrtgeschwindigkeiten ermöglicht. Hierauf aufbauend sollen weitergehende Ansätze zur Bewertung in Form von Stufen der Angebotsqualität auf Netzabschnitten (SAQ_N) für den Radverkehr abgeleitet werden.

Art der Radverkehrsanlage	Steigung		Ebene 3 % ≥ s ≥ - 3 %	Gefälle	
	s > 6 %	6 % ≥ s > 3 %		- 3 % > s ≥ - 6 %	s < - 6 %
Fahrbahn	4 km/h	13 km/h	19 km/h	25 km/h	30 km/h
Schutzstreifen	4 km/h	13 km/h	19 km/h	25 km/h	30 km/h
Radfahrstreifen	4 km/h	13 km/h	19 km/h	25 km/h	30 km/h
separater Radweg	4 km/h	13 km/h	19 km/h	25 km/h	30 km/h
Radweg neben Gehweg	4 km/h	11 km/h	17 km/h	23 km/h	28 km/h
Zweirichtungsradweg	4 km/h	10 km/h	16 km/h	22 km/h	27 km/h
gemeinsamer Geh-/Radweg	4 km/h	8 km/h	14 km/h	14 km/h	14 km/h
Zweirichtungs-Geh-/Radweg	4 km/h	7 km/h	13 km/h	19 km/h	24 km/h
Gehweg, Radfahrer frei	4 km/h	7 km/h	13 km/h	13 km/h	13 km/h
Fahrradstraße	4 km/h	13 km/h	19 km/h	25 km/h	30 km/h

Tab. 2-16: Fahrtgeschwindigkeiten des Radverkehrs auf Strecken (ohne Knotenpunkte mit Wartepflicht)
(Hinweise zur Anwendung der RIN, FGSV, 2018)

Der Ansatz aus den „Hinweisen zur Anwendung der RIN“ (FGSV, 2018) sieht vor, dass den Zielgrößen für die angestrebte Fahrtgeschwindigkeit die zu erwartende Fahrtgeschwindigkeit vergleichend gegenüberzustellen ist. Zur Ermittlung der zu erwartenden mittleren Fahrtgeschwindigkeit auf einem Netzabschnitt sind die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten auf den Strecken sowie die mittleren Wartezeiten an Knotenpunkten zu bestimmen.

Für die Bestimmung der mittleren Fahrtgeschwindigkeit auf einer Strecke können näherungsweise die in Tab. 2-16 angegebenen Werte angesetzt werden. Diese wurden im Rahmen der Untersuchungen von BAIER et al. (2013) abgeleitet. Sie gelten für den Alltagsradverkehr und ausschließlich für Fahrräder. Mit zunehmendem Anteil von Pedelecs und E-Bikes sind die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten des Fahrradkollektivs vor allem an Steigungstrecken höher anzusetzen.

Die mittlere Wartezeit an einem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage (LSA) kann vereinfachend nach Gleichung (2-1) bestimmt werden (FGSV, 2018):

$$t_w = \frac{t_s^2}{2 \cdot t_u} \quad (2-2)$$

mit

t_w = mittlere Wartezeit für Radfahrer an LSA [s]

t_s = Sperrzeit (Rotzeit) [s]

t_u = Umlaufzeit [s]

Die mittlere Wartezeit an einem Knotenpunkt ohne Lichtsignalanlage ist nach den Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) zu bestimmen.

2.3.3 Internationale Bewertungsverfahren

Zur Bewertung der Qualität von Radverkehrsanlagen werden in internationalen Regelwerken und Normen unterschiedliche Kriterien herangezogen. Dabei werden zum einen direkt messbare Kenngrößen, wie die Fahrtgeschwindigkeit oder die Verkehrsstärke, und zum anderen Bewertungsindikatoren, die die subjektive Wahrnehmung der Radfahrer beschreiben, verwendet. Eine kleinteilige Bewertung einzelner Streckenabschnitte ist mit den Bewertungsverfahren meist nicht möglich, da die Verfahren für eine Bewertung längerer Netzabschnitte oder ganzer Radverkehrsnetze entwickelt wurden. Im Folgenden werden die Verfahren zur Bewertung der Qualität von Radverkehrsanlagen in den Ländern Großbritannien, Dänemark, Niederlande, Schweiz und USA näher erläutert.

Großbritannien

Die „London Cycling Design Standards“ (TFL, 2014) enthalten ein Verfahren zur ganzheitlichen Bewertung von Radverkehrsanlagen in Großbritannien. Das Verfahren wurde entwickelt, um einheitliche Standards für die Qualität der Radverkehrsinfrastruktur zu definieren und diese anhand von unterschiedlichen Kriterien bewerten zu können. Mit dem Verfahren können einzelne Knotenpunkte und Streckenabschnitte sowie Netzabschnitte mit Hilfe eines „Cycling Level of Service“ (CLoS) bewertet werden. Das Verfahren basiert dabei auf den Bewertungsmethoden des „Cycle Audit and Cycle Review“ (CIHT, 1998), der „Love London, go Dutch Matrix“ (LCC, 2013) und des niederländischen „Bicycle Balance“-Verfahrens (CROW, 2007). Angewendet werden kann das Verfahren sowohl in der Planungsphase einer Radverkehrsanlage als auch für bereits bestehende Radverkehrsanlagen.

Die Definition der Qualität einer Radverkehrsanlage erfolgt anhand von sechs übergeordneten Anforderungen: Sicherheit, Direktheit, Komfort, Durchgängigkeit, Attraktivität und Anpassungsfähigkeit. Jede übergeordnete Anforderung wird in einzelne spezifische Kriterien zur Bewertung unterteilt, sodass insgesamt 23 spezifische Kriterien zur ganzheitlichen Bewertung verwendet werden. Die Sicherheit als übergeordnete Anforderung wird bspw. in die spezifischen Kriterien Kollisionsrisiko, Sicherheitsgefühl und soziale Sicherheit unterteilt.

Jedes spezifische Kriterium wird anhand eines definierten Indikators in Stufen des CLoS eingeteilt. Dabei wird unterschieden zwischen dem „Basic CLoS“ (Wert 0), „Good CLoS“ (Wert 1) und „Highest CLoS“ (Wert 2). Die Bewertung eines Indikators in den drei Stufen findet entweder anhand von festgelegten Grenzwerten oder ausformulierten, nicht direkt messbaren Anforderungen statt. Ein spezifisches Kriterium kann dabei auch anhand mehrerer Indikatoren bewertet werden, sodass die gesamte Bewertungsmatrix aus insgesamt 34 Indikatoren besteht. Das spezifische Kriterium Sicherheitsgefühl wird bspw. in die Indikatoren Trennung vom Kfz-Verkehr, Geschwindigkeit und Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs sowie Interaktion mit

dem Schwerverkehr unterteilt. Im Hinblick auf die Verkehrssicherheit wird einigen der Indikatoren bei der Bewertung anhand der Erweiterung des Bewertungsschemas um die Stufe „Critical CLoS“ eine besondere Bedeutung zugeteilt. Wird eine Anlage mit dieser Stufe bewertet, so müssen Maßnahmen zur Verbesserung eingeleitet werden, um mindestens die Stufe „Basic CLoS“ zu erreichen. Des Weiteren wird der erreichte CLoS-Wert eines Indikators mit der Erweiterung um die Stufe „Critical CLoS“ mit drei multipliziert, um den Indikator in der Gesamtbewertung stärker zu gewichten.

Durch Aufsummieren aller bewerteten Indikatoren der Beurteilungsmatrix wird der CLoS ermittelt. Dabei kann insgesamt ein maximaler CLoS-Wert von 100 erreicht werden. Allerdings werden keine festen Grenzwerte definiert, um eine Radverkehrsanlage anhand eines Klassifizierungsschemas, wie bspw. nach dem Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) oder des HCM (TRB, 2016), bewerten zu können. Gemäß der „Cycling Embassy of Great Britain“ (CEOGB, 2018) kann bei einem CLoS-Wert von 70 bis 80 von einer guten Qualität der Radverkehrsanlage ausgegangen werden. Hervorzuheben ist, dass 48 der 100 möglichen CLoS-Punkte in der übergeordneten Anforderung Sicherheit erreicht werden können.

Anhand des CLoS-Wertes können unterschiedliche Radverkehrsanlagen und Ausbauvarianten miteinander verglichen sowie das Verbesserungspotenzial einer Radverkehrsanlage ermittelt werden. Die sechs übergeordneten Anforderungen ermöglichen eine Bewertung der Radverkehrsanlage aus Nutzersicht mit dem Ziel, attraktive Radverkehrsanlagen zur Verfügung zu stellen, um eine Verlagerung der täglichen Fahrten von anderen Verkehrsmitteln auf das Fahrrad zu erreichen. Daher gehen neben den verkehrstechnischen Indikatoren wie bspw. der Breite der Radverkehrsanlage, der Längsneigung oder der Kfz-Verkehrsstärke auch Indikatoren in die Bewertung mit ein, die die Attraktivität der Radverkehrsanlage beeinflussen, wie bspw. die Begrünung der Strecke oder die Lärm- und Schadstoffbelastung.

Dänemark

Ein in Dänemark von JENSEN (2007, 2012) entwickeltes Verfahren ermöglicht die Bewertung der Qualität von Radverkehrsanlagen aus Nutzersicht. Anhand des Verfahrens können einzelne Streckenabschnitte zwischen Knotenpunkten sowie Knotenpunkte bewertet werden. Die Bewertung der Radverkehrsanlagen orientiert sich dabei am amerikanischen HCM (TRB, 2000) und erfolgt anhand eines Klassifizierungsschemas mit sechs Stufen des Level of Service (LOS).

Zur Entwicklung des Bewertungsverfahrens von JENSEN (2007) wurden 407 zufällig ausgewählten Probanden Befahrungsvideos aus Sicht eines Radfahrers von 56 Streckenabschnitten mit unterschiedlichen baulichen und verkehrstechnischen Randbedingungen gezeigt. Die Probanden bewerteten die Streckenabschnitte anhand eines sechsstufigen Bewertungsschemas von „sehr zufrieden“ (Note 1) bis „sehr unzufrieden“ (Note 6) auf Basis des subjektiven Empfindens. Dabei wurden einige Streckenabschnitte mehrfach mit leicht veränderten Randbedingungen wie bspw. der Kfz-Verkehrsstärke gezeigt, um die Wahrnehmung der Probanden in Bezug auf geringe Veränderungen zu testen. Insgesamt wurden 7.596 Bewertungen von Probanden durchgeführt.

Basierend auf den subjektiven Bewertungen der Probanden und 150 definierten Variablen für die baulichen und verkehrstechnischen Randbedingungen der einzelnen Streckenabschnitte wurde eine logistische Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Variablen Führungsform des Radverkehrs, Breite der Radverkehrsanlage, Anzahl der Kfz-Fahrstreifen, Kfz-Verkehrsstärke, Kfz-Geschwindigkeit sowie Distanz zur Kfz-Fahrbahn und zum Gehweg den größten Einfluss auf die Bewertung der Qualität haben. Anhand der Ergebnisse der logistischen Regressionsanalyse wurde ein Logit-Modell mit den Variablen, die einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der Qualität einer Radverkehrsanlage haben, entwickelt. Anhand des entwickelten Logit-Modells können die prozentuale Verteilung der Notenstufen des Bewertungsschemas in Abhängigkeit von den baulichen und verkehrstechnischen Randbedingungen der Radverkehrsanlage ermittelt werden.

Zur Bewertung der Qualität einer Radverkehrsanlage anhand eines Klassifizierungsschemas wird eine Einteilung in einzelne Stufen des „Level of Service“ (A bis F) anhand von Grenzwerten auf Basis des HCM (TRB, 2000) durchgeführt. Dabei werden die einzelnen LOS anhand der mit dem Logit-Modell ermittelten prozentualen Verteilung der Notenstufen des Bewertungsschemas eingeteilt. Eine Radverkehrsanlage wird mit dem LOS A bewertet, wenn der Anteil der Note 1 $\geq 50\%$ ist. Der LOS B wird erreicht, wenn der Anteil der Note 2 $\geq 50\%$ und der Anteil der Note 1 $< 50\%$ beträgt. Die Einteilung in die restlichen Stufen des LOS erfolgt analog, sodass eine Bewertung mit dem LOS F vorliegt, wenn der Anteil der Note 6 $\geq 50\%$ ist.

Anhand der Einteilung in einzelne Stufen des LOS können die Beziehungen zwischen den baulichen und verkehrstechnischen Randbedingungen des Logit-Modells auf die Qualität der Radverkehrsanlage grafisch dargestellt werden. In Bild 2-4 sind die LOS in Abhängigkeit von der mittleren Kfz-Geschwindigkeit und der Kfz-Verkehrsstärke für drei unterschiedliche Radverkehrsanlagen dargestellt.

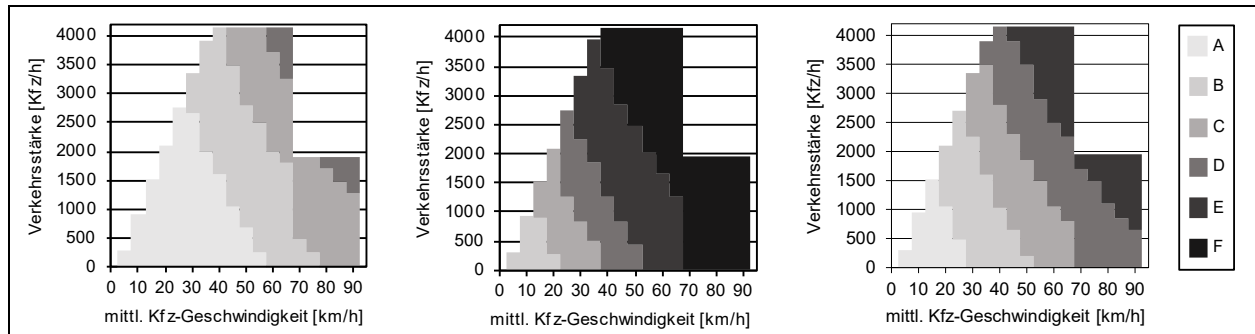


Bild 2-4: LOS in Abhängigkeit von der mittleren Kfz-Geschwindigkeit und der Kfz-Verkehrsstärke für drei Radverkehrsanlagen mit unterschiedlichen baulichen und verkehrstechnischen Randbedingungen nach Jensen (2007): 3,75 m breiter angrenzender Kfz-Fahrbereich (links), städtische Anliegerstraße mit Gehweg und Kfz-Geschwindigkeiten bis 65 km/h (Mitte), Landstraße ohne Gehweg mit Grünflächen und Kfz-Geschwindigkeiten von 70 km/h bis 90 km/h (rechts)

Niederlande

Das niederländische „Design Manual for Bicycle Traffic“ (CROW, 2016) enthält ein Verfahren zur ganzheitlichen Bewertung von Radverkehrsnetzen. Bei der „Bicycle Balance Method“ wird ein Radverkehrsnetz anhand von zehn Qualitätskriterien aus Nutzersicht bewertet. Die einzelnen Qualitätskriterien und Bewertungsindikatoren sind in Tab. 2-17 dargestellt.

Das Verfahren sieht grundsätzlich vier vorbereitende Untersuchungsschritte vor. Zunächst ist die Erarbeitung eines Überblicks über alle relevanten Richtlinien bzgl. des Radverkehrs unter der besonderen Berücksichtigung aller Beurteilungsbereiche vorgesehen. Anschließend sollen Umfragen die Zufriedenheit der Nutzer mit dem vorhandenen Angebot an Radverkehrsanlagen ermitteln. Statistische Auswertungen zum Radverkehrsanteil sowie zur Verkehrssicherheit der Radfahrer sind im Vorfeld der Bewertung durchzuführen. Ergänzend sollen lokale Erhebungen durchgeführt werden, um den Verkehrsablauf des Radverkehrs objektiv beurteilen zu können.

Auf die Formulierung konkreter Qualitätsstufen oder Vergleichswerte wird jedoch weitestgehend verzichtet. Zwar sollen für einige Bewertungsindikatoren die im Handbuch (CROW, 2016) aufgeführten Standardwerte verwendet werden, jedoch können nicht für jeden Bewertungsindikator allgemeingültige Grenzwerte oder Definitionen festgelegt werden. Die Aufgabe eines Anwenders besteht somit darin, für einige Bewertungsindikatoren detaillierte Zielwerte vor der Untersuchung zu definieren. Das Verfahren besitzt daher lediglich eine anleitende Funktion, um die relevanten Qualitätskriterien bei der ganzheitlichen Bewertung eines Radverkehrsnetzes zu erarbeiten und zu standardisieren. Somit ist die Bewertung anhand der „Bicycle Balance Method“ nur sinnvoll, wenn Standardwerte definiert oder das Verfahren lediglich eine vergleichende Funktion erfüllt. Für eine konkrete Vergleichbarkeit kann nach Betrachtung aller Einzelaspekte eine Einstufung in ein Punktesystem für jeden Beurteilungsbereich vorgenommen werden. Es wird empfohlen, abschließend die Ergebnisse der erarbeiteten Punktbewertung in einem zehnnachsigen Netzdiagramm darzustellen, wodurch defizitäre Qualitätskriterien sofort erkannt und der Vergleich unterschiedlicher Netze besonders übersichtlich visualisiert werden kann.

Qualitätskriterium	Bewertungsindikator(en)
Direktheit	Die Direktheit des betrachteten Netzes wird anhand des Umwegfaktors, der Verlustzeit pro Kilometer sowie der durchschnittlichen Fahrtgeschwindigkeit bestimmt.
Komfort (Störungen)	Der Komfort (Störung) wird maßgeblich durch die Anzahl der Halte pro km, die Einschränkungen durch den Fuß- und Kfz-Verkehr sowie andere Radfahrer, die Anzahl an Knotenpunkten, an denen der Radverkehr nicht mit Vorrang geführt wird, sowie durch den Ausbauzustand der Radverkehrsanlagen beeinflusst.
Komfort (Oberflächenqualität)	Für den Komfort (Oberflächenqualität) wird die Ebenheit als Maß der Qualität verwendet.
Attraktivität	Die Attraktivität von Radverkehrsanlagen wird anhand der subjektiven Wahrnehmung aus Nutzersicht bewertet. Dabei fließen in die Bewertung messbare Werte wie die Lärmbelastung mit ein.
Vergleich zwischen Kfz- und Radverkehr	Der Vergleich zwischen Kfz- und Radverkehr wird anhand des Fahrzeitenverhältnisses, der Anteil der Wege, bei denen der Radverkehr schneller ist, sowie der Parkkosten für Kfz bewertet.
Radverkehrsanteil	Der Radverkehrsanteil wird anhand des Anteils des Radverkehrs im Modal Split im Radverkehrsnetz bewertet. Betrachtet wird hierbei lediglich der Anteil an den Wegen bis 7,5 km.
Verkehrssicherheit	Die Verkehrssicherheit der Radfahrer wird anhand der Wahrscheinlichkeit eines Unfalls pro 100 Millionen Radkilometer bestimmt.
Siedlungsdichte	Die Siedlungsdichte wird anhand eines Vergleichs mit anderen Städten oder Gemeinden gleicher Größe bewertet. Es besteht für den Radverkehr ein direkter Zusammenhang zwischen der Siedlungsdichte und der Anzahl möglicher Quelle-Ziel-Beziehungen. Eine hohe Siedlungsdichte (in Abhängigkeit von der Größe der Stadt oder Gemeinde) wirkt sich somit positiv auf die Radnutzung in einem Netz aus.
subjektive Zufriedenheit	Für die subjektive Zufriedenheit werden durch Umfragen generierte subjektive Meinungsbilder über Parkmöglichkeiten, Fahrkomfort, Verkehrssicherheit und Fahrrad-diebstahl verwendet.
Radverkehrspolitik	Die Radverkehrspolitik wird anhand des Umfangs der Berücksichtigung des Radverkehrs in der Verkehrspolitik und den fiskalpolitischen Plänen bewertet.

Tab. 2-17: Qualitätskriterien und Bewertungsindikatoren für Radverkehrsnetze gemäß CROW (2016)

Schweiz

Längere Netzabschnitte im Radverkehr, die über ein Mindestradverkehrsaufkommen oder -potenzial verfügen und in behördenverbindlichen Plänen festgelegt sind, werden in der Schweiz als Velorouten bezeichnet. Dabei werden gemäß dem „Handbuch Planung von Velorouten“ (ASTRA, 2008) folgende Velorouten differenziert:

- internationale Routen: länderübergreifende Fernradwanderwege insbesondere für den Freizeit- und Reiseradverkehr,
- nationale Routen: zusammenhängende Routen mit einer Länge > 250 km, die vor allem für den Freizeit- und Reiseradverkehr bestimmt sind,
- regionale Routen: zusammenhängende Routen mit einer Länge zwischen 50 und 250 km, die insbesondere dem Freizeitradverkehr, im Umfeld der Städte aber auch dem Alltagsradverkehr dienen, und
- lokale Routen: zusammenhängende Routen mit einer Länge bis 50 km, die sowohl dem Alltagsradverkehr als auch dem Freizeitradverkehr zur Verfügung stehen.

Die Grundanforderungen an Velorouten sind eine attraktive, sichere und zusammenhängende Gestaltung. Für die Bewertung der drei Grundanforderungen werden neun Qualitätskriterien definiert. Jedes Qualitätskriterium kann anhand von festgelegten Grenzwerten oder ausformulierten, nicht direkt messbaren Anforderungen mit vier Qualitätsstufen (gut, genügend, ungenügend und schlecht) bewertet werden. Die einzelnen Qualitätskriterien sowie die jeweiligen Bewertungsindikatoren sind in Tab. 2-18 dargestellt.

Qualitätskriterium	Bewertungsindikator(en)
Fahrfluss	Der Fahrfluss wird quantitativ beurteilt. Grundlage bildet die Anzahl der Fahrtunterbrechungen pro 500 m (innerorts) bzw. 2.000 m (außerorts).
Umfeldqualität	Die Umfeldqualität wird auf der Grundlage der Attraktivität der Umgebung beurteilt.
Oberfläche	Die Oberfläche wird anhand des Streckenanteils, der über eine Asphalt- oder Beton-deckschicht verfügt, beurteilt.
Verkehrsregime und -belastung	Die Grundlage für die Beurteilung der Verkehrsregime und -belastung bildet der Anteil an definierten Straßen- und Wegkategorien, die anhand des DTV der Kfz, der Führungsform des Radverkehrs sowie der Breite der Radverkehrsanlage kategorisiert werden.
Homogenität	Die Homogenität wird anhand der Anzahl der Wechsel des Führungsprinzips sowie der Änderungen des Verkehrsregimes und der -belastung pro 500 m (innerorts) bzw. 2.000 m (außerorts) beurteilt. Dazu werden sechs Führungsprinzipien definiert.
Gefahrenstellen	Gefahrenstellen werden quantitativ beurteilt. Grundlage bilden die Anzahl der Gefahrenstellen sowie das Nutzen-Kosten-Verhältnis für deren Sanierung. Als Gefahrenstellen werden Orte bezeichnet, an denen sich tatsächlich Unfälle ereigneten oder eine objektiv erhöhte bzw. eine subjektiv empfundene Unfallgefahr besteht.
Sicherheitsempfinden	Die Grundlage für die Beurteilung des Sicherheitsempfindens bildet die Anzahl problematischer Stellen. Als problematische Stelle werden Bereiche definiert, die aufgrund bspw. fehlender Beleuchtung oder fehlender sozialer Kontrolle bei Radfahrern angstausslösend wirken können.
Direktheit	Die Direktheit wird auf der Grundlage der Abweichung von der Luftlinie und der natürlichen Höhendifferenz, die anhand einer Formel bestimmt werden kann, beurteilt. Dabei wirken 40 Höhenmeter Steigung wie ein Kilometer zusätzliche Fahrt.
Erschließung	Die Erschließung wird quantitativ beurteilt. Grundlage bildet die Erschließung der für die jeweilige Veloroute wichtigen Ziele.

Tab. 2-18: Qualitätskriterien und Bewertungsindikatoren für Velorouten gemäß ASTRA (2008)

Für den Alltagsradverkehr sind dabei die Qualitätskriterien Verkehrsregime und -belastung, Gefahrenstellen und Direktheit prioritär. Beim Freizeitradverkehr sind hingegen die Qualitätskriterien Umfeldbedingungen, Verkehrsregime und -belastung sowie Gefahrenstellen als prioritär anzusehen.

Die gesamte Veloroute wird zunächst in einzelne, möglichst homogene Abschnitte unterteilt. Die Unterteilung in einzelne Abschnitte findet dabei anhand der Änderung der Lage (innerorts bzw. außerorts) oder der Zusammensetzung des Radverkehrs (Alltags- bzw. Freizeitradverkehr) statt. Grundsätzlich sollen möglichst lange Planungsabschnitte zusammenhängend betrachtet werden.

An die einzelnen Qualitätskriterien werden teilweise unterschiedliche Anforderungen für den Freizeit- und Alltagsradverkehr gestellt, so dass die Bewertung desselben Abschnitts zu unterschiedlichen Qualitäten für den Freizeit- und Alltagsradverkehr führen kann. Eine unterschiedliche Gewichtung zwischen den einzelnen Qualitätskriterien erfolgt grundsätzlich nicht. Bei einem Variantenvergleich zur Bestimmung der potenziell besten Linienführung sollten die drei genannten, prioritären Kriterien dennoch als erstes miteinander verglichen werden, denn diese können im Fall einer nicht eindeutigen Bewertung ausschlaggebend sein.

USA

Das amerikanische HCM (TRB, 2016) unterscheidet bei der Bewertung von Radverkehrsanlagen grundlegend zwischen Radverkehrsanlagen ohne Einfluss durch den motorisierten Verkehr („off-street facilities“) und Radverkehrsanlagen mit Einfluss durch den motorisierten Verkehr („on-street facilities“). Für Netzabschnitte von innerstädtischen Radverkehrsanlagen mit Beeinflussung durch den motorisierten Verkehr kann die Verkehrsqualität mit dem Bicycle LOS Score $I_{b,F}$ anhand von sechs Stufen des Level of Service (LOS) bewertet werden. Die Grenzwerte des Bicycle LOS Score zur Bestimmung der Verkehrsqualität nach dem aktuellen HCM (TRB, 2016) sind in Tab. 2-19 dargestellt. Der Netzabschnitt einer innerstädtischen Radverkehrsanlage wird zunächst in einzelne Streckenabschnitte und signalisierte Knotenpunkte unterteilt.

Ein Streckenabschnitt wird mit dem stromaufwärts liegenden Knotenpunkt als Segment zusammengefasst. Die Bewertung basiert dabei auf der durchschnittlichen Fahrtgeschwindigkeit auf dem gesamten Netzabschnitt sowie dem Bicycle LOS Score für die einzelnen Segmente. Eine Anwendung des Verfahrens für einen einzelnen Streckenabschnitt ist unter der Voraussetzung möglich, dass der jeweilige Abschnitt als isoliert angesehen werden kann, d. h. er wird nicht durch einen stromaufwärts gelegenen signalisierten Knotenpunkt beeinflusst. Für die Bewertung eines Streckenabschnitts mit dem Bicycle LOS Score $I_{b,link}$ gelten die gleichen Grenzwerte wie für Netzabschnitte (vgl. Tab. 2-19).

Angewendet werden kann das Verfahren sowohl für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr als auch für Radfahrstreifen. Das Verfahren berücksichtigt bei der Bewertung allerdings lediglich normale Fahrräder. Eine Differenzierung des Fahrradkollektivs bei der Bewertung wird nicht vorgenommen. Des Weiteren berücksichtigt das Verfahren nicht den Einfluss der Längsneigung und kann ab einer Längsneigung > 2 % nicht mehr angewendet werden.

LOS	Bicycle LOS Score $I_{b,F}$ bzw. $I_{b,link}$ [-]
A	$\leq 2,00$
B	$> 2,00 - 2,75$
C	$> 2,75 - 3,50$
D	$> 3,50 - 4,25$
E	$> 4,25 - 5,00$
F	$> 5,00$

Tab. 2-19: LOS und Bicycle LOS Score $I_{b,F}$ für einen Netzabschnitt bzw. $I_{b,link}$ für einen Streckenabschnitt im Radverkehr mit Einfluss des motorisierten Verkehrs gemäß HCM (TRB, 2016)

Der Bicycle LOS Score $I_{b,F}$ für einen Netzabschnitt ergibt sich wie folgt:

$$I_{b,F} = 0,75 \left[\frac{\sum_{i=1}^m WTT_{b,i}}{\sum_{i=1}^m L_i} \cdot \frac{1}{S_{Tb,F}} \right]^{\frac{1}{3}} + 0,125 \quad (2-3)$$

mit

$I_{b,F}$ = Bicycle LOS Score des Netzabschnitts [-]

$WTT_{b,i}$ = mittlerer fahrtzeitgewichteter Bicycle LOS Score des Segments i [-]

$S_{Tb,F}$ = mittlere Fahrtgeschwindigkeit durchfahrender Radfahrer auf dem Netzabschnitt [mi/h]

L_i = Länge des Segments i [ft]

Der mittlere fahrtzeitgewichtete Bicycle LOS Score $WTT_{b,i}$ des Segments i berechnet sich zu:

$$WTT_{b,i} = \left(\frac{L_i}{S_{Tb,seg,i}} \right) \cdot \left(\frac{I_{b,seg,i} - 0,125}{0,75} \right)^3 \quad (2-4)$$

mit

$I_{b,seg,i}$ = Bicycle LOS Score des Segments i [-]

$S_{Tb,seg,i}$ = mittlere Fahrtgeschwindigkeit durchfahrender Radfahrer für das Segment i [mi/h]

Die mittlere Fahrtgeschwindigkeit durchfahrender Radfahrer auf dem Netzabschnitt $S_{Tb,F}$ kann längengewichtet anhand der einzelnen mittleren Fahrtzeiten der Segmente ermittelt werden. Die mittlere Fahrtgeschwindigkeit für ein Segment berechnet sich anhand des Verhältnisses der Länge des Segments zur mittleren Fahrtzeit auf dem Streckenabschnitt und der mittleren Wartezeit am Knotenpunkt. Die Fahrtgeschwindigkeit durchfahrender Radfahrer $S_{Tb,seg,i}$ für das Segment i kann mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$S_{Tb,seg,i} = \frac{3600 \cdot L_i}{5280 \cdot (t_{Rb} + d_b)} \quad (2-5)$$

mit

L_i = Bicycle LOS Score des Segments i [ft]

t_{Rb} = mittlere Fahrtzeit auf dem Streckenabschnitt [s]

d_b = mittlere Wartezeit pro Radfahrer am signalisierten Knotenpunkt [s/Rad]

Die mittlere Fahrtzeit auf dem Streckenabschnitt kann anhand von Messungen der Geschwindigkeiten der Radfahrer ermittelt werden. Falls keine Daten erhoben werden können, wird empfohlen, einen Wert von 15 mi/h (ca. 24 km/h) als mittlere Geschwindigkeit der Radfahrer anzusetzen. Die mittlere Wartezeit am Knotenpunkt wird anhand der Umlaufzeit, der Freigabezeit für die Radfahrer, der Verkehrsstärke des Radverkehrs sowie der Kapazität der Radverkehrsanlage ermittelt.

Der für die Berechnung des mittleren fahrtzeitgewichteten Bicycle LOS Score $WTT_{b,i}$ (Gleichung (2-3)) benötigte Bicycle LOS Score $I_{b,seg,i}$ ist abhängig von den spezifischen Randbedingungen des jeweiligen Segments und kann anhand der Bicycle LOS Scores für Streckenabschnitte $I_{b,link}$ und signalisierte Knotenpunkte $I_{b,int}$ ermittelt werden. Der Bicycle LOS Score $I_{b,link}$ für einen Streckenabschnitt ergibt sich nach Gleichung (2-5) wie folgt:

$$I_{b,link} = 0,760 + F_w + F_v + F_s + F_p \quad (2-6)$$

mit

$I_{b,link}$ = Bicycle LOS Score des Streckenabschnitts [-]

F_w = Anpassungsfaktor des Querschnitts [-]

F_v = Anpassungsfaktor der Kfz-Verkehrsstärke [-]

F_s = Anpassungsfaktor der Kfz-Geschwindigkeit [-]

F_p = Anpassungsfaktor der Straßenoberfläche [-]

Durch die Anpassungsfaktoren wird in der Berechnung des Bicycle LOS Score $I_{b,link}$ der Einfluss folgender baulicher und verkehrstechnischer Kenngrößen berücksichtigt:

- Breite und Anzahl der Kfz-Fahstreifen,
- Breite des Radfahrstreifens und ggf. vorhandenen Parkstreifens,
- Kfz-Verkehrsstärke und Kfz-Geschwindigkeit,
- Schwerverkehrsanteil und
- Straßenoberfläche.

Das Verfahren des HCM 6th Edition (TRB, 2016) basiert dabei auf den Ansätzen zur Bewertung innerstädtischer Netzabschnitte des HCM 2000 (TRB, 2000). Als Bewertungskriterium für Netzabschnitte von innerstädtischen Radverkehrsanlagen mit der Führung des Radverkehrs auf einem Radfahrstreifen wird die mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt verwendet. Die Verkehrsqualität kann anhand von Grenzwerten für die mittlere Fahrtgeschwindigkeit mit sechs LOS bewertet werden. Die Grenzwerte der mittleren Fahrtgeschwindigkeit zur Bestimmung der Verkehrsqualität nach dem HCM 2000 sind in Tab. 2-20 dargestellt. Die Einteilung des Netzabschnitts in einzelne Segmente erfolgt analog zum Verfahren des HCM 6th Edition. Die Bewertung der Verkehrsqualität beruht auf der Annahme, dass eine mittlere Fahrtgeschwindigkeit zwischen zwei signalisierten Knotenpunkten von 25 km/h erreicht werden kann. Die mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt kann nach dem HCM 2000 mit Gleichung (2-6) bestimmt werden:

$$S_{ats} = \frac{L_T}{\left(\sum \frac{L_i}{S_i} + \frac{\sum d_j}{3600} \right)} \quad (2-7)$$

mit

S_{ats}	=	mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt	[km/h]
L_T	=	Gesamtlänge des innerstädtischen Netzabschnitts	[km]
L_i	=	Länge des Segments i	[km]
S_i	=	mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf dem Segment i	[km/h]
d_j	=	mittlere Wartezeit an dem signalisierten Knotenpunkt j	[s]

LOS	mittlere Fahrtgeschwindigkeit [km/h]
A	> 22
B	> 15 – 22
C	> 11 – 15
D	> 8 – 11
E	≥ 7 – 8
F	< 7

Tab. 2-20: LOS und mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf Radfahrstreifen gemäß HCM (TRB, 2000)

Für Streckenabschnitte von gemeinsamen Geh- und Radwegen sowie selbstständig geführten Radwegen kann die Qualität des Verkehrsablaufs aus Nutzersicht ebenfalls mit einem Bicycle LOS Score anhand von sechs Qualitätsstufen bewertet werden. Die zugehörigen Grenzwerte zur Bestimmung der Verkehrsqualität einer Radverkehrsanlage ohne Beeinflussung durch den motorisierten Verkehr nach dem HCM (TRB, 2016) sind in Tab. 2-21 dargestellt. Die Bewertung berücksichtigt dabei die Anzahl aktiver Überholungen, Begegnungen und verzögerter Überholungen pro Minute sowie die Breite der Radverkehrsanlage und das Vorhandensein von Mittellinien. Der Bicycle LOS Score für einen Streckenabschnitt ergibt sich wie folgt:

$$BLOS = 5,446 - 0,00809 \cdot E + 15,68 \cdot RW - 0,287 \cdot CL - DP \quad (2-8)$$

mit

BLOS	=	Bicycle LOS Score des Streckenabschnitts	[-]
E	=	Gewichtungsfaktor der aktiven Überholungen und Begegnungen pro Minute	[-]
RW	=	Kehrwert der Breite der Radverkehrsanlage	[ft]
CL	=	Parameter zur Berücksichtigung des Vorhandenseins einer Mittellinie	[-]
	=	1, wenn eine Mittellinie vorhanden ist	
	=	0 wenn keine Mittellinie vorhanden ist	
DP	=	Faktor zur Berücksichtigung von verzögerten Überholungen	[-]

LOS	Bicycle LOS Score [-]
A	> 4,0
B	> 3,5 - 4,0
C	> 3,0 - 3,5
D	> 2,5 - 3,0
E	> 2,0 - 2,5
F	≤ 2,00

Tab. 2-21: LOS und Bicycle LOS Score für Radverkehrsanlagen ohne Einfluss des motorisierten Verkehrs gemäß HCM (TRB, 2016)

Das Verfahren basiert auf Untersuchungen der Nutzerwahrnehmung in Abhängigkeit von den baulichen und verkehrstechnischen Randbedingungen einer Radverkehrsanlage. Dabei wird vor allem die Möglichkeit der Radfahrer, die Radverkehrsanlage mit der Wunschgeschwindigkeit zu befahren, die Anzahl der Begegnungen und Überholungen zwischen Radfahrern und anderen Verkehrsteilnehmern sowie die Freiheit der Radfahrer in Bezug auf die Fahrlinienwahl bewertet.

Die Anzahl der aktiven Überholungen und Begegnungen wird anhand der Geschwindigkeiten der einzelnen Nutzergruppen und der Länge des Streckenabschnitts ermittelt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Geschwindigkeiten normalverteilt sind. Sofern ein mit Wunschgeschwindigkeit fahrender Radfahrer aufgrund der Behinderung durch andere Verkehrsteilnehmer ein Überholmanöver nicht unmittelbar durchführen kann, tritt eine verzögerte Überholung auf. Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses kann anhand der für den Überholvorgang benötigten Länge sowie der Anzahl der effektiven Fahrstreifen der Radverkehrsführung bestimmt werden. Die Anzahl effektiver Fahrstreifen in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsführung gemäß HCM (TRB, 2016) ist in Tab. 2-22 dargestellt. Die Anzahl der verzögerten Überholungen pro Minute kann als Produkt der aktiven Überholungen pro Minute, der Gesamtwahrscheinlichkeit für eine verzögerte Überholung sowie einem Spitzenstundenfaktor ermittelt werden.

Breite der Radverkehrsführung [m]	effektive Fahrstreifen [-]
2,44 – 3,20	2
3,35 – 4,42	3
4,57 – 6,10	4

Tab. 2-22: Anzahl effektiver Fahrstreifen in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsführung gemäß HCM (TRB, 2016)

2.4 Mikroskopische Simulation des Radverkehrs

2.4.1 Modellierungsansätze zur Mikrosimulation von Radverkehr

Die mikroskopische Modellierung von Radverkehr ist nach wie vor ein Feld mit vielen offenen Forschungsfragen. Dies liegt zum einen daran, dass die Modellierung von Radverkehr in vielerlei Hinsicht komplexer ist als von Kfz. Zum anderen ist das Verkehrsmittel Fahrrad in der Praxis selten relevant für Leistungsfähigkeitsnachweise. Dieser Umstand bedingt auch, dass Simulationen in der Regel bei der Bewertung von Radverkehrsanlagen nicht zur Anwendung kommen und dementsprechend die Modellentwicklung weniger gefördert wird. Diese Umstände stellen aber auch spezielle Anforderungen an die Entwicklung eines Qualitätsmaßes für Radverkehrsanlagen, da eine schlechte Verkehrsqualität empirisch nicht direkt durch einen Verkehrszusammenbruch oder Stau, sondern nur indirekt z. B. durch die Wahl anderer Infrastrukturelemente, Routen oder Verkehrsmittel beobachtbar ist.

In der Mikrosimulation von Verkehrsabläufen – also der Simulation der Bewegung einzelner Fahrer-Fahrzeug-Einheiten – werden verschiedene Ebenen des menschlichen Verhaltens modelliert. In der Fußgänger- und Shared-Space-Simulation unterscheiden einige Autoren strategische, taktische und operative Manöver. Das operative Verhalten umfasst Entscheidungen, die in einer gegebenen Verkehrssituation getroffen werden müssen. Es dient der Erreichung singulärer Zielsetzungen und hat einen sehr kurzen Zeithorizont im Bereich von Sekunden. Dazu gehören das Bremsen und Beschleunigen sowie das Lenken. Eine weitere Entscheidungsebene betrifft das taktische Verhalten. Dies umfasst in der Regel Fahrmanöver von einem Zeithorizont zwischen Sekunden und Minuten, z. B. Überhol- und Ausweichmanöver. Auf der strategischen Ebene wird die Routenwahl verortet (vgl. AMINI et al., 2016; SCHÖNHAUER et al., 2012). Im Vergleich zu Kfz ergeben sich für Radfahrer andere Ansprüche an die Modellierung auf den jeweiligen Ebenen. Die übergeordnete Routenwahl kann mit der gleichen Vorgehensweise wie für Kfz modelliert werden. Die taktische Ebene allerdings ist bei Radfahrern komplexer, da es häufig mehr Wahlmöglichkeiten gibt als für Kfz. Je nach Art der Verkehrsinfrastruktur kann ein Radfahrer z. B. zwischen der Nutzung von Anlagen für den Fuß- oder Kfz-Verkehr wählen und während der Fahrt zwischen den unterschiedlichen Infrastrukturelementen wechseln. Zusätzlich kann das Querverhalten bei Radfahrern als spurgebunden wie auch als nicht-spurgebunden betrachtet werden, weshalb die Zuordnung von Überholmanövern zu taktischem Verhalten für Radfahrer fraglich ist. Bei Kfz hingegen ist das taktische Verhalten meistens regelbasiert. Wählbar sind im Fall von mehrstreifigen Straßenquerschnitten im Innerortsbereich lediglich der Fahrstreifen und das Überholverhalten.

Da der Fokus dieses Forschungsprojekts die Verkehrsqualität in Abhängigkeit von der Breite von Radverkehrsanlagen ist, wird in erster Linie die Modellierung des Verhaltens von Radfahrern auf operativer Ebene behandelt. Das Überholverhalten ist ein entscheidender Faktor für die Leistungsfähigkeit und wird daher ebenfalls untersucht. Die taktische Ebene im Sinne der Wahl unterschiedlicher Infrastrukturelemente ist nicht Teil des Forschungsvorhabens. Aktuelle Modellierungsansätze in diesem Forschungsbereich wurden von TWADDLE und GRIGOROPOULOS (2016a) dokumentiert.

Allgemein werden in der Mikrosimulation primär zwei Modellklassen unterschieden: räumlich diskrete und räumlich kontinuierliche Modelle. In die erste Kategorie fallen sogenannte Zellularautomaten. Bei dieser Modellierung werden zwar einzelne Fahrzeuge modelliert, deren Bewegung im Raum wird aber stark abstrahiert. Die Strecken werden dafür in einzelne Zellen aufgeteilt. In klassischen Modellen ist die Belegung einer Zelle mit nur einem Fahrzeug möglich. Es gibt verschiedene Ansätze, um diese Modelle an den Radverkehr anzupassen. Einige nutzen eine Mehrfachbelegung der Zellen, andere legen mehrere Zellenbänder übereinander. Diese Modelle können die Bewegungen von Radfahrern allerdings nicht simulieren. So lassen sich zwar Kenngrößen des Verkehrsablaufs (Geschwindigkeiten, Verkehrsstärke, Verkehrsdichte) berechnen, die Dynamik einzelner Verkehrsteilnehmer kann aber nicht modelliert und damit nicht visualisiert werden. Aufgrund der oben dargestellten Problematik, dass negative Merkmale des Verkehrsablaufs bei Radfahrern in der Regel nicht direkt beobachtbar sind, bieten diese Modelle keine adäquate Möglichkeit, die Qualität des Verkehrsablaufs zu bewerten. Beispiele für die Erweiterung von Zellularautomaten auf Radverkehr finden sich in VASIC und RUSKIN (2012) sowie GOULD und KARNER (2009).

Innerhalb der räumlich kontinuierlichen Modelle kommen in der Regel zwei Modellierungsansätze für den Radverkehr zur Anwendung. Eine Herangehensweise ist, in Anlehnung an die Modellierung von Kfz das Längs- und Querverhalten in zwei unterschiedliche Modelle aufzuteilen. Grundlage dafür ist die Annahme, dass das Querverhalten weitgehend durch den Streckenverlauf bestimmt ist. Die andere Herangehensweise leitet sich von Modellen für den Fußverkehr ab. Dabei wird das Längs- und Querverhalten in einem geschlossenen Modell abgebildet. Diese Modelle basieren auf dem Social-Force-Modell von HELBING und MOLNÁR (1995) und wurden verschiedentlich erweitert, um sie auf den Radverkehr anzupassen. Modelle des ersten Typs werden beispielsweise in SUMO, Aimsun, DRACULA und PTV Vissim verwendet. Mit Ausnahme von PTV Vissim gibt es allerdings kein eigenes Modell für den Radverkehr. Sofern überhaupt vorgesehen ist, Radverkehr zu simulieren, werden die gleichen Modelle verwendet wie für Kfz (TWADDLE et. al., 2014).

Social-Force-Modelle werden auf kommerzieller Ebene bisher nur für den Fußverkehr verwendet (z. B. in PTV Viswalk, welches als eigenständiges Modul innerhalb von PTV Vissim verwendet werden kann). LI et al. (2011) haben dieses Modell auch auf andere Verkehrsmittel angewendet. Auch im Bereich der Shared-Space-Modellierung werden Social-Force-Modelle verwendet (SCHÖNAUER et al. 2012, RINKE et al. 2016). Diese Modelle ermöglichen es, Interaktionen mit vielen verschiedenen Verkehrsteilnehmern und gleichzeitig mit der Infrastruktur zu modellieren. Der Rechenaufwand ist sehr viel größer als bei Fahrzeugfolgmodellen (TWADDLE et. al., 2014).

2.4.2 Modellierung von Radverkehr mit PTV Vissim

Modelleigenschaften

Die Basis für die Anpassung der Längs- und Querverhaltensmodelle in PTV Vissim wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts von FALKENBERG et al. (2003) erarbeitet. Im Wesentlichen waren dies zwei Erweiterungen: Zum einen wurde eine kontinuierliche y-Achse eingeführt, entlang der ein Simulationsobjekt seine Position auf dem Streckenquerschnitt wählen kann, d. h. das Querverhalten ist grundsätzlich nicht spurgebunden. Zum anderen wird die Geometrie von Zweirädern durch eine Raute abstrahiert anstatt des für Kfz verwendeten Rechtecks. Dieser Unterschied ist insbesondere beim Aufstellen an Knotenpunkten von Bedeutung.

Durch die freie Wahl der lateralen Position ergibt sich die Notwendigkeit, in jedem Zeitschritt nicht nur die Beschleunigung (x-Achse), sondern auch eine Positionierung und entsprechende Bewegungsrichtung entlang der y-Achse zu bestimmen. Bei der Interaktion mit anderen bewegten Simulationsobjekten wird dieses Problem mithilfe der Berechnung der Kollisionszeit gelöst. Die Kollisionszeit bezeichnet die Zeit bis zu einem potenziellen Zusammenstoß in Sekunden unter der Annahme konstanter Geschwindigkeiten. Befinden sich innerhalb der Vorausschauweite ein oder mehrere andere Simulationsobjekte auf dem gleichen

Fahrstreifen, dann wird die Kollisionszeit mit diesen berechnet. Jedes Simulationsobjekt sucht dann diejenige Position auf der y-Achse, die die aktuelle Kollisionszeit zu allen anderen Simulationsobjekten maximiert. Die Wahl der Position im unbeeinflussten Zustand kann über Fahrverhaltensparameter bestimmt werden. Dies erfolgt über die Wahl der Ausgangsposition innerhalb des Fahrstreifens (rechts, mittig, links oder beliebig) und einen gewünschten Seitenabstand. Der Seitenabstand zu anderen Simulationsobjekten kann geschwindigkeitsabhängig (mittels linearer Interpolation) bestimmt werden (FALKENBERG et al., 2003).

Für die Wahl der Beschleunigung pro Zeitschritt (Längsverhalten) wird das Wiedemann 99-Modell verwendet, das in gleicher Form für die Modellierung von Kfz verwendet wird. Zur Anpassung der Parameter des Wiedemann-Modells gibt es einen voreingestellten Standard-Parametersatz für das Fahrverhalten „Radweg (freies Überholen)“, eine Wunschgeschwindigkeitsverteilung und Funktionen für die Wunsch- und Maximalbeschleunigung sowie die Wunsch- und Maximalverzögerung.

Modellkalibrierung

Die grundsätzliche Anwendbarkeit des Modells wurde unter anderem innerhalb einer Studie (COWI, 2013) gezeigt, die von der Stadt Kopenhagen in Auftrag gegeben wurde und in Zusammenarbeit mit der PTV AG entstand. Anhand von Daten aus Kopenhagen wurden Modellparameter bestimmt, um neuen Entwicklungen im Radverkehr (bspw. der steigende Anteil von Pedelecs und Lastenfahrrädern) und unterschiedlichen Verhaltensweisen an verschiedenen Infrastrukturelementen (Bushaltestelle, Lichtsignalanlagen, etc.) Rechnung zu tragen. Zu diesem Zweck wurden die Verteilungen für die Wunschgeschwindigkeit und die Beschleunigungen, differenziert nach Fahrradtyp, anhand empirischer Daten ermittelt. Außerdem wurden die Fahrverhaltensparameter für das Folgen und Überholen an unterschiedliche Infrastrukturelemente angepasst. Neben einem Standard-Parametersatz für das Verhalten auf der Strecke wurden Kalibrierungen für das Verhalten an Engstellen, Bushaltestellen und Kreuzungen (differenziert nach Wartebereich, Haltelinie und Rechtsabbiegen) vorgenommen. Für die Darstellung von Lastenfahrrädern und Pedelecs wurden neue 3D-Modelle angelegt. Der Bericht fokussiert sich allerdings auf die in Kopenhagen vorhandenen Infrastrukturelemente und das dortige Fahrer- und Fahrrad-Kollektiv.

Äquivalente Überprüfungen der Fahrverhaltensparameter und der Verteilungen für die Berechnung von Geschwindigkeit und Beschleunigung anhand umfangreicher Datensätze gibt es für Deutschland nicht. Zudem wurden die Fahrverhaltensparameter mithilfe visueller Überprüfung (Vergleich von Videomaterial mit PTV Vissim-Simulationen) kalibriert und nicht quantitativ validiert. TWADDLE und GRIGOROPOULOS (2016b) haben gezeigt, dass die Beschleunigung von Radfahrern, die eine Kreuzung queren, bei einem Geschwindigkeitsverhältnis von ungefähr 0,4 zwischen aktueller Geschwindigkeit und Wunschgeschwindigkeit maximal wird. Dies steht im Gegensatz zu den im Verhältnis zur aktuellen Geschwindigkeit streng monoton fallenden Beschleunigungen in PTV Vissim, wenn die Standard-Beschleunigungsfunktion für Zweiräder eingestellt ist. Die Beschleunigungsfunktionen können jedoch frei angepasst werden.

Ein weiterer Aspekt, der wenig empirisch überprüft ist, betrifft den seitlichen Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern und Hindernissen. Der seitliche Mindestabstand wird in PTV Vissim sowohl mit Standardparametern als auch den in COWI (2013) entwickelten Parametern geschwindigkeitsabhängig modelliert. Dieser bewirkt, dass Radfahrer beim Annähern häufig nicht überholen können und zunächst abbremsen, um dann mit geringerer Geschwindigkeit zu überholen. Er gilt außerdem gleichermaßen für bewegliche wie unbewegliche Objekte – der Fahrbahnrand beispielsweise wird genauso behandelt wie ein Kfz oder ein anderer Radfahrer. Daher kritisieren auch TWADDLE et al. (2014) den starken Einfluss von Geschwindigkeit und Position der umgebenden Fahrzeuge auf einen individuellen Radfahrer, wohingegen Hindernisse auf dem Weg und Gegebenheiten der Infrastruktur nicht ausreichend berücksichtigt würden. Die Autoren schreiben dementsprechend der korrekten Kalibrierung der lateralen Abstände zu anderen Verkehrsteilnehmern eine große Bedeutung für die Bestimmung der Kapazität und Verkehrsqualität zu.

Eine weitere Einstellung bezüglich des Querverhaltens betrifft die Wahl der Ausgangsposition bei unbeeinflusstem Fahren. In FALKENBERG et al. (2003) wurde die Ausgangsposition „rechts“ gewählt. Dies wurde damit begründet, dass unbeeinflusste Radfahrer zwar eher mittig fahren, bei Beeinflussung (Überholung oder Gegenverkehr) aber der langsamere Fahrer nach rechts ausweicht. Diese Annahme ist zwar durch die empirischen Ergebnisse der Studie bestätigt worden, sie vernachlässigt aber den Faktor, dass bei Überholung von hinten der herannahende Radfahrer sich zuerst bemerkbar machen muss. Dadurch muss

der überholende Radfahrer unter Umständen zunächst seine Geschwindigkeit drosseln. Dies ist besonders bei hohen Geschwindigkeitsdifferenzen der Fall. Genau dieser Effekt kann allerdings durch die Einstellung des Mindest-Seitenabstands provoziert werden. Wie oben beschrieben sorgt eine geschwindigkeitsabhängige Einstellung des Mindest-Seitenabstandes dafür, dass vor dem Überholen zunächst abgebremst wird.

Die Annahme, dass Radfahrer für den Überholvorgang die Geschwindigkeit verringern, um die Sicherheit beim Überholen zu verbessern, ist plausibel. Allerdings sind gerade diese Effekte wichtig für das Qualitätsempfinden beim Befahren einer Radverkehrsanlage, da diese Geschwindigkeitsverringerung mangelnde Breite für sicheres Überholen signalisiert. Es sollte also quantifiziert werden, bei welchen Breiten und Verkehrsdichten dieses Verhalten auftritt, um Aussagen über die Qualitätsstufe begründet treffen zu können. Die Ergebnisse aus der Studie von FALKENBERG et al. (2003) sind hierfür nicht ausreichend. Untersuchungen aus Kopenhagen haben zudem gezeigt, dass der seitliche Überholabstand zu anderen Fahrrädern abhängig von der Verkehrsdichte ist (GREIBE und BUCH, 2016). Unter Umständen ist es also eine Frage der Bemessung der Anlage, dass auch bei hohen Verkehrsdichten ein sicherer Abstand beim Überholen eingehalten werden kann. Was ein sicherer Überholabstand ist, ist allerdings in der StVO und den ERA nicht eindeutig definiert. Als Richtwert könnte sich das in den ERA definierte Lichtraumprofil für den Radverkehr eignen. Unabhängig davon kann dieser dynamische Prozess in PTV Vissim nicht abgebildet werden.

Neben den Einstellungen zum Fahrzeugfolge-, Quer- und Überholverhalten und den Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverteilungen gibt es weitere Einflussfaktoren auf das Längsverhalten, die auf kapazitätsrelevante Kenngrößen in der Simulation wirken könnten. Ein Unterschied zwischen Kfz und Radfahrern ist beispielsweise, dass Radfahrer in der Regel einen deutlich besseren Überblick über den vor ihnen ablaufenden Verkehr haben.

Insgesamt zeigt sich, dass erheblicher Forschungsbedarf besteht, um das Verhalten eines deutschen Fahrradkollektivs auf verschiedenen Infrastrukturelementen in der Simulation abzubilden. Eine besondere Herausforderung stellen dabei mögliche Wechselwirkungen zwischen den vielen in PTV Vissim einstellbaren Parametern dar. Für den Radverkehr gibt es in der Literatur kaum Anhaltspunkte zu plausiblen Wertebereichen für die Fahrverhaltensparameter. Quantitative Sensitivitätsuntersuchungen liegen nicht vor.

2.4.3 Bewertung des Verkehrsablaufs im Radverkehr mittels Simulation

In FALKENBERG et al. (2003) wurde auf der Grundlage der durchgeführten Simulationen eine Einteilung des Verkehrsablaufs in fünf Stufen vorgenommen. Da die Simulation keine relevante Einschränkung der gefahrenen Geschwindigkeiten in den beobachteten Belastungsbereichen zeigte, suchten die Autoren nach anderen Möglichkeiten, die Verkehrsqualität zu beschreiben. Sie untersuchten daher die zeitlichen Anteile der Radfahrer, die sie im „freien Fahren“ zubringen. Dieser Zustand ergibt sich aus der Modellierung des Längsverhaltens mit dem Wiedemann-Modell. Fahrzeuge befinden sich ebenso wie Radfahrer pro Zeitschritt in jeweils einem der fünf Fahrzustände „Freies Fahren“, „Folgen“, „Annähern“, „Bremsen“ oder „Gefahrenbremsung“. Allerdings ist die Bestimmung dieses Zustands von den Modellparametern abhängig. Außerdem ist dieser Wert nur mit PTV Vissim reproduzierbar, da er modellspezifisch ist und das Wiedemann-Modell nicht in anderen Programmen verwendet wird. Diese Methode bietet also keine allgemein nachvollziehbare und mit anderen Simulationsmodellen abbildbare Grundlage für eine Abschätzung der Verkehrsqualität.

In der Untersuchung von FALKENBERG et al. (2003) betrug der gemessene Spitzenwert der Verkehrsstärke auf der Promenade in Münster 590 Rad/h. In 2017 erreichten die Belastungen an der Dauerzählstelle auf der Promenade Spitzenwerte von 1980 Rad/h. Einige Aussagen, die damals über die Qualität des Verkehrsablaufs bei simulierten Radverkehrsstärken gemacht worden sind, sind heute also empirisch überprüf- und erweiterbar. Demnach kann getestet werden, ob zwischen den Fahrtzeiten auf den Radverkehrsanlagen und den Verkehrsstärken ein signifikanter Zusammenhang besteht und ob der Zusammenhang in der Simulation realistisch abgebildet wird.

3 Erhebungskonzept

3.1 Untersuchungskollektiv

Zur Vorbereitung der Auswahl eines geeigneten Untersuchungskollektivs wurden in deutschen Städten unterschiedlicher Größe, die einen überdurchschnittlich hohen Anteil des Radverkehrs am Modal Split aufweisen, Expertengespräche mit Vertretern der verantwortlichen Straßenbauverwaltungen durchgeführt. Dabei wurden die baulichen und verkehrstechnischen Randbedingungen des derzeitigen Bestands der in der Praxis eingesetzten Radverkehrsführungsformen sowie die Herausforderungen bei der Abwicklung hoher Radverkehrsaufkommen erhoben. Basierend auf den durchgeführten Expertengesprächen wurde ein Untersuchungskollektiv ermittelt, welches zwölf Einzelanlagen und drei Netzabschnitte sowie darüber hinaus sieben Steigungsstrecken umfasst.

3.1.1 Einzelanlagen

Für die Untersuchung des Verkehrsablaufs an Einzelanlagen wurden zwölf hochfrequentierte Radverkehrsanlagen mit unterschiedlichen Randbedingungen hinsichtlich der Verkehrswegekategorie, der Führungsform, der Längsneigung und der Randnutzung ausgewählt. Die untersuchten Einzelanlagen sind getrennt nach Ein- und Zweirichtungsradverkehr in Tab. 3-1 und Tab. 3-2 dargestellt. An allen zwölf Radverkehrsanlagen wurden Querschnittsmessungen mit Seitenradargeräten und Videoerhebungen durchgeführt.

Stadt	Radverkehrsanlage	Verkehrswegekategorie	Führungsform	Breite der Radverkehrsführung [m]	Längsneigung [%]
Berlin	Oberbaumbrücke	IR III	Radfahrstreifen	1,50	1,5 / -1,5
Freiburg	Eschholzstr.	IR III	Radfahrstreifen	2,12	-1,0 / < 1,0
München	Lindwurmstr.	IR III	Radfahrstreifen / fahrbahnbegleitender Radweg	2,00 / 1,20	< 1,0
Münster	Wolbecker Str.	IR III	fahrbahnbegleitender Radweg	1,60	< 1,0
Münster	Wareндorfer Str.	IR III	fahrbahnbegleitender Radweg	1,50 / 1,60	< 1,0
Berlin	Berliner Str.	IR III	fahrbahnbegleitender Radweg	1,60	< 1,0

Tab. 3-1: Untersuchungskollektiv für Einzelanlagen im Einrichtungsradsverkehr

Stadt	Radverkehrsanlage	Verkehrswegekategorie	Führungsform	Breite der Radverkehrsführung [m]	Längsneigung [%]
Mülheim	Radschnellweg Ruhr	AR II bzw. AR III	selbstständig geführte Radverkehrsanlage	4,00	1,0
Münster	Promenade	IR II bzw. IR III	selbstständig geführte Radverkehrsanlage	4,60	< 1,0
Wuppertal	Nordbahntrasse	IR II bzw. AR III	selbstständig geführte Radverkehrsanlage	3,87	< 1,0
Göttingen	eRadschnellweg	IR II	fahrbahnbegleitende Führung als einseitiger Radweg	3,94 / 3,15	1,5
München	Erhardtstraße	IR III	fahrbahnbegleitende Führung als einseitiger Radweg	2,98	< 1,0
Hamburg	An der Alster	IR III	fahrbahnbegleitende Führung als beidseitiger Radweg	2,55	1,6

Tab. 3-2: Untersuchungskollektiv für Einzelanlagen im Zweirichtungsradverkehr

Im Einrichtungsradsverkehr wurde der Verkehrsablauf auf Radfahrstreifen und fahrbahnbegleitenden Radwegen analysiert. Dabei wurden für beide Führungsformen Radverkehrsanlagen mit unterschiedlichen Breiten ausgewählt, die teilweise die Planungsstandards der ERA (FGSV, 2010) unterschreiten. Alle untersuchten Radverkehrsanlagen im Einrichtungsradsverkehr sind gemäß den RIN (FGSV, 2008) der Verkehrswegekategorie IR III zuzuordnen und weisen eine Längsneigung von unter 1 % auf.

Im Zweirichtungsradverkehr wurden selbstständig geführte Radverkehrsanlagen und fahrbahnbegleitende Radwege untersucht. Auch hier wurden für beide Führungsformen Radverkehrsanlagen mit unterschiedlichen Breiten ausgewählt, die teilweise die Planungsstandards der ERA (FGSV, 2010) unterschreiten oder über diese hinausgehen. Das Untersuchungskollektiv im Zweirichtungsradverkehr umfasst dabei zwei Radverkehrsanlagen, die Teil einer Radschnellverbindung sind. Der untersuchte Streckenabschnitt des Radschnellwegs Ruhr ist gemäß den Anforderungen des AP RSV (FGSV, 2014) ausgebaut.

3.1.2 Netzabschnitte

Neben der empirischen Analyse des Verkehrsablaufs an zwölf Einzelanlagen wurde der Verkehrsablauf auf drei längeren Radverbindungen, die den Charakter eines Netzabschnitts aufweisen und sich in mehrere Einzelanlagen (Strecken und Knotenpunkte) gliedern, untersucht. Dabei wurden für jeden Netzabschnitt beide Fahrtrichtungen analysiert. Das Untersuchungskollektiv besteht aus zwei Radschnellverbindungen zwischen wichtigen Zubringern und einer hochfrequentierten Radhauptverbindung im städtischen Bereich. Die untersuchten Netzabschnitte sind in Tab. 3-3 dargestellt und werden im Folgenden detailliert beschrieben. Eine schematische Darstellung jedes untersuchten Netzabschnitts ist im Anhang B dargestellt. An allen drei Netzabschnitten wurden Fahrtzeitmessungen durchgeführt. Dabei wurden die Fahrtzeitmessungen mit der Analyse des Verkehrsablaufs an Einzelanlagen innerhalb des Netzabschnitts verknüpft.

Stadt	Radverkehrsanlage	Verkehrswegekategorie	Führungsform	Länge [m]	Anzahl plangleicher Knotenpunkte	
					LSA-gesteuert	vorfahrtgeregelt
Göttingen	eRadschnellweg	IR II	fahrbahnbegleitende Führung als einseitiger Zweirichtungsradweg / Fahrradstraße	2.050	4	4
Mülheim / Essen	Radschnellweg Ruhr	AR II bzw. AR III	selbstständig geführte Radverkehrsanlage	4.685	0	0
München	Lindwurmstraße	IR III	Radfahrstreifen / fahrbahnbegleitende Führung als beidseitiger Einrichtungsradschnellweg	2.315	8 (FR West) 9 (FR Ost)	2 (FR West) 8 (FR Ost)

Tab. 3-3: Untersuchungskollektiv für Netzabschnitte

eRadschnellweg in Göttingen

Der eRadschnellweg stellt die Verbindung des Nord Campus der Universität mit dem Hauptbahnhof in Göttingen dar und weist eine Gesamtlänge von 3.750 m auf. Der Radverkehr wird dabei auf 2.400 m Länge als fahrbahnbegleitende Führung im Seitenraum als einseitiger Zweirichtungsradweg und auf 1.350 m Länge als Fahrradstraße geführt. Der eRadschnellweg umfasst insgesamt 15 plangleiche Knotenpunkte und ist gemäß den RIN (FGSV, 2008) der Verkehrswegekategorie IR II zuzuordnen.

Als Untersuchungsabschnitt wurde der Netzabschnitt zwischen dem Knotenpunkt Robert-Koch-Straße / Goldschmidtstraße und dem Knotenpunkt Goßlerstraße / Käthe-Hamburger-Weg gewählt. Der untersuchte Netzabschnitt des eRadschnellwegs weist in beiden Fahrtrichtungen vier vorfahrtgeregelte und vier LSA-gesteuerte Knotenpunkte über eine Länge von 2.050 m auf, wovon 990 m als fahrbahnbegleitende Führung im Seitenraum als einseitiger Zweirichtungsradweg mit einer Breite von 3,94 m ausgebaut sind. Der Zweirichtungsradweg verengt sich auf einer Länge von 120 m im Bereich der Brücke über die B 27 auf eine Breite von 3,15 m. Auf den weiteren 1.060 m des untersuchten Netzabschnitts wird der Radverkehr gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr auf einer Fahrradstraße mit einer Breite von 5,60 m geführt. An allen Knotenpunkten mit Vorfahrtregelung wird der Radverkehr mit Vorrang geführt. Entlang drei aufeinanderfolgender LSA findet eine Koordinierung des Radverkehrs mit einer Progressionsgeschwindigkeit von 16 km/h in Fahrtrichtung Nord und 22 km/h in Fahrtrichtung Süd statt.

Radschnellweg Ruhr in Mülheim und Essen

Der erste realisierte Teilabschnitt des Radschnellwegs Ruhr (RS1) zwischen Mülheim und Essen weist eine Gesamtlänge von 10.400 m auf und stellt für den Radverkehr eine direkte Verbindung des Mülheimer

Hauptbahnhofs mit der Universität in Essen her. Als selbstständig geführte Radverkehrsanlage umfasst der Radschnellweg Ruhr nur einen LSA-gesteuerten Knotenpunkt und ist im aktuellen Ausbauzustand gemäß den RIN (FGSV, 2008) der Verkehrswegekategorie AR II zuzuordnen. Die Anbindung des Radverkehrs an den Radschnellweg Ruhr findet durch Rampen und Zubringer statt.

Der RS1 lässt sich hinsichtlich des Querschnitts in zwei Abschnitte unterteilen. Auf dem ersten Abschnitt mit einer Länge von 5.820 m ist der Querschnitt gemäß dem AP RSV (FGSV, 2014) mit einer Breite von 4,00 m für den Radverkehr ausgebaut, wobei lediglich auf einer Länge von 750 m der Trennstreifen zwischen Fuß- und Radverkehr mit einer Breite von 0,50 m fehlt. Des Weiteren weist der RS1 in diesem Abschnitt eine Engstelle mit einer Länge von 25 m und einer Gesamtbreite von 4,50 m für Fuß- und Radverkehr auf. Auf dem zweiten Abschnitt mit einer Länge von 4.580 m ist der RS1 als gemeinsamer Geh- und Radweg mit einer Breite von 3,50 m bis 5,00 m ausgebaut und weist neun Engstellen auf.

Der untersuchte Netzabschnitt zwischen dem Mülheimer Hauptbahnhof und der Stadtgrenze Essen hat eine Länge von 4.685 m, enthält keine plangleichen Knotenpunkte und ist gemäß dem AP RSV (FGSV, 2014) mit einer Breite von 4,00 m für den Radverkehr ausgebaut. Die Längsneigung auf dem untersuchten Netzabschnitt beträgt 1,0 % in Fahrtrichtung Essen.

Lindwurmstraße in München

Die Lindwurmstraße in München stellt über eine Länge von 2.255 m eine Hauptverbindung in die Münchener Innenstadt dar und ist gemäß den RIN (FGSV, 2008) der Verkehrswegekategorie IR III zuzuordnen. Der Radverkehr wird auf der Lindwurmstraße fahrbahnbegleitend auf beidseitigen Einrichtungsradwegen geführt. Die Breite der Radwege beträgt dabei zwischen 0,80 und 1,50 m. In Fahrtrichtung West verfügt die Lindwurmstraße auf einer Länge von 220 m über Radfahrstreifen mit einer Breite von 2,00 m. Aufgrund einer Brückenunterführung wird der Radverkehr in Fahrtrichtung Ost auf einer Länge von 90 m auf einem gemeinsamen Geh- und Radweg geführt. Der Netzabschnitt weist dabei in Fahrtrichtung West acht LSA-gesteuerte und zwei vorfahrtsregelte Knotenpunkte mit Vorrang für den Radverkehr auf. Die Fahrtrichtung Ost umfasst acht vorfahrtsregelte Knotenpunkte mit Vorrang für den Radverkehr und acht Knotenpunkte mit LSA.

3.1.3 Steigungsstrecken

Zur Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens an Steigungsstrecken wurden sieben Steigungsstrecken mit unterschiedlicher Längsneigung, Länge der Steigungsstrecke sowie Führungsform untersucht. Im Gegensatz zu den untersuchten Einzelanlagen (vgl. 3.1.1) und Netzabschnitten (vgl. 3.1.2) wird an den Steigungsstrecken der Einfluss der Steigung auf das Geschwindigkeitsverhalten ohne Beeinflussung durch andere Radfahrer oder sonstige Beeinträchtigungen analysiert. Daher besteht das Untersuchungskollektiv größtenteils aus Radverkehrsanlagen mit geringen bis mittleren Verkehrsstärken. Lediglich die Lindwurmstraße in München stellt eine hochfrequentierte Radverkehrsanlage dar. Die untersuchten Steigungsstrecken sind in Tab. 3-4 dargestellt. An allen sieben Steigungsstrecken wurden im Rahmen der Untersuchung GPS-gestützte Verfolgungsfahrten durchgeführt. Ergänzt wird die Datengrundlage durch Querschnittsmessungen aus einer früheren Untersuchung an der Universitätsstraße und der Bessemerstraße in Bochum sowie an der Lerchenstraße in Essen.

Stadt	Radverkehrs-anlage	Verkehrswe-gekategorie	Führungsform	Breite der Radver-kehrsführung [m]	Länge der Stei-gungsstrecke [m]	Längsnei-gung [%]
Bochum	Universitätsstr.	IR III	Radfahrstreifen	2,00	585	2,5
Bochum	Bessemerstr.	IR III	Radfahrstreifen	2,50	280	3,5
Essen	Lerchenstr.	IR IV	Radfahrstreifen	2,00	1.400	3,9
Unna	Morgenstr.	IR III	Einrichtungsradweg	1,00	115	3,8
Unna	Kamener Str.	IR III	Einrichtungsradweg	1,50	240	1,2
Unna	Wasserstr.	IR III	Einrichtungsradweg	0,80	250	3,5
München	Lindwurmstr.	IR III	Einrichtungsradweg	1,00 / 0,80	165	4,2

Tab. 3-4: Untersuchungskollektiv für Steigungsstrecken

3.1.4 Erhebungen zur Analyse des Fahrverhaltens in Gruppen

Zur Analyse des Fahrverhaltens in Gruppen wurden an drei Radverkehrsanlagen im Stadtgebiet von Karlsruhe ergänzende Erhebungen vorgenommen. Dazu wurden Videomessungen an durch den Radverkehr stark genutzten Hauptachsen in der Nähe des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt (vgl. Bild 3-1). Die Messungen fanden am 15.10.2019 von ca. 08:00 Uhr bis 20:00 Uhr statt. Der Messzeitraum lag damit innerhalb der Vorlesungszeit. Die Untersuchungsstrecken decken drei unterschiedliche Arten der Radverkehrsführung ab:

- Knielinger Allee:
 - gemeinsamer Geh- und Radweg
 - Breite ca. 5 m
 - ca. 1.500 Radfahrer im Messzeitraum
- Zirkel:
 - Fahrradstraße, für den Kfz-Verkehr freigegeben
 - Breite ca. 4 m, zusätzlich jeweils ca. 1,5 m seitlicher Pflasterstreifen
 - ca. 4.000 Radfahrer im Messzeitraum
- Karl-Wilhelm-Straße:
 - Radfahrstreifen
 - Breite 2 m
 - ca. 1.200 Radfahrer im Messzeitraum (Richtung Ost)

An allen drei Messstellen wurden Geschwindigkeiten mithilfe auf dem Boden markierter Linien bestimmt und zusätzliche Merkmale der Radfahrer erhoben. Im Falle der Knielinger Allee und des Zirkels wurden Radfahrer in beiden Richtungen aufgezeichnet. Auf der Karl-Wilhelm-Straße wurden Radfahrer in Fahrtrichtung Osten (stadtauswärts) aufgezeichnet. Die Videobildaufösungen wurden so gewählt, dass eine Erkennung einzelner Verkehrsteilnehmer nicht möglich war.

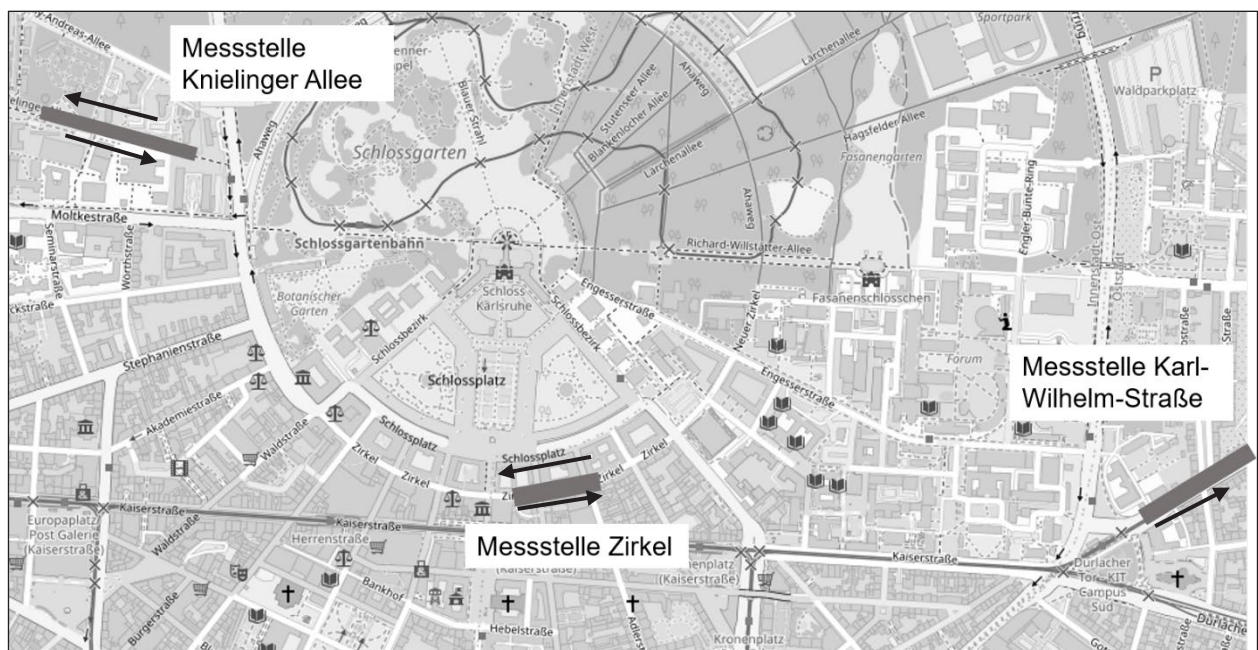


Bild 3-1: Messstellen in Karlsruhe (Karte: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

3.2 Erhebungsmethodik

Die Datengrundlage der vorliegenden Untersuchung bilden eigene Verkehrsmessungen. Eine Übersicht der durchgeführten Messungen sowie der Erhebungszeiträume ist im Anhang A dargestellt.

3.2.1 Querschnittsmessungen

Um den Verkehrsablauf an den Einzelanlagen (vgl. 3.1.1) zu analysieren, wurden Verkehrsmessungen mit Seitenradargeräten und Videotechnik durchgeführt. Die Messungen erfolgten jeweils über einen Zeitraum von mindestens 8 Stunden je Messstelle, insbesondere während der Morgen- und/oder Nachmittagsstunden.

Seitenradarmessungen

Zur Ermittlung der gefahrenen Geschwindigkeiten einzelner Radfahrer und der Zeitlücken wurde an jeder Einzelanlage an zwei aufeinanderfolgenden Querschnitten eine Seitenradarmessung durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Kamera seitlich der Radverkehrsanlage eingesetzt, um die Fahrradtypen im Fahrradkollektiv identifizieren und einer detektierten Geschwindigkeit zuordnen zu können. Die Position der Seitenradargeräte und Videokameras wurde an jeder Einzelanlage so gewählt, dass eine Beeinflussung der Geschwindigkeit durch angrenzende Knotenpunkte ausgeschlossen ist. Die Auswertung der Videoaufzeichnungen erfolgte manuell. Die Kamera zur Erfassung der Fahrradtypen wurde so ausgerichtet, dass nur die Fahrräder und keine Personen erkennbar waren. Aus den erhobenen Daten der einzelnen Radfahrer konnte die Verkehrsstärke ermittelt werden. Aufgrund von Parallelfahrten oder geringer Zeitlücken zwischen Radfahrern wurden teilweise mehrere Radfahrer vom Seitenradargerät als ein Radfahrer detektiert. Anhand der Videoaufzeichnung im Seitenraum wurden nicht detektierte Radfahrer bei der Berechnung der Verkehrsstärke ergänzt. Des Weiteren konnten anhand der Videoaufzeichnung die ggf. detektierten Kraftfahrzeuge oder Fußgänger aus der Datengrundlage entfernt werden.

Fahrräder lassen sich hinsichtlich der Geometrie und dem Aufbau des Rahmens sowie aufgrund des Zwecks der Nutzung in verschiedene Fahrradtypen unterteilen (BRUST et al., 2016). Für die weiteren Analysen wurden die beobachteten Fahrradtypen in weitere Oberkategorien für Fahrradtypen zusammengefasst. Dabei wurde bei der Bestimmung der Fahrräder im Fahrradkollektiv nach folgenden Oberkategorien für Fahrradtypen differenziert:

- Alltagsrad,
- Pedelec (Fahrrad mit Elektroantrieb),
- Rennrad,
- sonstige Fahrräder (bspw. Lastenrad oder Kinderfahrrad).

Die optischen Merkmale der einzelnen Fahrradtypen sowie deren Zuordnung in Oberkategorien ist in Tab. 3-5 dargestellt.

Falls ein Fahrradtyp der Kategorie „sonstige Fahrräder“ aufgrund besonders häufiger Detektion an einer Einzelanlage einen ausreichenden Stichprobenumfang erreichte, wurde dieser Fahrradtyp an dieser Einzelanlage differenziert analysiert. Bei dem Fahrradtyp Rennrad wurde ausschließlich die Nutzung im Alltagsradverkehr (keine Rennradfahrer mit Trikots etc.) berücksichtigt.

An den Steigungsstrecken der Universitätsstraße und der Bessemerstraße in Bochum sowie der Wittenbergstraße und der Lerchenstraße in Essen wurde ebenfalls an drei aufeinanderfolgenden Querschnitten eine Seitenradarmessung durchgeführt. Dazu wurden jeweils am Beginn, in der Mitte und am Ende der Steigungsstrecke gefahrene Geschwindigkeiten einzelner Radfahrer erhoben. Die Fahrradtypen im Fahrradkollektiv wurden vor Ort notiert und einer detektierten Geschwindigkeit zugeordnet. Es wurden nur Geschwindigkeiten ausgewertet, bei denen der Radfahrer seine Geschwindigkeit frei wählen konnte und nicht beeinträchtigt oder beeinflusst wurde.

Oberkategorie	Fahrradtyp	Optische Merkmale
Alltagsrad	Tourenrad (Stadtad oder City-Rad)	unauffälliger Rahmen, aufrechte Sitzposition
	Reiserad	stabiler Rahmen, Packtaschen
	Mountainbike	stabiler Rahmen mit Federung, breite Bereifung
	Trekkingrad	Mountainbike-Rahmen, aber dünnere Bereifung
Pedelec	Pedelec	Alltagsrad mit limitierter Tretunterstützung
Rennrad	Rennrad	dünner Rahmen, schmale Bereifung, schmaler Lenker
sonstige Fahrräder	Lastenrad	stabiler Rahmen, große Gepäckträger
	Kinderfahrrad	sehr kleiner Rahmen
	BMX	sehr kleiner Rahmen, keine Gangschaltung
	Cruiser	aufrechte Sitzposition, Aussehen ähnelt Motorrädern
	Dreirad ¹⁾	drei Räder
	Fahrrad mit Anhänger	separater Anhänger hinter dem Fahrrad befestigt
	Liegerad	liegende Position des Radfahrers

¹⁾ Lastenräder mit drei Rädern wurden dem Fahrradtyp Lastenrad zugeordnet

Tab. 3-5: Einteilung von Fahrradtypen in Oberkategorien sowie optische Merkmale der einzelnen Fahrradtypen

Videoerhebungen

Um das seitliche Bewegungsverhalten sowie die Anzahl der Begegnungen und Überholvorgänge an den Einzelanlagen zu ermitteln, wurde jeweils auf einem charakteristischen Streckenabschnitt der Radverkehrsanlage eine Videoerhebung durchgeführt. Die Videoerhebung erfolgte in Abhängigkeit von der Lage und den Umfeldbedingungen der Radverkehrsanlage von einem erhöht liegenden Kamerastandort (z. B. Mast oder Brücke). Bei der Videoerfassung wurden die Kamerastandorte und -perspektiven sowie die Videobildaufösungen so gewählt, dass eine Erkennung einzelner Personen ausgeschlossen war.

Anhand der Videoaufzeichnungen wurden die seitlichen Abstände bei Begegnungen und Überholungen zwischen den einzelnen Radfahrern auf dem Querschnitt ermittelt. Zusätzlich wurde der Abstand zum Seitenrand erhoben. Für die Ermittlung der Abstände wurden das Vorder- bzw. das Hinterrad als Punkt verwendet (vgl. Bild 3-2). Für jede Begegnung und Überholung wurde die gefahrene Geschwindigkeit der an der Situation beteiligten Radfahrer bestimmt. Die Bestimmung der Geschwindigkeit erfolgte – sofern möglich – anhand der Daten der Seitenradarmessung. Da aufgrund der örtlichen Lagebedingungen der Bereich der Videoerhebung und der Seitenradarmessung nicht an jeder Einzelanlage übereinstimmte, wurde für diesen Fall mit Hilfe von bekannten Abständen im Videobild eine Geschwindigkeit über eine Zeitdifferenz ermittelt. Sofern Radfahrer bei einer Begegnung oder Überholung die Flächen des Fuß- oder Kfz-Verkehrs nutzten, wurde dieser zusätzliche Breitenbedarf bestimmt.

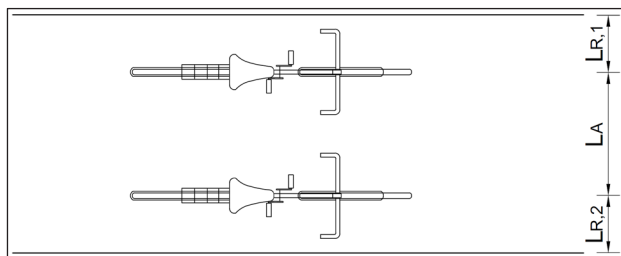


Bild 3-2: Schematische Darstellung der Ermittlung der seitlichen Abstände bei Begegnungen und Überholungen

3.2.2 GPS-gestützte Befahrungen

Fahrtverläufe wurden durch GPS-gestützte Verfolgungsfahrten an den drei Netzabschnitten und den sieben Steigungsstrecken ermittelt. Dabei wurde mit Hilfe eines Java-basierten GPS-Loggers sekundlich ein Datenpaar aus den fahrzeuggenauen Ortskoordinaten und einem Zeitstempel erfasst. Der GPS-Logger erlaubt die Filterung der NMEA-Daten, sodass nur der für die weitere Auswertung relevante GPGLA-

Datensatz aufgezeichnet wird, der alle erforderlichen Daten zur Positionsbestimmung enthält. Neben der GPS-Aufzeichnung wurde jede Verfolgungsfahrt mit einer Videokamera aufgezeichnet, um die Anzahl der Begegnungen und Überholungen zu bestimmen sowie Beeinflussungen und Beeinträchtigungen in der Auswertung zu berücksichtigen. Die Videobildauflösung wurde dabei so gewählt, dass keine Erhebung personenbezogener Daten möglich war. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass die verfolgten Radfahrer nicht in ihrem Fahrverhalten durch die Verfolgung bedrängt wurden und somit das Geschwindigkeitsverhalten nicht beeinflusst wurde.

Über die zurückgelegte Entfernung zwischen zwei Koordinatenpaaren innerhalb einer Sekunde wurde die gefahrene Geschwindigkeit bestimmt. Anhand der Ortskoordinaten der Haltlinien der einzelnen Knotenpunkte eines Netzabschnitts konnte aus den erhobenen Geschwindigkeitsprofilen (vgl. Bild 3-3) die Anzahl der Halte und die jeweilige Wartezeit ermittelt werden. Des Weiteren wurde die Verlustzeit, die sich aus der Wartezeit und dem Zeitverlust aus Verzögerung und Beschleunigung zusammensetzt, an jedem Knotenpunkt berechnet. Dazu wurde vor jedem Knotenpunkt die Wunschgeschwindigkeit jedes verfolgten Radfahrers bestimmt und nach Passieren des Knotenpunkts die Verlustzeit bis zum erneuten Erreichen der Wunschgeschwindigkeit ermittelt. Anhand der Videoaufzeichnungen wurde überprüft, dass der Radfahrer bis zum Erreichen der Wunschgeschwindigkeit nicht beeinflusst oder beeinträchtigt wurde.

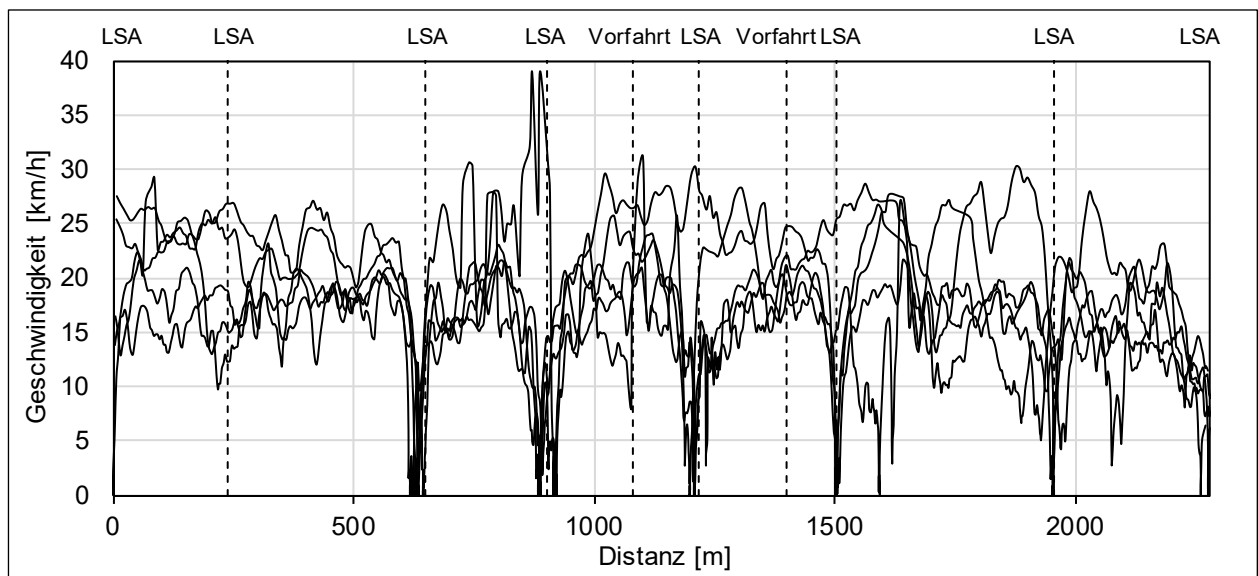


Bild 3-3: Geschwindigkeitsprofile von fünf GPS-gestützten Verfolgungsfahrten auf dem Netzabschnitt Lindwurmstraße in München

Jeder Netzabschnitt wurde sowohl während der Morgen- und/oder Nachmittagsspitzenstunden sowie zu Schwachlastzeiten befahren. Insgesamt wurden pro Netzabschnitt mindestens 20 Verfolgungsfahrten pro Fahrtrichtung durchgeführt. Bei jeder Verfolgungsfahrt wurde das geschätzte Alter und Geschlecht des Radfahrers sowie der Fahrradtyp protokolliert. Für jede Steigungsstrecke und jeden Netzabschnitt wurde versucht, ein möglichst ausgeglichenes Untersuchungskollektiv hinsichtlich Geschlecht, Alter und Fahrradtyp zu erfassen.

An den Steigungsstrecken wurden nur GPS-gestützte Verfolgungsfahrten ausgewertet, bei denen der Radfahrer seine Geschwindigkeit frei wählen konnte und nicht beeinträchtigt oder beeinflusst wurde. Die empirischen Untersuchungen der Steigungsstrecken berücksichtigen somit nur den Einfluss der Längsneigung und der Länge der Steigungsstrecke. Wechselwirkungen mit weiteren Einflüssen auf das Fahrverhalten (bspw. Überholungen) wurden nicht analysiert. Insgesamt wurden pro Steigungsstrecke mindestens 25 Verfolgungsfahrten durchgeführt.

3.2.3 Bluetooth-Messungen

Bluetooth-Geräte verfügen anhand ihrer Media-Access-Control- (MAC-) Adresse über eine individuelle und eindeutige Kennzeichnung. Bluetooth-Detektoren erkennen Endgeräte wie z. B. Mobiltelefone anhand ihrer

MAC-Adresse. Die gefundenen MAC-Adressen werden von den Bluetooth-Detektoren mit einem Zeitstempel versehen und gespeichert. Durch Datenfusion verschiedener Messstellen lassen sich Fahrtrichtung und mittlere Fahrtgeschwindigkeiten aus den erhobenen MAC-Adressen direkt ableiten. Eine manuelle Filterung von Ausreißerwerten durch die Miterfassung von Fußgängern und Kraftfahrzeugen ist jedoch teilweise erforderlich.

Bluetooth-Messungen wurden auf zwei Netzabschnitten, dem Radschnellweg Ruhr zwischen Mülheim und Essen sowie dem eRadschnellweg in Göttingen, durchgeführt. Die Messungen umfassten jeweils eine Dauer von einer Woche. Auf dem Netzabschnitt in München wurde keine Bluetooth-Messung durchgeführt, da aufgrund der fahrbahnbegleitenden Führung der Radverkehrsanlagen keine eindeutige Differenzierung von Radfahrern und Kraftfahrzeugen in den erhobenen Daten möglich war.

4 Analyse des Verkehrsablaufs an Einzelanlagen

4.1 Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitskenngrößen

4.1.1 Zusammensetzung des Fahrradkollektivs

Die mittlere Geschwindigkeit des Radverkehrs wird maßgeblich durch die Zusammensetzung des Fahrradkollektivs beeinflusst. In Bild 4-1 sind die in den Erhebungen ermittelten prozentualen Anteile der einzelnen Fahrradtypen für die Einzelanlagen dargestellt. Das Alltagsrad stellt erwartungsgemäß an allen untersuchten Radverkehrsanlagen den am häufigsten vorkommenden Fahrradtyp dar. Der prozentuale Anteil der Alltagsräder liegt dabei in einer Spanne von 63 bis 91 %. Rennräder sind an den untersuchten Einzelanlagen mit einem Anteil von 2 bis 12 % am Gesamtkollektiv vertreten. Der Anteil der Pedelecs liegt an den meisten Radverkehrsanlagen in der Spanne von unter 1 bis 3 %. Nur auf dem Radschnellweg Ruhr und auf der Nordbahntrasse wurde mit 29 bzw. 7 % ein hoher Pedelec-Anteil gemessen. Diese überdurchschnittlich hohen Anteile an Pedelecs sind vermutlich auf die starke Nutzung durch den Freizeitradverkehr zurückzuführen.

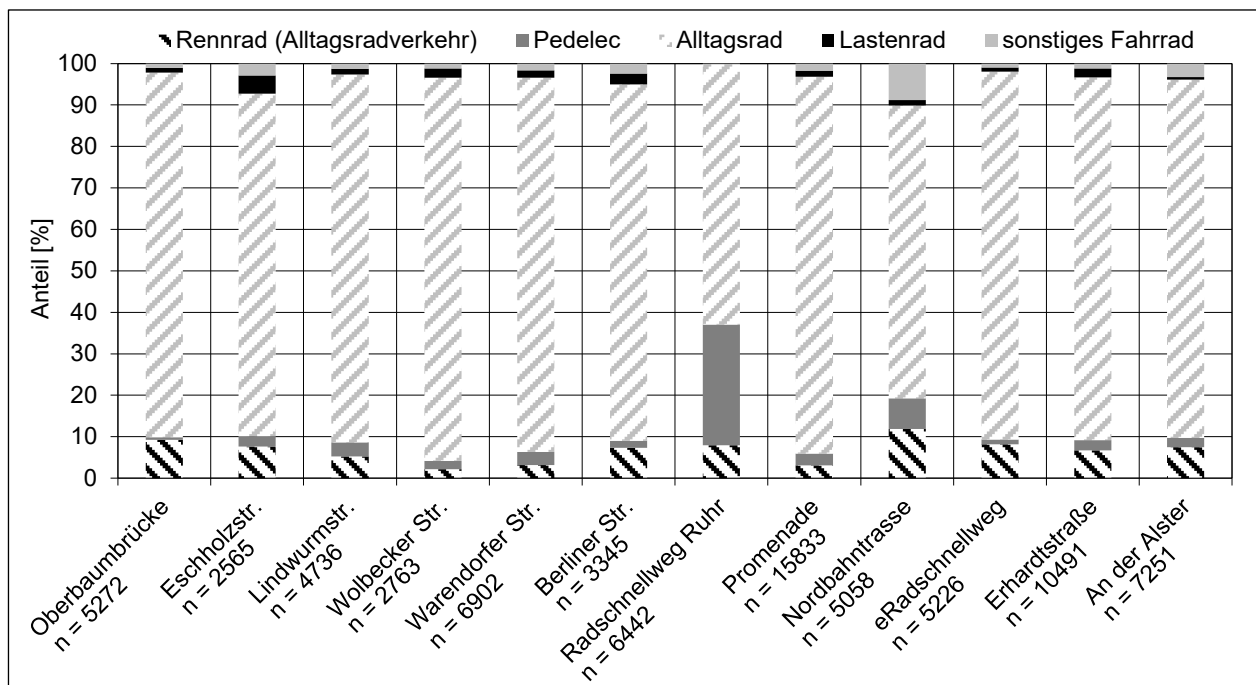


Bild 4-1: Prozentuale Anteile der einzelnen Fahrradtypen für die jeweilige Einzelanlage über den gesamten Messzeitraum

Im Hinblick auf eine zeitliche Veränderung der prozentualen Anteile der einzelnen Fahrradtypen wurde als weiteres Auswertungsintervall die höchstbelastete Stunde betrachtet. Dazu wurde für jede Einzelanlage anhand von 5-Minuten-Intervallen die Stunde mit der höchsten Verkehrsstärke ermittelt. Dabei zeigte sich, dass an allen Einzelanlagen der Anteil der Alltagsräder in der höchstbelasteten Stunde im Mittel um 2 % höher ist. Der Anteil der Pedelecs, Lastenräder und sonstigen Fahrräder ist in der höchstbelasteten Stunde größtenteils geringer als während des gesamten Messzeitraums. Der Anteil der Rennräder bleibt innerhalb der beiden betrachteten Intervalle weitgehend konstant. In der höchstbelasteten Stunde beträgt der Anteil der Rennräder zwischen 2 und 11 % und der Anteil der Alltagsräder zwischen 71 und 94 %.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sowohl während des gesamten untersuchten Zeitraums als auch während der höchstbelasteten Stunde der Verkehrsablauf auf den einzelnen Radverkehrsanlagen maßgebend durch Alltagsräder geprägt ist. Der Anteil der Rennräder beträgt in beiden Zeitintervallen durchschnittlich 7 %.

4.1.2 Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens

Zur Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens an den Einzelanlagen wurden die Mittelwerte und deren Standardabweichungen für die gemessenen Geschwindigkeiten ermittelt. Diese Werte sind für das gesamte Fahrradkollektiv in Bild 4-2 für jeden Messquerschnitt an einer Einzelanlage dargestellt. Dabei wurde nach der Längsneigung an der Messstelle differenziert. Der Einfluss der Längsneigung auf die Geschwindigkeit des gesamten Fahrradkollektivs ist dabei deutlich zu erkennen. An den Messquerschnitten mit einem Gefälle konnten überwiegend deutlich höhere mittlere Geschwindigkeiten ermittelt werden. Lediglich an der Messstelle auf der Oberbaumbrücke in Berlin sowie an der Radverkehrsanlage „An der Alster“ in Hamburg mit einer mittleren Geschwindigkeit von 18,3 bzw. 19,0 km/h konnte dieser Einfluss nicht beobachtet werden. An der Oberbaumbrücke ist dies vor allem auf den parabelförmigen Gradientenverlauf im Höhenplan zurückzuführen. Durch die Steigung stromaufwärts der Messstelle ist von einer geringeren Anfangsgeschwindigkeit am Beginn des Gefälles auszugehen. An der Radverkehrsanlage in Hamburg beginnt das Gefälle erst unmittelbar stromaufwärts einer der beiden Messstellen, sodass die Längsneigung an diesem Messquerschnitt noch keinen messbaren Einfluss auf die Geschwindigkeit hat.

Sofern keine empirischen Daten zur mittleren Geschwindigkeit sowie deren Standardabweichung an einer Radverkehrsanlage vorliegen, setzt das Bemessungsverfahren des HBS (FGSV, 2015a) eine mittlere Geschwindigkeit von 18 km/h mit einer Standardabweichung von 3 km/h an. Diese Werte beziehen sich auf Strecken ohne Längsneigung. Beim Vergleich dieser Werte mit den Ergebnissen der empirischen Erhebung wird deutlich, dass die Standardabweichungen der Geschwindigkeit an den untersuchten Einzelanlagen ohne Längsneigung fast ausschließlich höher als 3 km/h sind (vgl. Bild 4-2). Die ermittelten Standardabweichungen liegen dabei in einem Bereich von 2,9 bis 4,7 km/h. Für die Einzelanlagen ohne Längsneigung ergeben sich im Mittel eine Standardabweichung von 3,7 km/h und eine mittlere Geschwindigkeit von 18,8 km/h.

Anhand der gemessenen Geschwindigkeiten wurde ebenfalls analysiert, ob sich das Geschwindigkeitsverhalten hinsichtlich der Führung im Ein- oder Zweirichtungsradverkehr deutlich unterscheidet. Dazu wurden nur Einzelanlagen ohne Längsneigung betrachtet, da die Längsneigung eine für die Geschwindigkeit maßgebende Einflussgröße darstellt. In Bild 4-2 sind die mittlere Geschwindigkeit und deren Standardabweichung von allen Messquerschnitten der Einzelanlagen ohne Längsneigung differenziert nach Ein- und Zweirichtungsradverkehr dargestellt. Für den Zweirichtungsradverkehr sind die Ergebnisse getrennt nach Fahrtrichtungen ausgewertet worden. Es zeigt sich, dass keine deutlichen Abweichungen hinsichtlich des Mittelwerts oder der Standardabweichung der Geschwindigkeit zwischen dem Ein- und dem Zweirichtungsradverkehr auftreten. Die Mittelwerte liegen dabei zwischen 16,1 bis 20,9 km/h im Einrichtungsradsverkehr sowie zwischen 16,3 und 22,2 km/h im Zweirichtungsradsverkehr. Die Standardabweichung beträgt 3,2 bis 3,9 km/h im Einrichtungsradsverkehr sowie 2,9 bis 4,7 km/h im Zweirichtungsradsverkehr.

Als weitere Einflussgröße auf den Mittelwert und die Standardabweichung der Geschwindigkeit des gesamten Fahrradkollektivs wurde der prozentuale Anteil einzelner Fahrradtypen analysiert. In Bild 4-3 sind der Mittelwert und die Standardabweichung der Geschwindigkeiten an den Einzelanlagen ohne Längsneigung differenziert nach dem prozentualen Anteil der Lastenräder und sonstigen Fahrräder bzw. dem prozentualen Anteil der Rennräder dargestellt. Dabei wurde jeweils ein Anteil von 5 % zur Differenzierung verwendet. Es zeigt sich, dass die höchsten mittleren Geschwindigkeiten an Radverkehrsanlagen ohne Längsneigung bei einem Anteil der Rennräder ≥ 5 % erreicht werden. Für die Radverkehrsanlagen, an denen eine Standardabweichung der Geschwindigkeit größer als 4 km/h ermittelt wurde, ist sowohl der Anteil der Rennräder als auch der Lastenräder und sonstigen Fahrräder jeweils ≥ 5 %. Die hohen Standardabweichungen der Geschwindigkeit sind somit auf die Inhomogenität des Fahrradkollektivs durch die relativ hohen Anteile der einzelnen Fahrradtypen zurückzuführen.

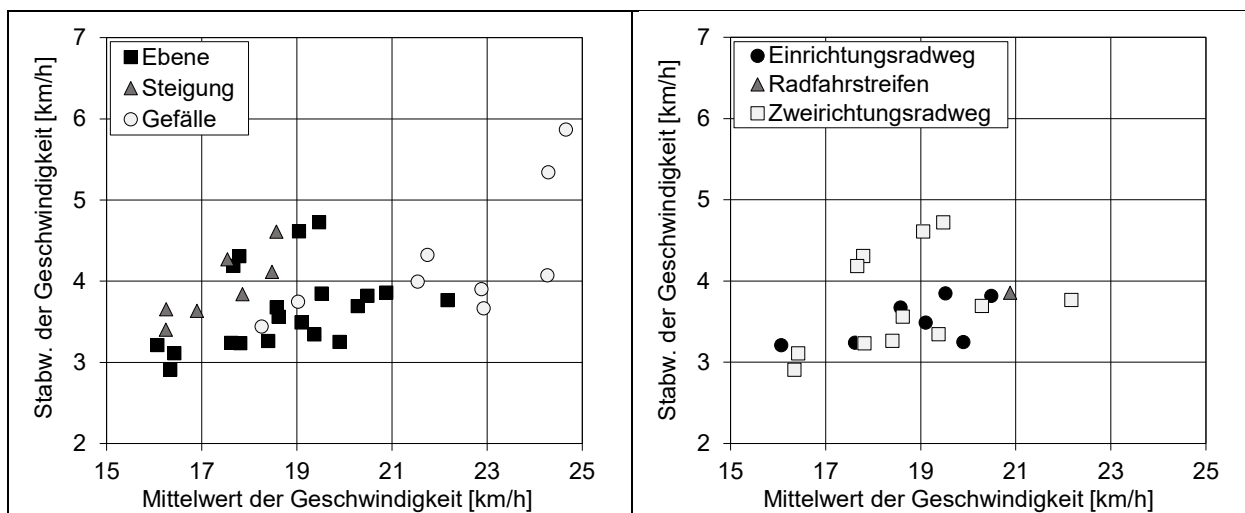


Bild 4-2: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit an den jeweiligen Einzelanlagen differenziert nach der Längsneigung (links) bzw. der Führungsform im Ein- und Zweirichtungsrادverkehr ohne Längsneigung (rechts)

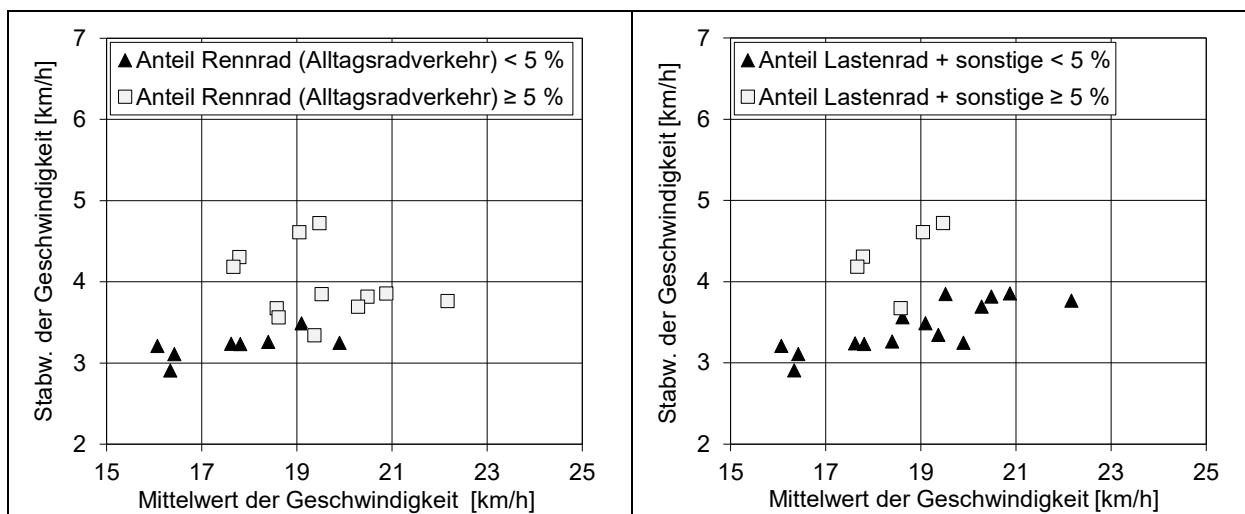


Bild 4-3: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit an den jeweiligen Einzelanlagen ohne Längsneigung differenziert nach dem Anteil der Rennräder mit Nutzung im Alltagsradverkehr (links) bzw. dem Anteil der Lastenräder und sonstigen Fahrräder (rechts)

Zur Analyse der Veränderung des Geschwindigkeitsverhaltens in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke wurden für jede Radverkehrsanlage ein Zeitintervall im Bereich der maximalen Verkehrsstärke und ein Schwachlastintervall betrachtet. Dazu wurde zunächst die höchste Summe der Verkehrsstärken in zwölf aufeinanderfolgenden 5-Minuten-Intervallen als Spitzenstunde bestimmt. Der Mittelwert und die Standardabweichung der Geschwindigkeiten der detektierten Radfahrer wurden für dieses Zeitintervall ermittelt. Zum Vergleich der gefahrenen Geschwindigkeiten wurde ebenfalls ein Zeitraum mit einer deutlich geringeren Verkehrsnachfrage betrachtet. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde der Zeitraum für das Schwachlastintervall jeweils so gewählt, dass die Anzahl der Radfahrer in beiden Intervallen gleich groß ist. Das Schwachlastintervall umfasst dabei teilweise einen Zeitraum von bis zu drei Stunden.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Geschwindigkeit in der Spitzenstunde und für das Schwachlastintervall sind in Bild 4-4 gegenübergestellt. Der Mittelwert der gefahrenen Geschwindigkeiten ist in der Spitzenstunde fast immer höher als im Schwachlastintervall. Die vier Datenpunkte mit einem höheren Mittelwert der Geschwindigkeit im Schwachlastintervall wurden auf der Nordbahntrasse in Wuppertal gemessen. Die Standardabweichungen sind dagegen überwiegend im Schwachlastintervall höher. Die Ergebnisse sind auf die unterschiedliche Zusammensetzung des Radfahrerkollektivs in den Zeitintervallen zurückzuführen. Das Radfahrerkollektiv besteht in der Morgen- und Nachmittagsspitze vor allem aus Pendlern, wohingegen die Schwachlastzeiten von einem hohen Anteil an Freizeitradfahrern geprägt sind.

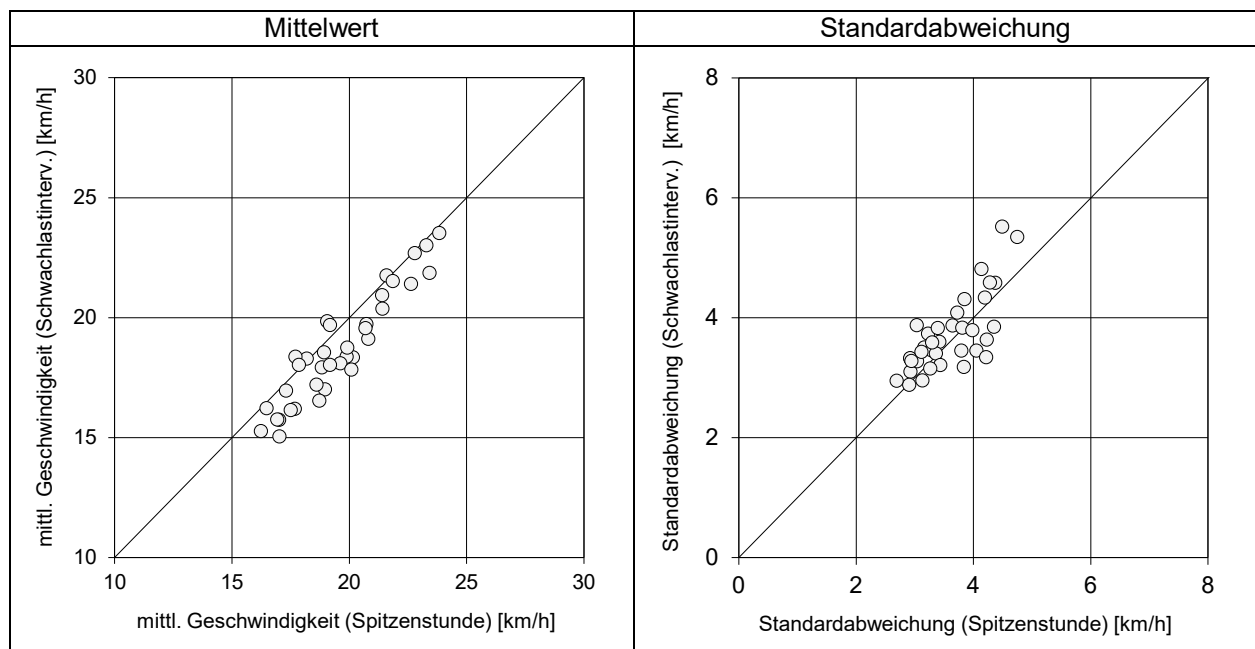


Bild 4-4: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit in der Spitzenstunde sowie im Schwachlastintervall

4.1.3 Geschwindigkeitsverteilung nach Fahrradtyp

Neben der Betrachtung des Fahrradkollektivs in der Gesamtheit wurden auch die einzelnen Fahrradtypen hinsichtlich des Geschwindigkeitsverhaltens analysiert. Dazu wurde für alle untersuchten Einzelanlagen und jeden Fahrradtyp der Mittelwert und die Standardabweichung der Geschwindigkeit über den gesamten Messzeitraum bestimmt. Für den Zweirichtungsradverkehr sind die Ergebnisse getrennt nach den Fahrrichtungen ausgewertet worden. Die Datenpaare aus Mittelwert und Standardabweichung sind differenziert nach dem Fahrradtyp und der Längsneigung (Ebene, Gefälle oder Steigung) in Bild 4-5 dargestellt.

Es wird deutlich, dass sich die einzelnen Fahrradtypen in ihrem Geschwindigkeitsverhalten maßgeblich unterscheiden. Insgesamt weisen Rennräder an allen Radverkehrsanlagen den höchsten Mittelwert der Geschwindigkeit auf. Ebenfalls konnten bei den Rennrädern fast ausschließlich höhere Standardabweichungen der Geschwindigkeit im Vergleich zu den Alltagsrädern beobachtet werden. Bei Pedececs konnte im Vergleich zu den Alltagsrädern fast ausschließlich ein höherer Mittelwert der Geschwindigkeit bei ungefähr gleicher Standardabweichung ermittelt werden. Die Lastenräder und sonstigen Fahrräder weisen im Vergleich zu den Alltagsrädern fast ausschließlich einen geringeren Mittelwert der Geschwindigkeit bei höherer Standardabweichung auf.

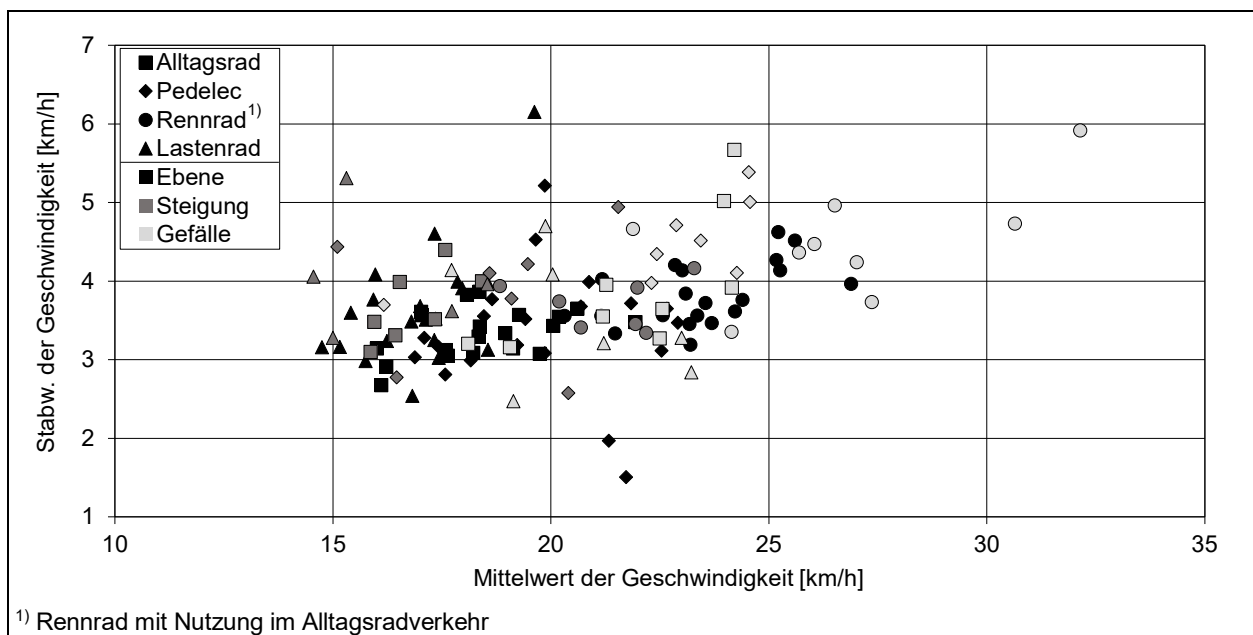


Bild 4-5: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrradtypen an den jeweiligen Einzelanlagen

Zur genauen Beschreibung des Verkehrsablaufs auf einer Radverkehrsanlage ist die Kenntnis über die Art der Verteilung der Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrradtypen von großer Bedeutung. Daher wurde überprüft, mit welcher Verteilung die Messdaten jeweils am besten beschrieben werden können. Die Analyse der Verteilung erfolgte sowohl getrennt nach Fahrradtyp als auch für das gesamte Fahrradkollektiv. Als geeignete Verteilungen zur Beschreibung der gemessenen Geschwindigkeiten wurden die Normal-, Weibull-, Gamma- und logarithmische Normalverteilung sowie die logistische Verteilung analysiert.

Bei der Verteilungsanalyse metrischer Daten können statistische Tests – bspw. der Kolmogorov-Smirnov-Test – durchgeführt werden, um zu überprüfen, ob die Daten einer bestimmten Verteilung unterliegen. Dabei wird die Nullhypothese aufgestellt, dass die Daten bspw. normalverteilt sind. Der im Rahmen des Tests ermittelte p-Wert gibt dabei die Wahrscheinlichkeit an, eine solche Stichprobe zu erhalten, wenn die Nullhypothese wahr ist. Wenn der ermittelte p-Wert des Tests kleiner oder gleich einem definierten Signifikanzniveau ist, wird die Nullhypothese verworfen. Für diesen Fall ist die Gegenhypothese, dass die Daten nicht der unterstellten Verteilung folgen, anzunehmen. Grundsätzlich besteht allerdings bei der Anwendung dieser statistischen Tests das Problem, dass mit zunehmender Anzahl der Daten die Tests sensibler für minimale Abweichungen von der unterstellten Verteilung werden. Dies hat zur Folge, dass die Nullhypothese bei einer großen Stichprobe fast ausschließlich verworfen wird.

Ob eine große Stichprobe einer bestimmten Verteilung folgt, kann anhand eines Bootstrapping-Verfahrens in Kombination mit einer Schätzung der Parameter der Verteilung durch die Maximum-Likelihood-Methode durchgeführt werden. Zunächst werden durch Maximierung der logarithmierten Likelihood-Funktion unter Annahme einer der oben genannten Verteilungen die zugehörigen Parameter der Verteilung bestimmt. Anhand der ermittelten Parameter werden für jede Verteilung weitere 1000 Bootstrapping-Stichproben mit der gleichen Anzahl an Daten simuliert. Für die simulierten Stichproben wird ebenfalls die logarithmierte Likelihood-Funktion bestimmt. Ein Vergleich zwischen den Werten der logarithmierten Likelihood-Funktionen für die simulierten und gemessenen Daten zeigt, wie gut die Verteilung mit den ermittelten Parametern die Messwerte beschreibt. Liegt der Wert für die gemessenen Daten innerhalb des Wertebereichs der simulierten Daten, kann daraus geschlossen werden, dass die Verteilungsfunktion die Messwerte sehr gut beschreibt. Liegt der Wert der gemessenen Daten außerhalb des Wertebereichs der simulierten Daten, beschreibt die unterstellte Verteilung die Daten nicht plausibel.

Insgesamt zeigte sich für die einzelnen Fahrradtypen, dass bei der Normal-, Gamma- und logarithmischen Normalverteilung die Werte der logarithmierten Likelihood-Funktion der gemessenen Daten im Bereich des Mittelwerts und des Medians für den Wertebereich der logarithmierten Likelihood-Funktion der simulierten Daten liegen. Neben den einzelnen Fahrradtypen wurde ebenfalls überprüft, ob das gesamte Fahrradkollektiv an einem Messquerschnitt einer bestimmten Verteilung folgt. Dabei zeigte sich wiederum, dass die

Normal-, Gamma- und logarithmische Normalverteilung zur Beschreibung der Geschwindigkeitsverteilung geeignet sind. Exemplarisch ist in Bild 4-6 ein Histogramm der Geschwindigkeiten differenziert nach Fahrradtyp sowie die Anpassung einer Normal-, Gamma- und logarithmischen Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Erhardtstraße in München in Fahrtrichtung Nord dargestellt.

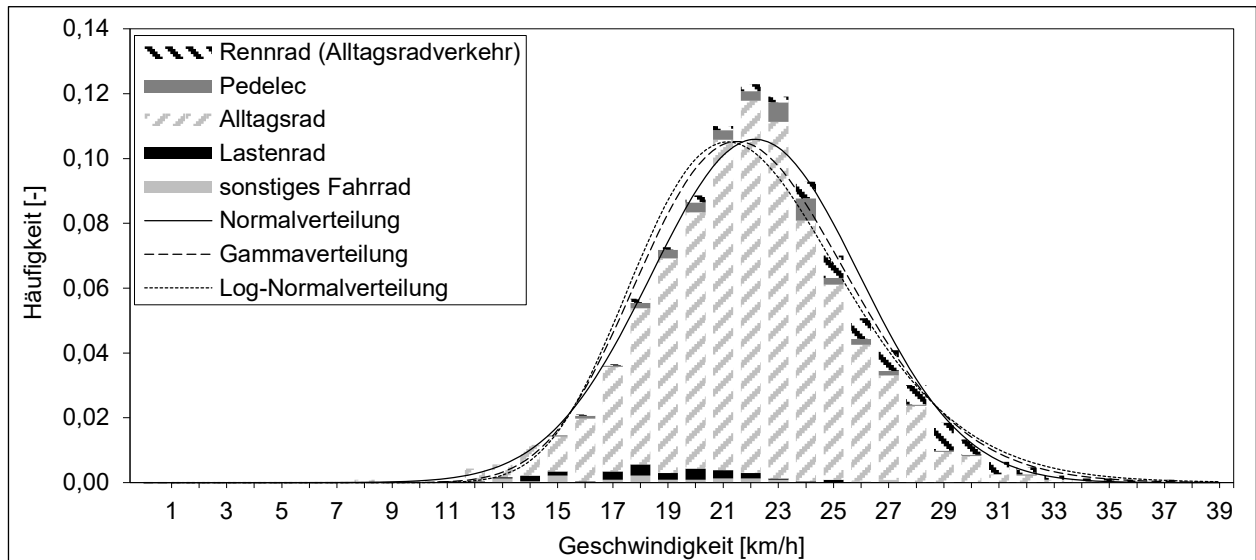


Bild 4-6: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normal-, Gamma- und logarithmischen Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Erhardtstraße in München in Fahrtrichtung Nord

4.1.4 Zeitlückenverteilung

Die Verteilung der Zeitlücken stellt eine relevante mikroskopische Kenngröße zur Beschreibung des Verkehrsablaufs dar. Dabei wird die Zeitlückenverteilung direkt von der Verkehrsstärke beeinflusst. Daher wurde für alle Radverkehrsanlagen die Zeitlückenverteilung fahrtrichtungsgetrennt und in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen bestimmt. Bild 4-7 zeigt die Auswertung der Brutto-Zeitlückenverteilung für vier Verkehrsstärkekassen am Beispiel der Promenade in Münster in Fahrtrichtung Süd. Der relativ hohe Anteil an Zeitlücken ≤ 1 s in allen Verkehrsstärkekassen ist dabei auf die große Breite der Radverkehrsanlage zurückzuführen, die pro Fahrtrichtung zwei Radfahrern im Querschnitt ausreichend Bewegungsspielraum bspw. für Überholungen zur Verfügung stellt. Daher kann für Zeitlücken ≤ 1 s nicht zwangsläufig von einer Beeinflussung durch den vorausfahrenden Radfahrer ausgegangen werden.

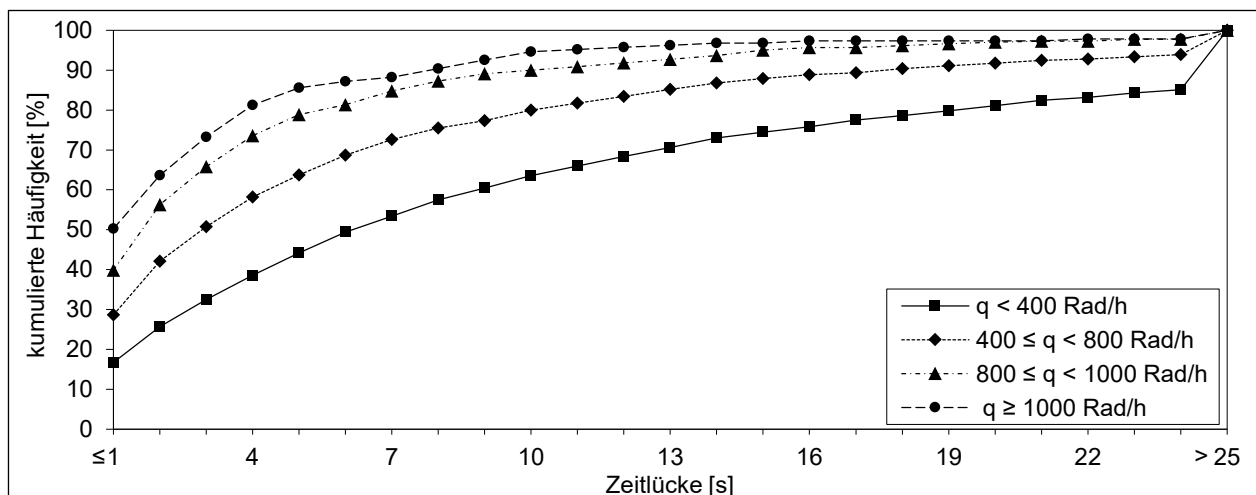


Bild 4-7: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für die Promenade in Münster in Fahrtrichtung Süd

Die Verteilungen der Brutto-Zeitlücken sind getrennt nach Fahrtrichtung für alle untersuchten Radverkehrsanlagen in Anhang B dargestellt.

4.1.5 Wunschgeschwindigkeit

Die Wunschgeschwindigkeit stellt die Geschwindigkeit dar, die ein Verkehrsteilnehmer wählt, wenn er nicht durch andere Verkehrsteilnehmer beeinflusst wird. Eine Kenntnis über die Wunschgeschwindigkeitsverteilung ist vor allem für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation von Bedeutung.

Für die Ermittlung von Verteilungsfunktionen der Wunschgeschwindigkeit von Radfahrern wurde der Ansatz von HOOGENDOORN (2005) aus dem Kfz-Verkehr in der vereinfachten Form von GEISTEFELDT (2011) verwendet. Dabei wird eine Verteilungsfunktion der Wunschgeschwindigkeit mit Hilfe mathematischer Verfahren der Lebensdaueranalyse ermittelt. Die gemessenen Geschwindigkeiten einzelner Radfahrer werden in zensierte und unzensierte Geschwindigkeiten unterteilt. Im Kfz-Verkehr stellt ein zensierter Wert eine gemessene Geschwindigkeit dar, bei der aufgrund der geringen Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug von einer Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens ausgegangen wird. Bei einem zensierten Wert kann die Wunschgeschwindigkeit nicht direkt gemessen werden, muss aber größer oder gleich der gemessenen Geschwindigkeit sein. Bei einem unzensierten Wert, also einem unbeeinflussten fahrenden Fahrer, kann die gemessene Geschwindigkeit als Wunschgeschwindigkeit aufgefasst werden. Im Gegensatz zum fahstreifengebundenen Kfz-Verkehr können aufgrund des anderen Überholverhaltens im Radverkehr jedoch auch Geschwindigkeiten mit geringen Zeitlücken zum vorausfahrenden Radfahrer auftreten, ohne dass das Geschwindigkeitsverhalten dabei beeinflusst ist. Dies ist vor allem bei breiten Radwegen und geringen Verkehrsstärken der Fall.

Bei der Anwendung des Verfahrens wird von einer Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens ausgegangen, wenn die Zeitlücke zum vorausfahrenden Radfahrer kleiner als der Grenzwert t_v ist. Als Grenzwert wurde $t_v = 2$ s angesetzt.

Durch Maximierung der logarithmierten Likelihood-Funktion unter Annahme normalverteilter Wunschgeschwindigkeiten können der Mittelwert und die Standardabweichung mit Gleichung (4-1) geschätzt werden.

$$L = \prod_{i=1}^n f(v_w)^{\delta_i} \cdot [1 - F(v_w)]^{1-\delta_i} \quad (4-1)$$

mit

$f(v_w)$ = Dichtefunktion der Wunschgeschwindigkeit [-]

$F(v_w)$ = Verteilungsfunktion der Wunschgeschwindigkeit [-]

n = Anzahl der erfassten Radfahrer [-]

δ_i = 1, wenn Radfahrer i unbeeinflusst fährt [-]

δ_i = 0, wenn Radfahrer i beeinflusst fährt [-]

Die nach Gleichung (4-1) ermittelte Verteilung der Wunschgeschwindigkeit für den Grenzwert der Zeitlücke t_v wurde der Verteilung der Geschwindigkeit aller Radfahrer (beeinflusst oder unbeeinflusst) sowie der Geschwindigkeitsverteilung für die unbeeinflussten fahrenden Radfahrer gegenübergestellt. Exemplarisch sind in Bild 4-8 die Ergebnisse für die Promenade in Münster in Fahrtrichtung Nord dargestellt.

An allen untersuchten Messquerschnitten konnten nur sehr geringe Abweichungen zwischen der Verteilung der Geschwindigkeiten der unbeeinflussten fahrenden Radfahrer und der Geschwindigkeitsverteilung aller Radfahrer festgestellt werden. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass das Geschwindigkeitsverhalten der Radfahrer, die eine geringe Zeitlücke zum vorausfahrenden Radfahrer haben, kaum beeinflusst ist. Demnach entsprechen die gemessenen Geschwindigkeiten den Wunschgeschwindigkeiten der Radfahrer. Die mit dem Ansatz von HOOGENDOORN (2005) berechnete Wunschgeschwindigkeitsverteilung in Bild 4-8 überschätzt somit die tatsächlichen Wunschgeschwindigkeiten der Radfahrer.

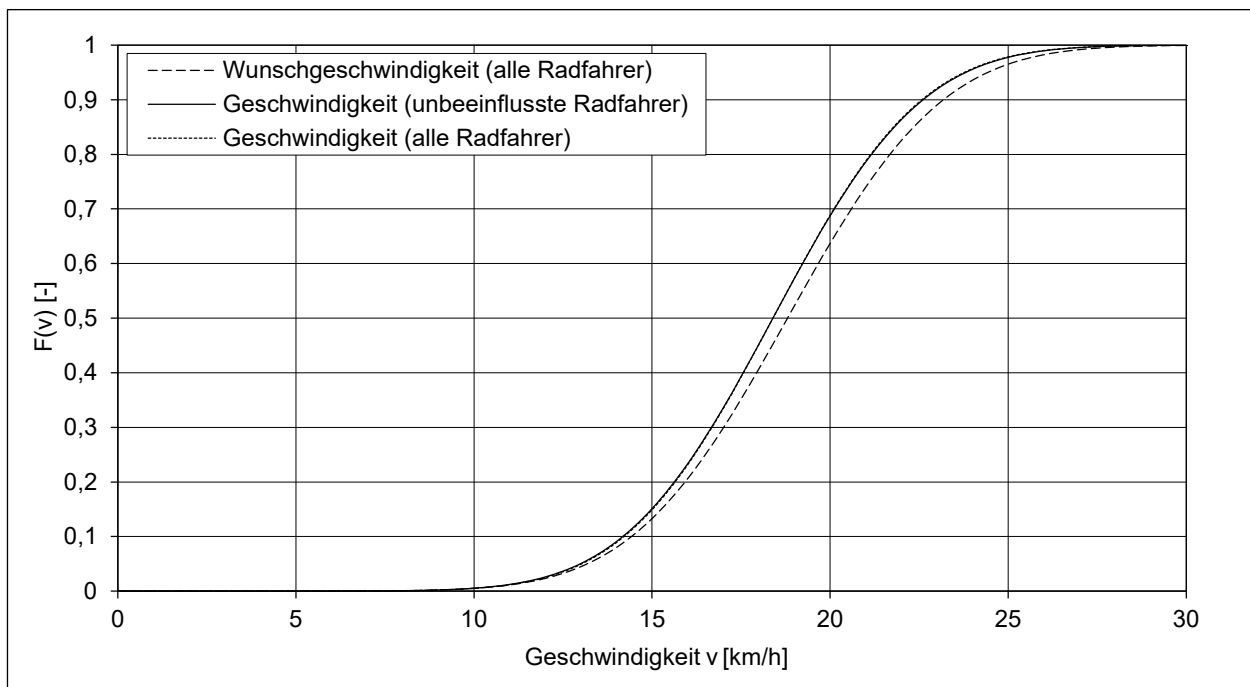


Bild 4-8: Verteilungsfunktionen der Wunschgeschwindigkeit sowie der Geschwindigkeit aller Radfahrer (beeinflusst oder unbeeinflusst) und der Geschwindigkeit für die unbeeinflusst fahrenden Radfahrer (ohne Berücksichtigung zensierter Werte) für die Promenade in Münster in Fahrtrichtung Nord

4.1.6 Analyse der q-v-Beziehung

Der Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke q und der mittleren momentanen Geschwindigkeit v ist ein wichtiges Instrument zur Analyse des Verkehrsablaufs auf Straßenverkehrsanlagen. Für den Kfz-Verkehr liegen bereits umfangreiche Erkenntnisse zur Gestalt des q-v-Diagramms und den daraus ableitbaren Rückschlüssen auf den Verkehrsablauf vor. Die Gestalt von q-v-Diagrammen wird dabei nicht nur von dem Fahrverhalten der Kfz-Fahrer und der Streckencharakteristik, sondern auch von der zeitlichen Verteilung und der Höhe der Verkehrsnachfrage beeinflusst. Die Ermittlung der deterministischen Kapazität eines Streckenabschnitts kann durch Anpassung eines Verkehrsflussmodells im q-v-Diagramm und die Ermittlung der Verkehrsstärke am Scheitelpunkt der Modellfunktion erfolgen. Alternativ kann unter Annahme der Kapazität als stochastische Größe die Verteilungsfunktion der Kapazität mit statistischen Methoden für zensierte Daten ermittelt werden (BRILON, ZURLINDEN, 2003; BRILON et al., 2005). Erste Ansätze zur Übertragung von Modellen zur Bestimmung der Kapazität im Kfz-Verkehr auf den Radverkehr wurden in der Untersuchung von JIN et al. (2015) bereits analysiert.

Die Kapazität kann anhand des q-v-Zusammenhangs allerdings nur dann realistisch geschätzt werden, wenn eine ausreichend große Anzahl an Intervallen im Bereich der Überlastung vorliegt. Im Rahmen der empirischen Erhebungen lag an keiner Radverkehrsanlage eine so hohe Verkehrsnachfrage vor, dass ein kapazitätsbedingter Engpass beobachtet werden konnte. Die höchsten Verkehrsstärken wurden auf der Promenade in Münster gemessen. In Bild 4-9 sind die q-v-Diagramme in 1-Minuten- und 5-Minuten-Intervallen auf der Promenade in Münster dargestellt. Die q-v-Diagramme für alle weiteren untersuchten Einzelanlagen enthält Anhang B.

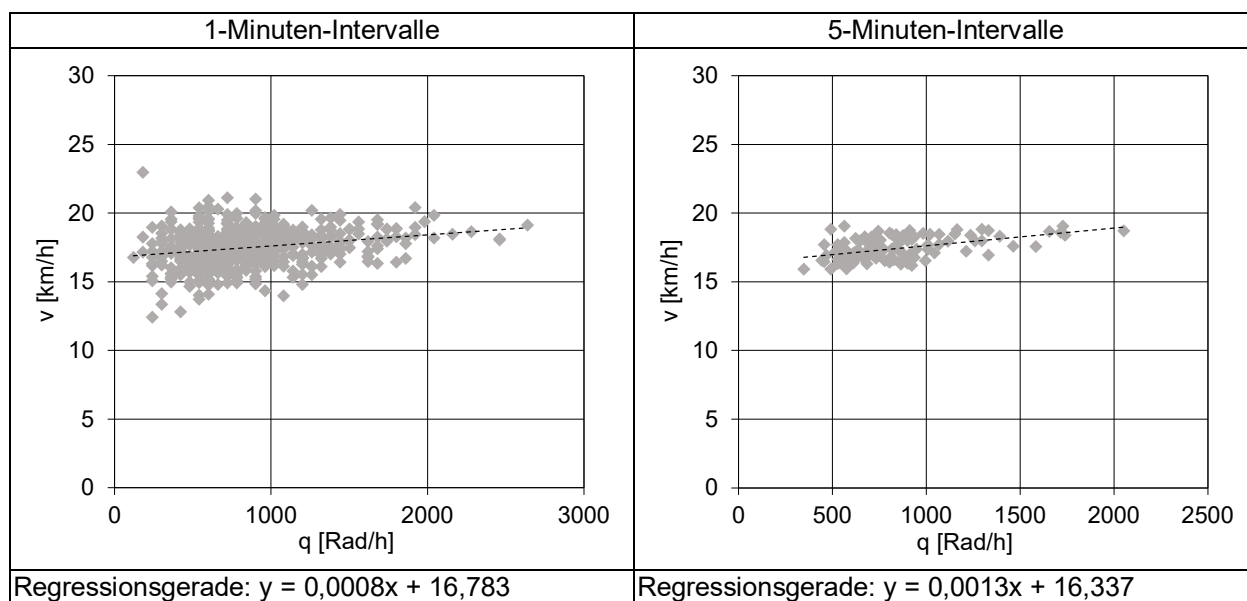


Bild 4-9: q-v-Diagramme in 1- und 5-Minuten-Intervallen auf der Promenade in Münster

Die in Bild 4-9 eingefügten Regressionsgeraden in den q-v-Diagrammen verdeutlichen, dass sich bei höheren Verkehrsstärken die mittlere momentane Geschwindigkeit ebenfalls erhöht. Anhand der erhobenen Daten wurde analysiert, ob aus dem Fahrverhalten der Radfahrer ein Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der mittleren momentanen Geschwindigkeit besteht. Dazu wurde die Nullhypothese aufgestellt, dass die Verkehrsstärke und die mittlere momentane Geschwindigkeit zwei unabhängige Variablen sind. Anhand des Chi-Quadrat-Tests nach Pearson wurde die Nullhypothese für jede Einzelanlage auf Signifikanz geprüft. Für die Auswertung des Signifikanztests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ gewählt. Wenn der ermittelte p-Wert des Signifikanztests kleiner oder gleich dem Signifikanzniveau ist, wird die Nullhypothese verworfen. Für diesen Fall ist die Gegenhypothese, dass ein statistischer Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der mittleren momentanen Geschwindigkeit vorliegt, anzunehmen.

Die Auswertungen des Signifikanztests für die Nullhypothese konnten keine einheitlichen Ergebnisse für alle Einzelanlagen liefern. An sechs Radverkehrsanlagen musste die Nullhypothese verworfen werden. Dabei handelt es sich um die Radverkehrsanlagen in Münster, die Erhardtstraße in München, die Oberbaumbrücke in Berlin sowie die Nordbahntrasse in Wuppertal. Mit Ausnahme der Nordbahntrasse liegt für diese Radverkehrsanlagen eine positive Korrelation zwischen der Verkehrsstärke und der mittleren momentanen Geschwindigkeit vor. Lediglich bei der Nordbahntrasse gehen überdurchschnittlich hohe Verkehrsstärken mit einer relativ niedrigen Geschwindigkeit einher. Bei den übrigen sechs Radverkehrsanlagen konnte die Nullhypothese nicht verworfen werden.

Zusammenfassend lässt sich aus den Auswertungen des Signifikanztests schlussfolgern, dass im Rahmen der Erhebungen kein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der mittleren momentanen Geschwindigkeit auf Radverkehrsanlagen ableitbar ist. Jedoch konnten Korrelationen zwischen den beiden Kenngrößen an einzelnen Radverkehrsanlagen beobachtet werden. Diese sind jedoch auf die unterschiedliche Zusammensetzung des Fahrradkollektivs innerhalb des Messzeitraums zurückzuführen.

4.1.7 Ganglinien der Verkehrsnachfrage

Das Ziel der verkehrstechnischen Bemessung von Straßenverkehrsanlagen ist es, die Verkehrsnachfrage mit einer ausreichenden Qualität des Verkehrsablaufs abzuwickeln. Die Bemessung für den Radverkehr erfolgt im Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) für das höchstbelastete 15-Minuten-Intervall. Die Anzahl der gemessenen Radfahrer im 15-Minuten-Intervall wird dabei durch Multiplikation mit dem Faktor vier auf eine Bemessungsverkehrsstärke in der Einheit Rad/h hochgerechnet.

Anhand der empirischen Daten wurde die zeitliche Verteilung der Verkehrsstärke auf den Einzelanlagen analysiert. Mit Ausnahme der Nordbahntrasse in Wuppertal wurden alle Verkehrsmessungen an einem

Werktag durchgeführt. Da die Verkehrsnachfrage im Radverkehr stark witterungsabhängig ist, wurden die Messungen zwischen April und September bei trockenen Verhältnissen durchgeführt.

Bei der Analyse der zeitlichen Verteilung der Verkehrsstärken zeigte sich, dass die erhobenen Ganglinien grundsätzlich den typisierten Tagesganglinien für Werktage nach PINKOFSKY (2004, 2006) für den Kfz-Verkehr entsprechen. Im Einrichtungsradsverkehr sowie bei der getrennten Betrachtung der Fahrtrichtungen im Zweirichtungsradverkehr sind die einzelnen Ganglinien durch eine ausgeprägte Morgen- oder Nachmittagsspitze gekennzeichnet. Grundlegende Unterschiede in der zeitlichen Verteilung der Verkehrsstärke konnten für den eRadschnellweg in Göttingen sowie die Nordbahntrasse in Wuppertal festgestellt werden. In Bild 4-10 sind die Ganglinien der Verkehrsstärke für die Nordbahntrasse sowie den eRadschnellweg über den jeweiligen Zeitraum der Messung dargestellt. Zur Vergleichbarkeit der Ganglinien wurden die detektierten Verkehrsstärken als prozentualer Anteil der maximalen Verkehrsstärke im höchstbelasteten 15-Minuten-Intervall normiert.

Die zeitliche Verteilung der Verkehrsstärke auf dem eRadschnellweg unterscheidet sich grundlegend von den übrigen analysierten Einzelanlagen im Alltagsradverkehr. Die maximale Verkehrsstärke wird in Fahrtrichtung Nord zwischen 10:00 und 10:15 Uhr sowie in Fahrtrichtung Süd zwischen 11:45 und 12:00 Uhr erreicht. Die Verkehrsspitzen sind dabei sehr stark ausgeprägt und dauern nur über ein 15-Minuten-Intervall an. Vor und nach dem Spitzenintervall werden fast ausschließlich Verkehrsstärken von weniger als 50 % der Spitzenverkehrsstärke erreicht. Die zeitliche Verteilung der Verkehrsstärke ist dabei auf die Nutzergruppe der Radverkehrsanlage zurückzuführen. Der eRadschnellweg stellt die Verbindung des Nord Campus der Universität mit dem Hauptbahnhof in Göttingen dar, wodurch dieser vorrangig von Studierenden genutzt wird. Die Verkehrsspitzen treten somit zum Beginn und Ende von Vorlesungsveranstaltungen an der Universität auf.

An der Nordbahntrasse konnte eine relativ ausgeglichene Verteilung der Verkehrsstärken mit einer breiten Nachmittagsspitze innerhalb des Messzeitraums festgestellt werden. Die maximale Verkehrsstärke wird in Fahrtrichtung Nord um 15:00 Uhr und in Fahrtrichtung Süd um 13:30 Uhr erreicht. Diese Struktur der Ganglinie war im Hinblick auf die Nutzung der Nordbahntrasse durch den Freizeitradverkehr zu erwarten.

Die Untersuchung beschränkte sich auf die Analyse der Verkehrsnachfrage auf der Grundlage lokal gemessener Verkehrsdaten an einem einzelnen Tag des Jahres. Eine Typisierung der Ganglinien und Dauerlinien der Verkehrsnachfrage im Radverkehr war aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit von Dauerzählstellendaten nicht möglich.

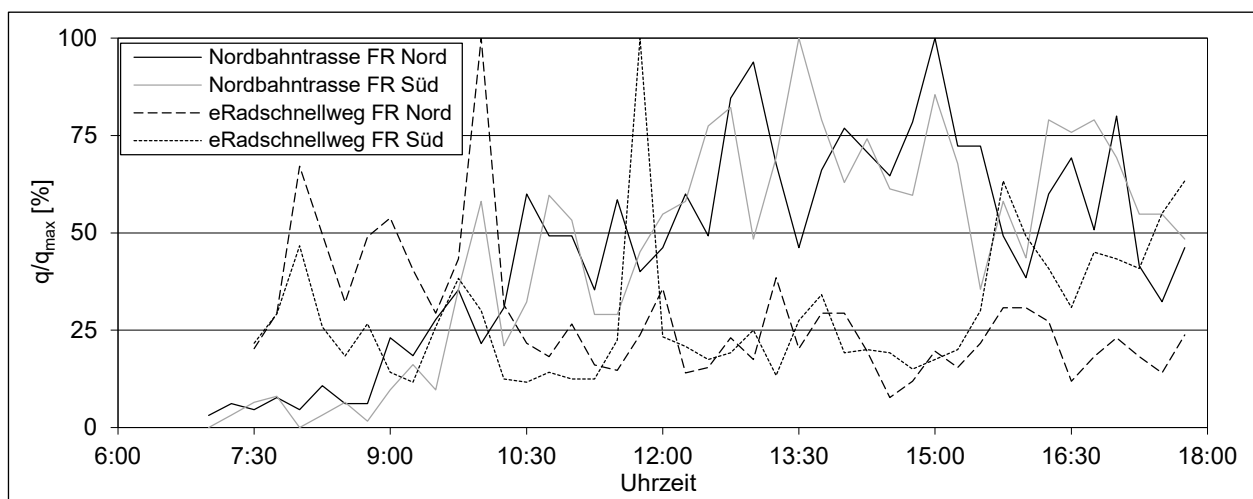


Bild 4-10: Fahrtrichtungsgetrennte zeitliche Verteilung der Verkehrsstärke als prozentualer Anteil der maximalen Verkehrsstärke für den eRadschnellweg in Göttingen sowie die Nordbahntrasse in Wuppertal in 15-Minuten-Intervallen

4.1.8 Einfluss aus angrenzenden lokal begrenzten Flächen

Das Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) berücksichtigt bei der Bewertung der Verkehrsqualität auf Strecken von Radverkehrsanlagen punktuelle Einflüsse aus unmittelbar angrenzenden lokal begrenzten Flächen wie

z. B. ÖPNV-Haltestellen. Im Rahmen der Untersuchung wurde an zwei Einzelanlagen der Einfluss aus angrenzenden ÖPNV-Haltestellen analysiert. An der Wolbecker Straße in Münster sowie der Berliner Straße in Berlin wurde jeweils eine Querschnittsmessung im Einflussbereich der punktuellen Störung und eine Querschnittsmessung auf der freien Strecke durchgeführt. Die Messgeräte im Bereich der punktuellen Störung wurden dabei unmittelbar stromabwärts der Haltestelle positioniert, um die Beeinträchtigung des Geschwindigkeitsverhaltens von Radfahrern durch wartende oder ein- und aussteigende Fußgänger möglichst optimal erfassen zu können.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der gefahrenen Geschwindigkeiten an beiden Messquerschnitten der jeweiligen Einzelanlage sind in Bild 4-11 gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die ermittelten Standardabweichungen nicht bzw. nur geringfügig (0,1 km/h) voneinander abweichen. Hingegen liegen die Mittelwerte im Einflussbereich der punktuellen Störungen um 0,9 bzw. 1,5 m/h über den Mittelwerten auf der freien Strecke. Die Annahme im Verfahren des HBS, dass angrenzende lokal begrenzte Flächen das Geschwindigkeitsverhalten negativ beeinträchtigen, konnte somit im Rahmen der Untersuchung nicht bestätigt werden. Allerdings basieren die dargestellten Ergebnisse auf einer geringen Datengrundlage. Zur detaillierten Analyse des Einflusses aus angrenzenden lokal begrenzten Flächen wären umfangreichere Auswertungen notwendig.

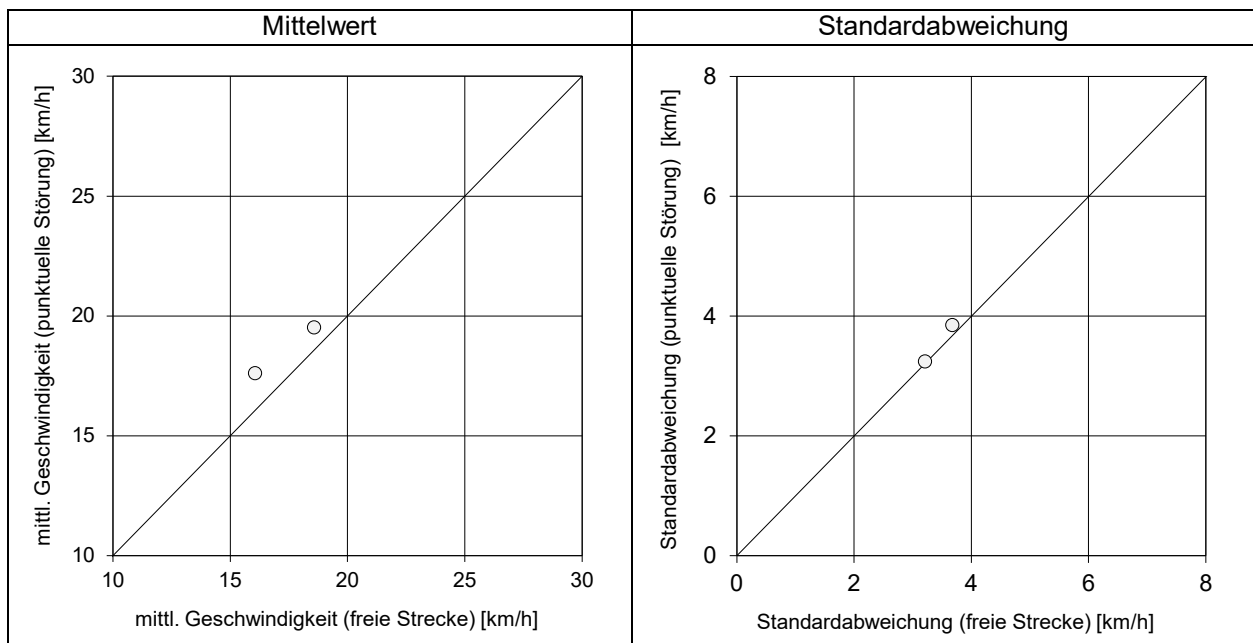


Bild 4-11: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit auf der Wolbecker Straße in Münster sowie der Berliner Straße in Berlin an den Messquerschnitten im Einflussbereich einer punktuellen Störung sowie auf der freien Strecke

4.1.9 Analyse des Fahrverhaltens in Gruppen

Die Möglichkeit, in Gruppen zu fahren, spielt im Radverkehr eine wichtige Rolle für die Verkehrsqualität, die im bisherigen Bemessungsverfahren nicht berücksichtigt wird. Bei der Begleitung von Kindern ist es für die Begleitperson notwendig, das Kind beaufsichtigen zu können. Für sonstige in Gruppen fahrende Radfahrer ist die Möglichkeit, während der Fahrt zu kommunizieren, zumindest ein Komfortfaktor. Gleichzeitig sollte eine Gruppenbildung die Verkehrsqualität anderer Radfahrer möglichst nicht negativ beeinflussen. Da der Überholbedarf von den Geschwindigkeitsdifferenzen abhängt, ist eine Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens in Gruppen notwendig, um das Ausmaß der Beeinflussung des Verkehrsablaufs zu bestimmen. Unterschiede der Streuungsmaße sind von besonderem Interesse, da aus größeren Geschwindigkeitsdifferenzen ein höherer Überholbedarf resultiert. Für die untersuchten Radverkehrsanlagen wurden daher sowohl die Gruppengröße als auch die Geschwindigkeiten der einzeln und in Gruppen fahrenden Radfahrer bestimmt. Zusätzlich wurde jede Form der Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens, beispielsweise durch parkende Fahrzeuge, Ab- oder Einbiegen oder Störungen durch andere Verkehrsteilnehmende dokumentiert. Da eine Gruppe beim Überholen anderer Radfahrer sich ohne hohen Geschwindigkeitsverlust auflösen kann, wurden aktive und passive Überholvorgänge nicht als Störung gezählt.

Bild 4-12 zeigt die Anteile der einzeln und in Gruppen fahrenden Radfahrer am Gesamtaufkommen. An den untersuchten Messquerschnitten beträgt der Anteil der in Gruppen fahrenden Radfahrer am gesamten Radverkehrsaufkommen 7 bis 12 %. Bild 4-13 zeigt die Verteilungsmaße der erfassten Geschwindigkeiten von einzeln und in Gruppen fahrenden Radfahrern. Für die Auswertung der Geschwindigkeiten wurden alle extern beeinflussten Radfahrer aus den Daten entfernt. Die Whisker der Boxplots sind definiert als der Wert, der maximal das 1,5-fache des Interquartilsabstands beträgt. Die Einkerbungen um den Median repräsentieren die entsprechenden Konfidenzintervalle. Aufgrund der geringeren Anzahl der Messwerte fallen diese bei Gruppen größer aus als bei allein fahrenden Radfahrern. Die Mittelwerte werden durch den Stern repräsentiert. Die Geschwindigkeiten der in Gruppen fahrenden Radfahrer liegen im Mittel auf allen Anlagen unterhalb der Geschwindigkeiten des gesamten Kollektivs. Sowohl die Medianwerte als auch die Mittelwerte liegen bei Gruppen niedriger. Für die Abweichung der Mittelwerte der in Gruppen fahrenden Radfahrer von den allein fahrenden Radfahrern wurden zusätzlich für alle Anlagen Signifikanztests durchgeführt. Die Abweichungen sind für alle Anlagen hoch signifikant ($p\text{-Wert} < 0,01$).

In Tab. 4-1 sind die Kennwerte der Verteilungen der Geschwindigkeiten von allein und in Gruppen fahrenden Radfahrern dargestellt. Da für diese Auswertung nur unbeeinflusste Radfahrer betrachtet wurden, weicht die absolute Anzahl von den Angaben in Bild 4-12 ab. Im Mittel fahren die Radfahrer in Gruppen um 1,77 km/h langsamer als die allein fahrenden Radfahrer. Obwohl die Stichproben der in Gruppen fahrenden Radfahrer deutlich kleiner sind, sind die Standardabweichungen an allen Messstellen außer der Knielinger Allee 2 geringer als die der allein fahrenden Radfahrer.

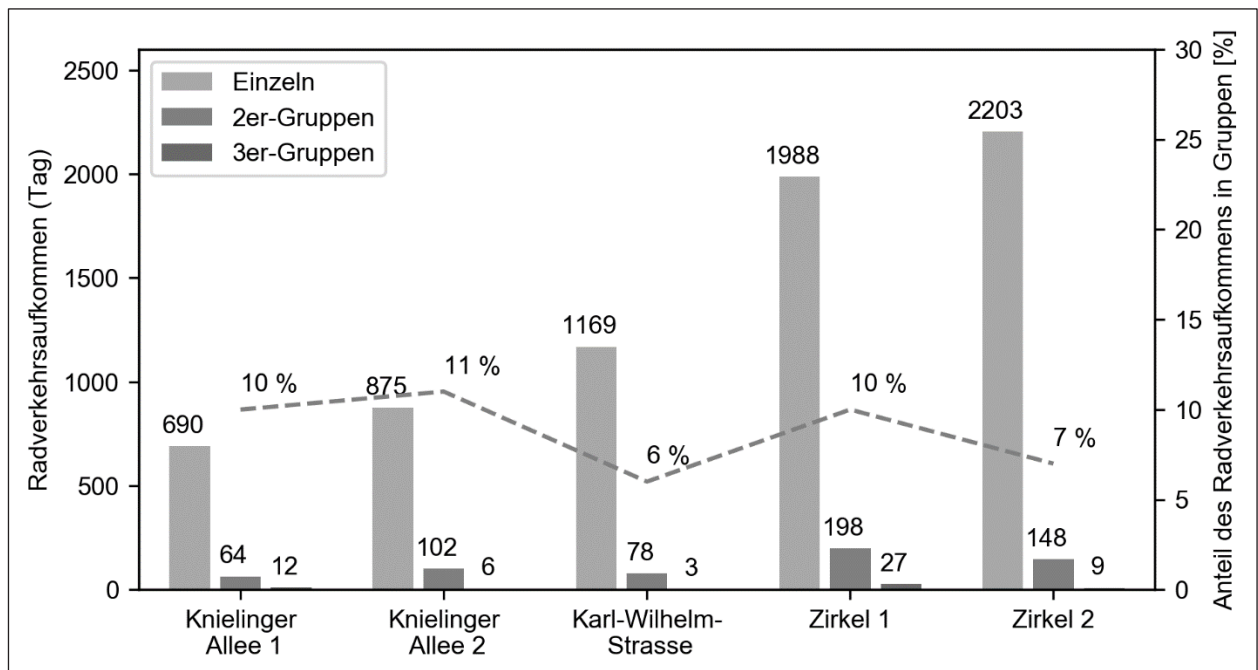


Bild 4-12: Anteile von Gruppen am Radverkehrsaufkommen auf allen Messstellen

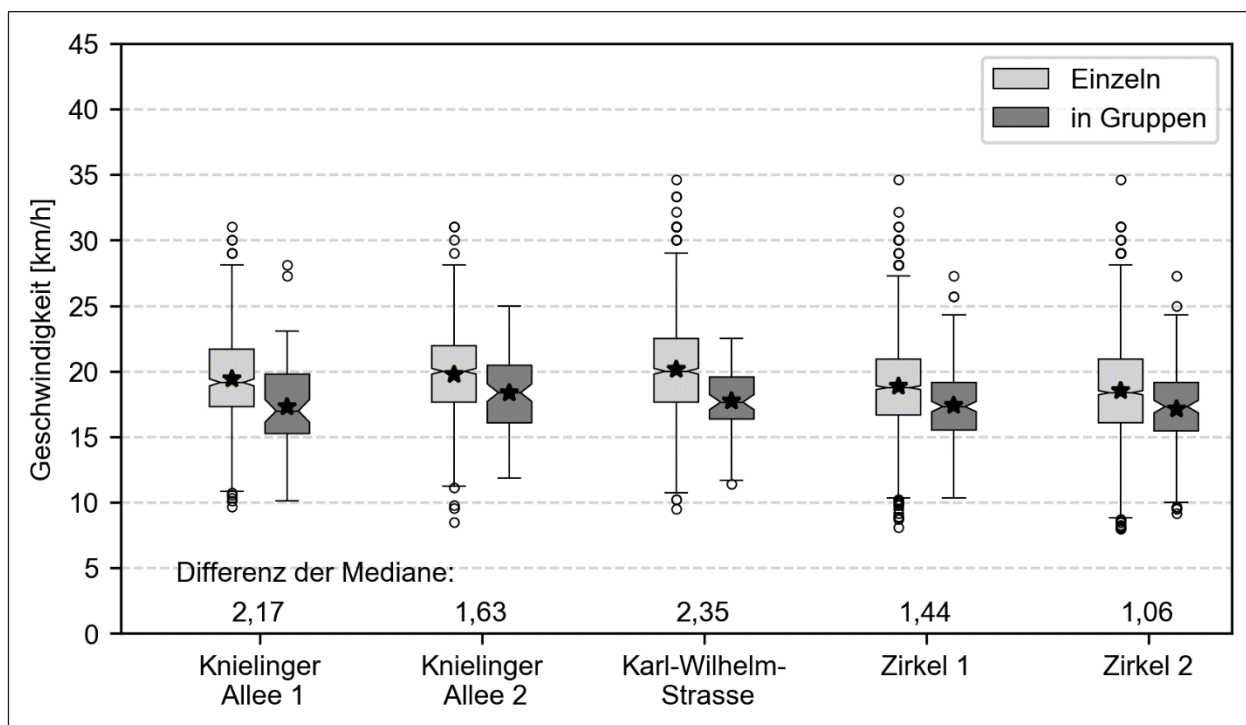


Bild 4-13: Gefahrene Geschwindigkeiten des Gesamtkollektivs und der in Gruppen fahrenden Radfahrer

Mess- stelle	Anzahl		Mittelwert		1.Quartil		2. Quartil		3. Quartil		Std	
	Einzel	Gruppe	Einzel	Gruppe	Einzel	Gruppe	Einzel	Gruppe	Einzel	Gruppe	Einzel	Gruppe
1_1	622	67	19,63	17,29	17,64	15,25	19,57	16,98	21,95	19,78	3,26	3,58
1_2	840	106	19,92	18,36	18,0	16,07	20,0	18,37	21,95	20,45	3,33	2,95
2	1110	76	20,34	17,72	18,0	16,36	20,45	17,65	22,5	19,57	3,64	2,56
3_1	1814	215	19,07	17,38	15,52	15,51	19,15	17,31	21,43	19,15	3,42	2,94
3_2	2095	144	18,63	17,13	16,36	15,45	18,37	17,31	20,93	19,14	3,63	3,47

Tab. 4-1: Vergleich der Verteilungsmaße zwischen einzeln und in Gruppen fahrenden Radfahrern. Messstelle 1 = Knielinger Allee, Messstelle 2 = Karl-Wilhelm-Straße, Messstelle 3 = Zirkel

4.2 Bewertung mit dem Verfahren des HBS 2015

Auf der Grundlage der empirischen Erhebungen an den einzelnen Radverkehrsanlagen wurde der Verkehrsablauf anhand des Verfahrens nach dem HBS (FGSV, 2015a) bewertet. Dazu wurde für jede Einzelanlage die Bemessungsverkehrsstärke basierend auf dem höchstbelasteten 15-Minuten-Intervall ermittelt. Sofern eine Änderung der maßgeblichen Einflussgrößen innerhalb einer Strecke vorhanden ist, wurde die Strecke in einzelne Teilstrecken unterteilt. Gemäß dem HBS werden Strecken von Radverkehrsanlagen durch Knotenpunkte begrenzt, an denen Radfahrer vorfahrtrechtlich untergeordnet sind. Die Nordbahntrasse sowie der Radschnellweg Ruhr weisen eine größtenteils planfreie Führung auf. Da keine Kenntnisse über die ggf. vorliegenden Änderungen der Verkehrsstärke an den planfreien Knotenpunkten vorliegen, kann basierend auf den durchgeführten Messungen lediglich die Verkehrsqualität zwischen zwei planfreien Knotenpunkten bewertet werden. Die Ergebnisse der Bewertung nach dem HBS sowie die Bemessungsverkehrsstärke sind getrennt nach Ein- und Zweirichtungsradverkehr in Tab. 4-2 bzw. Tab. 4-3 dargestellt. Zur Berechnung der Überholungs- bzw. der Begegnungsrate wurden jeweils die empirisch erhobene mittlere Geschwindigkeit sowie die zugehörige Standardabweichung verwendet.

Die höchste Bemessungsverkehrsstärke im Einrichtungsradsverkehr wurde mit 1.084 Rad/h auf der Waren-dorfer Straße in Münster gemessen. Im Zweirichtungsradverkehr wurde die höchste Bemessungsverkehrs-

stärke auf der Promenade in Münster mit 1.852 Rad/h ermittelt. Ein Vergleich der Ergebnisse der Bewertung der einzelnen Radverkehrsanlagen nach dem HBS zeigt, dass alle Radverkehrsanlagen im Zweirichtungsradverkehr mit der besten Qualitätsstufe (QSV A) bewertet werden. Dies ist vor allem auf die Breiten der Radverkehrsanlagen zurückzuführen. Im Verfahren nach dem HBS wird die Begegnungsrate mit dem Faktor f_{BB} für die Beeinträchtigung bei Begegnungen auf Teilstrecken mit Zweirichtungsradverkehr in Abhängigkeit von der fiktiven Breite multipliziert. Das Verfahren unterstellt dabei, dass bei einer fiktiven Breite $\geq 2,50$ m der Bewegungsspielraum bei einer Begegnung von zwei Radfahrern nicht eingeschränkt ist und es lediglich bei einer Kombination aus Überholung und Begegnung zu einer Störung kommt. Dementsprechend wird für diese Radverkehrsanlagen ein Faktor $f_{BB} = 0,2$ angesetzt, der die Störungsrate durch Begegnungen deutlich reduziert. Da alle untersuchten Radverkehrsanlagen im Zweirichtungsradverkehr eine fiktive Breite $> 2,50$ m aufweisen, führt dies in der Anwendung des Verfahrens zu einer relativ geringen Störungsrate durch Begegnungen und somit zu einer Bewertung des Verkehrsablaufs mit einer sehr guten Qualitätsstufe.

Im Einrichtungsradsverkehr wurde der Verkehrsablauf auf der Eschholzstraße in Freiburg sowie auf dem Radfahrstreifen der Lindwurmstraße in München mit der QSV B bewertet. Auf der Berliner Straße in Berlin wird eine ausreichende Verkehrsqualität (QSV D) erreicht. An den übrigen Radverkehrsanlagen im Einrichtungsradsverkehr wird der Verkehrsablauf mit der QSV E bewertet. Der Radweg auf der Lindwurmstraße in München kann mit dem Verfahren nach dem HBS nicht bewertet werden, da die Regelbreite gemäß den RAST (FGSV, 2006b) nicht eingehalten ist. Die beiden Radverkehrsanlagen mit einer guten Verkehrsqualität weisen im Untersuchungskollektiv im Einrichtungsradsverkehr die höchsten Breiten auf. Im Verfahren nach dem HBS im Einrichtungsradsverkehr wird – analog zum Zweirichtungsradverkehr – die Überholungsrate mit einem Faktor zur Berücksichtigung der Beeinträchtigung bei Überholungen in Abhängigkeit von der fiktiven Breite multipliziert. Da beide Radverkehrsanlagen eine fiktive Breite $\geq 2,00$ m aufweisen, ergibt sich eine relativ geringe Störungsrate durch Überholungen und somit eine gute Bewertung der Verkehrsqualität.

Stadt	Radverkehrsanlage	Bemessungsverkehrsstärke [Rad/h]	QSV
Berlin	Oberbaumbrücke	656	E
Freiburg	Eschholzstraße	264	B
München	Lindwurmstraße (Radfahrstreifen)	576	B
München	Lindwurmstraße (Radweg)	428	E ¹⁾
Münster	Wolbecker Straße	412	E
Münster	Warendorfer Straße	1084	E
Berlin	Berliner Straße	300	D

¹⁾ Bemessungsverfahren nicht anwendbar, da die Regelbreite gemäß den RAST (FGSV, 2006b) nicht eingehalten ist

Tab. 4-2: Bemessungsverkehrsstärke und Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs für die Einzelanlagen im Einrichtungsradsverkehr

Stadt	Radverkehrsanlage	Bemessungsverkehrsstärke [Rad/h]	QSV
Mülheim	Radschnellweg Ruhr	356	A
Münster	Promenade	1852	A
Wuppertal	Nordbahntrasse	472	A
Göttingen	eRadschnellweg	720	A
München	Erhardtstraße	940	A
Hamburg	An der Alster	988	A

Tab. 4-3: Bemessungsverkehrsstärke und Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs für die Einzelanlagen im Zweirichtungsradverkehr

4.3 Seitliches Abstandsverhalten

4.3.1 Einfluss der Breite der Radverkehrsanlage

Im Rahmen der empirischen Untersuchung wurden anhand von Videomessungen die seitlichen Abstände bei Begegnungen, Überholungen oder Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit zwischen den einzelnen Radfahrern im Querschnitt ermittelt (vgl. Bild 3-2). Bei jeder Begegnung und Überholung wurde

zusätzlich der Abstand zu den Rändern der Radverkehrsanlage erhoben. Die ermittelten seitlichen Radabstände bei einer Überholung sind getrennt nach der Führungsform für die untersuchten Einzelanlagen im Einrichtungsradsverkehr als Histogramme in Bild 4-14 dargestellt. Für die Einzelanlagen im Zweirichtungsradsverkehr wurde für die Auswertung der Überholabstände eine Differenzierung hinsichtlich der Breite der Radverkehrsanlage vorgenommen. Die Ergebnisse der untersuchten Einzelanlagen im Zweirichtungsradsverkehr zeigt Bild 4-15.

Da das seitliche Abstandsverhalten maßgeblich durch die Breite der Radverkehrsanlage sowie die Anzahl der Radfahrer im Querschnitt beeinflusst wird, wurde für jede untersuchte Radverkehrsanlage im Zweirichtungsradsverkehr der mittlere seitliche Radabstand bei einer Überholung oder Begegnung in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 4-16 in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage dargestellt. Es wird deutlich, dass die beobachtete Anzahl der Radfahrer im Querschnitt bei Überholungen und Begegnungen direkt von der Breite der Radverkehrsanlage abhängig ist. Bei der Radverkehrsanlage in Hamburg mit einer Breite von 2,55 m wurden lediglich bis zu zwei Radfahrer im Querschnitt gemessen. Auf der Erhardtstraße in München mit einer Breite von 2,98 m wurden bis zu drei Radfahrer im Querschnitt beobachtet. Bei den übrigen vier Radverkehrsanlagen mit einer Breite von mindestens 3,87 m traten Situationen mit vier Radfahrern im Querschnitt auf. Die Ergebnisse spiegeln somit sehr gut den in den ERA (FGSV, 2010) definierten Verkehrsraum von 0,80 m pro Radfahrer im Querschnitt wider. Des Weiteren zeigt sich, dass bei gleicher Anzahl der Radfahrer im Querschnitt der seitliche Radabstand bei einer Überholung oder Begegnung grundsätzlich linear mit der Breite der Radverkehrsanlage ansteigt.

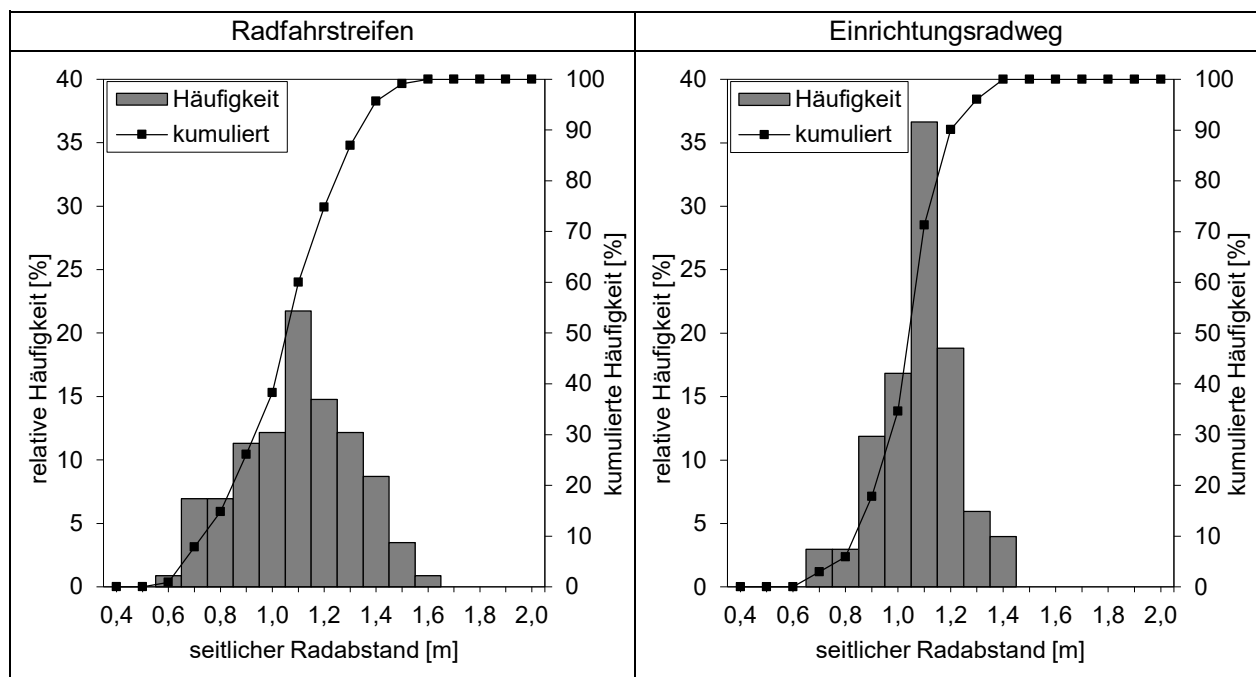


Bild 4-14: Histogramme des seitlichen Radabstands bei Überholungen auf Radfahrstreifen (links) und Einrichtungsradschwegen (rechts) für die untersuchten Einzelanlagen im Einrichtungsradsverkehr

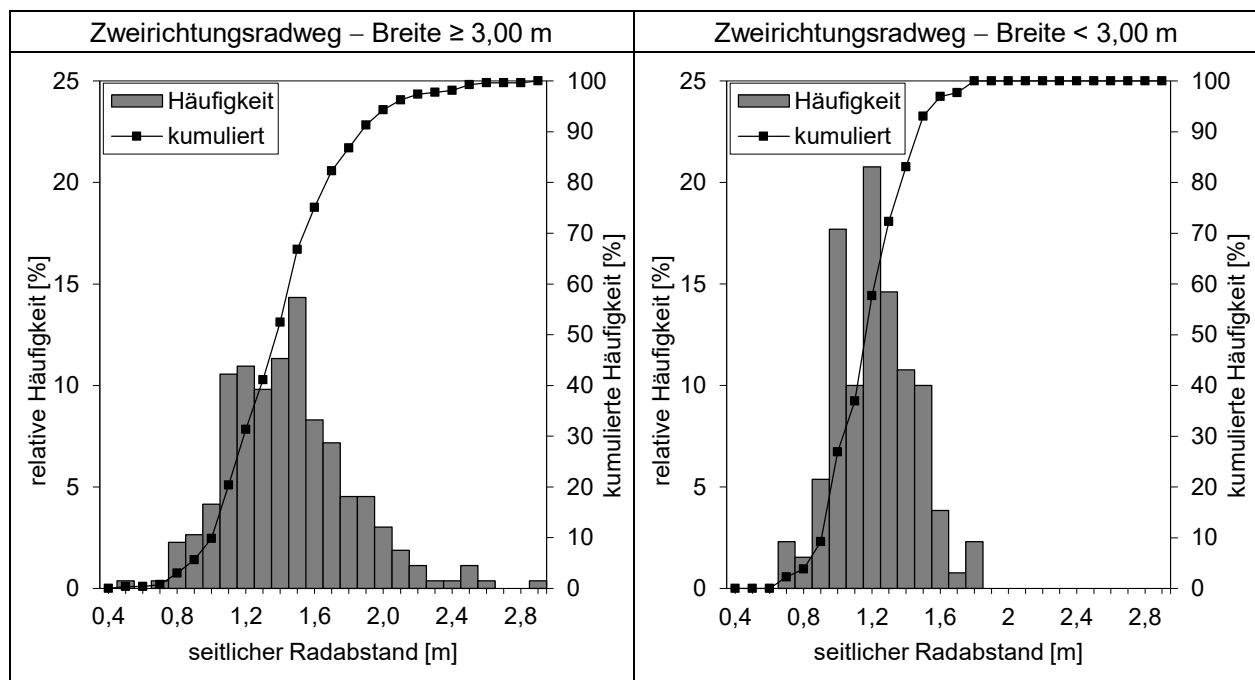


Bild 4-15: Histogramme des seitlichen Radabstands bei Überholungen auf den untersuchten Zweirichtungsradwegen mit einer Breite von mindestens 3,00 m (links) und einer Breite unterhalb von 3,00 m (rechts)

Beim Vergleich des seitlichen Abstandsverhaltens zwischen Überholungen und Begegnungen wird deutlich, dass bei gleicher Anzahl an Radfahrern im Querschnitt der seitliche Radabstand bei einer Begegnung grundsätzlich größer gewählt wird als bei einer Überholung. Lediglich bei der Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,98 m und drei Radfahrern im Querschnitt sowie den untersuchten Radverkehrsanlagen mit einer Breite von ca. 4 m und vier Radfahrern im Querschnitt liegen die seitlichen Radabstände in der gleichen Größenordnung. Bei dieser Kombination aus der Breite der Radverkehrsanlage und der Anzahl an Radfahrern im Querschnitt liegt der seitliche Radabstand im Mittel bei 1,20 m. Auffällig ist, dass auf der Promenade in Münster mit einer Breite von 4,60 m und bis zu vier Radfahrern im Querschnitt der mittlere seitliche Radabstand bei Überholungen ebenfalls 1,20 m beträgt, wohingegen bei Begegnungen ein größerer mittlerer seitlicher Radabstand von 1,50 m beobachtet werden konnte.

Neben dem mittleren seitlichen Radabstand stellt der Mindestradabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung oder Begegnung eine wichtige Kenngröße des seitlichen Abstandverhaltens dar. Zur Bestimmung des Mindestradabstands wurde näherungsweise das 0,1-Quantil des seitlichen Radabstands bei Überholungen oder Begegnungen ermittelt. Da Radfahrer die zur Verfügung stehende Breite der Radverkehrsanlage ausnutzen und größere Radabstände wählen (vgl. Bild 4-16), wurde das 0,1-Quantil des seitlichen Radabstands jeweils für die maximal beobachtete Anzahl an Radfahrern im Querschnitt ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage für den Zweirichtungsradverkehr in Bild 4-17 dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Begegnungen ein größerer Mindestradabstand gewählt wird im Vergleich zu Überholungen. Der Mittelwert des 0,1-Quantils aller Radverkehrsanlagen beträgt bei Überholungen 0,91 m und bei Begegnungen 1,13 m. Bei der Betrachtung des Minimums für die jeweilige Radverkehrsanlage anstelle des 0,1-Quantils ergibt sich bei Überholungen ein Mittelwert von 0,78 m für die maximal beobachtete Anzahl an Radfahrern im Querschnitt. Dieser Wert entspricht ungefähr dem seitlichen Mindestradabstand von 0,80 m, der sich aus der Differenz der Verkehrsräume nach den ERA (FGSV, 2010) ergibt.

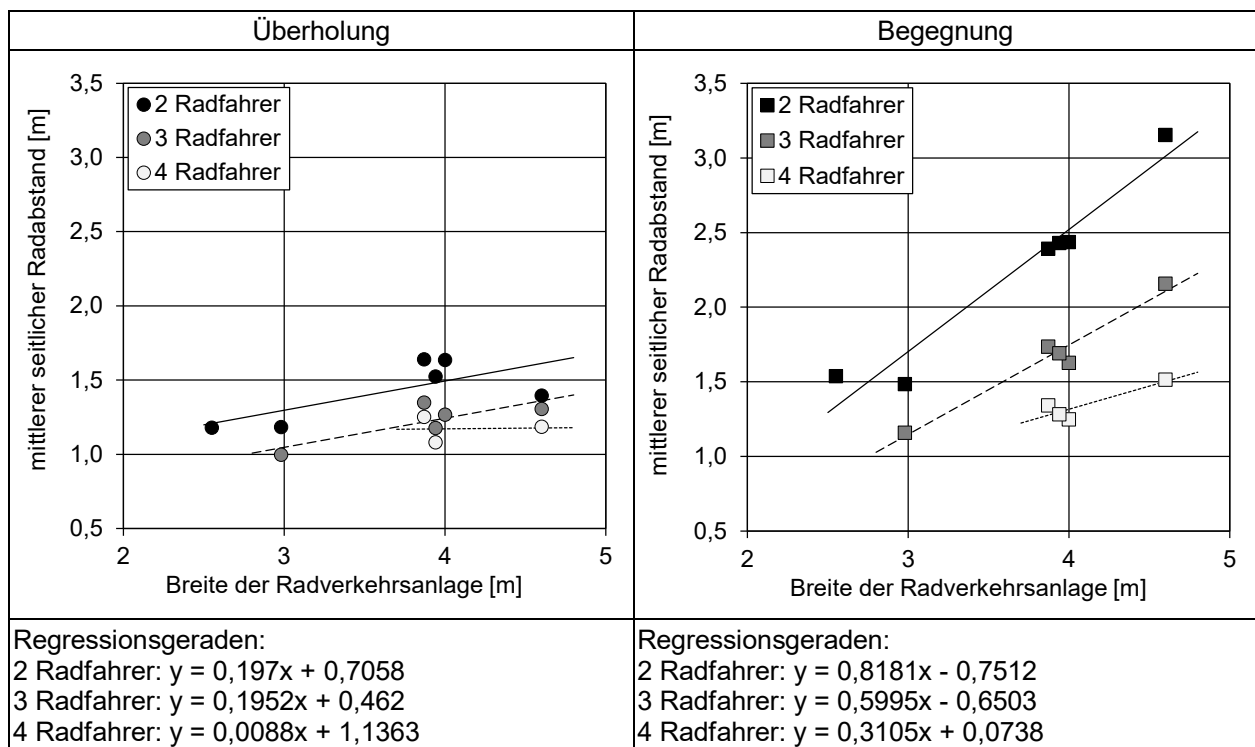


Bild 4-16: Mittlerer seitlicher Radabstand bei Überholungen (links) oder Begegnungen (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt und der Breite der Radverkehrsanlage im Zweirichtungsradverkehr

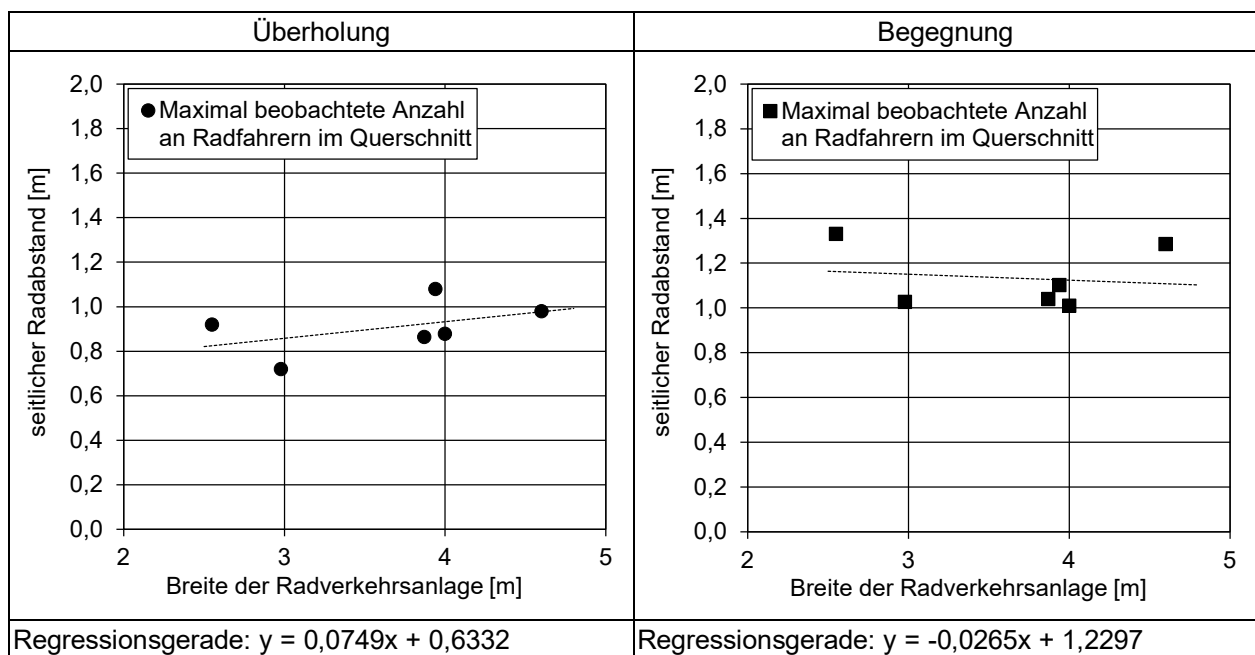


Bild 4-17: 0,1-Quantil des seitlichen Radabstands bei Überholungen (links) oder Begegnungen (rechts) für die maximal beobachtete Anzahl an Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage im Zweirichtungsradverkehr

Im Einrichtungsradverkehr wurde ebenfalls für jede untersuchte Radverkehrsanlage der mittlere seitliche Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen oder beim Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 4-18 in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage dargestellt. Die untersuchten Radverkehrsanlagen im Einrichtungsradverkehr haben eine Breite von 1,20 bis 2,12 m. Dementsprechend konnten bei Überholungen oder beim Nebeneinanderfahren lediglich zwei Radfahrer im Querschnitt beo-

bachtet werden. Es zeigt sich, dass an allen Radverkehrsanlagen der seitliche Radabstand bei einer Überholung größer gewählt wird als beim Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit. Des Weiteren wird deutlich, dass der seitliche Radabstand bei einer Überholung mit zunehmender Breite der Radverkehrsanlage größer wird. Beim Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit konnte an keiner Radverkehrsanlage ein mittlerer seitlicher Radabstand von mehr als 1,00 m ermittelt werden.

Zur Bestimmung des Mindestradabstands im Einrichtungsradverkehr wurde ebenfalls das 0,1-Quantil des seitlichen Radabstands ermittelt. Die ermittelten 0,1-Quantile des seitlichen Radabstands bei Überholungen oder beim Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit bei zwei Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage und der Führungsform sind in Bild 4-19 dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Überholungen ein größerer Mindestradabstand gewählt wird im Vergleich zum Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit. Der Mittelwert des 0,1-Quantils aller Radverkehrsanlagen beträgt bei Überholungen 0,82 m und entspricht damit ungefähr dem seitlichen Mindestradabstand von 0,80 m, der sich aus der Differenz der Verkehrsräume nach den ERA ergibt. Der Mittelwert des 0,1-Quantils aller Radverkehrsanlagen beim Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit beträgt 0,69 m.

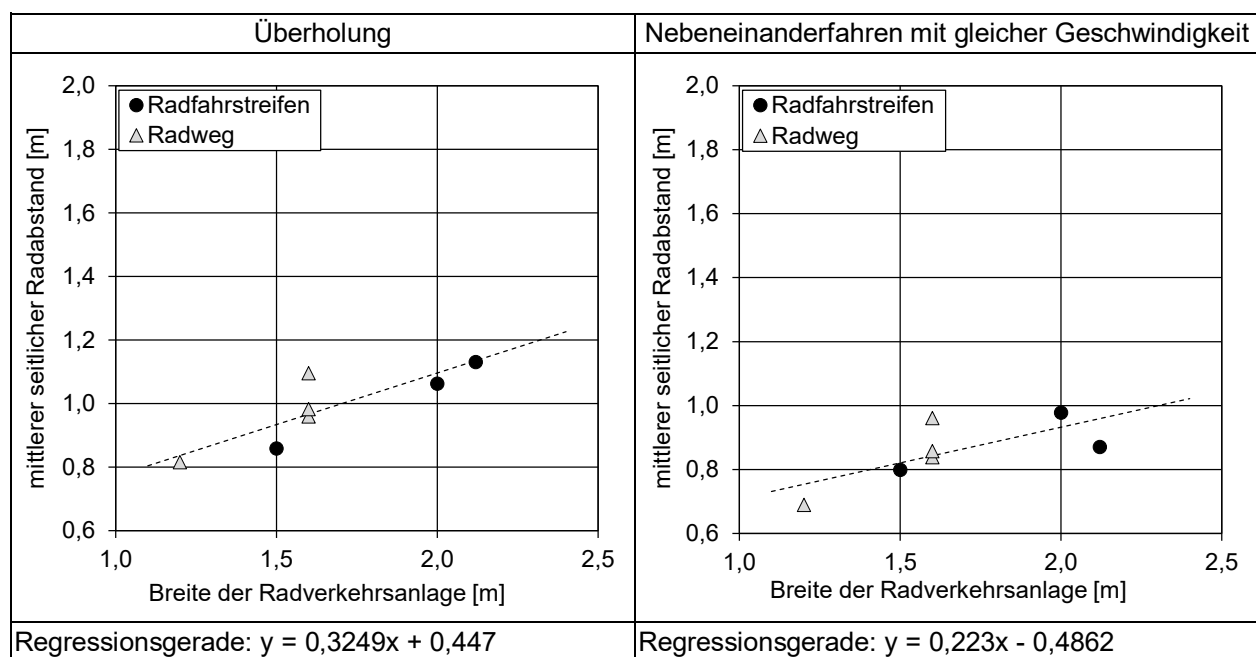


Bild 4-18: Mittlerer seitlicher Radabstand bei Überholungen (links) oder beim Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit (rechts) bei zwei Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage und der Führungsform im Einrichtungsradverkehr

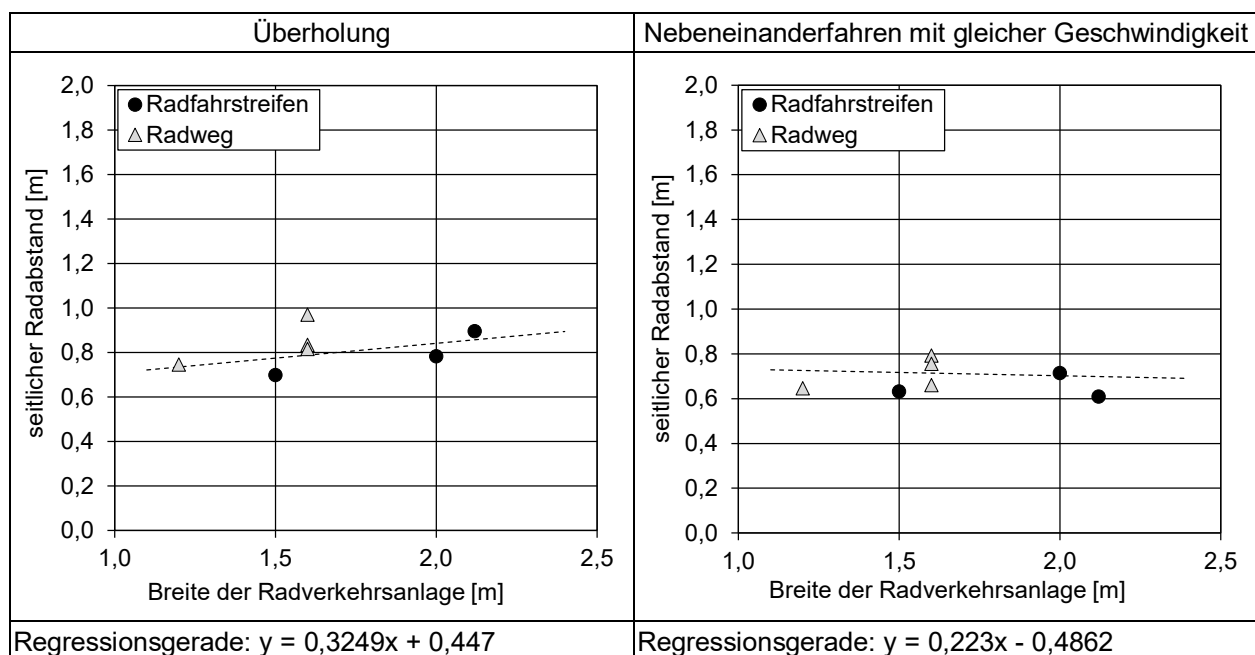


Bild 4-19: 0,1-Quantil des seitlichen Radabstands bei Überholungen (links) oder beim Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit (rechts) bei zwei Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage und der Führungsform im Einrichtungsradsverkehr

Neben der Analyse des seitlichen Abstandsverhaltens von Radfahrern zueinander wurde ebenfalls das seitliche Abstandsverhalten zum Rand der Radverkehrsanlage untersucht. Dazu wurde für jede Radverkehrsanlage der mittlere seitliche Abstand bei Überholungen, Begegnungen oder Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit vom Rad zum Rand der Radverkehrsanlage bestimmt. Der mittlere seitliche Abstand in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt sowie der Art der Begrenzung ist für die untersuchten Radverkehrsanlagen im Zweirichtungsradsverkehr in Bild 4-20 dargestellt. Es wird deutlich, dass bei gleicher Anzahl der Radfahrer im Querschnitt mit zunehmender Breite der Radverkehrsanlage ein größer mittlerer Abstand zum Rand der Radverkehrsanlage eingehalten wird.

Beim Vergleich der Ergebnisse hinsichtlich der Art der Begrenzung wird deutlich, dass grundsätzlich kein Unterschied – außerhalb zufälliger Schwankungen – in den gewählten seitlichen Abständen zu Gehwegen und Grünstreifen besteht. Lediglich bei der Radverkehrsanlage in Hamburg weichen die Abstände vom Rand mit einer Differenz von 0,48 m deutlich von den anderen Untersuchungsstrecken ab. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Grünfläche an dieser Anlage aus einem hohen Bewuchs aus Sträuchern besteht, während die anderen Radverkehrsanlagen im Zweirichtungsradsverkehr an Rasenflächen angrenzen, die ggf. mit dem Rad in einer kritischen Begegnungssituation befahren werden könnten. Bei Begegnungen oder Überholungen mit der maximal beobachteten Anzahl der Radfahrer im Querschnitt beträgt der mittlere seitliche Abstand zum Rand für alle Radverkehrsanlagen im Zweirichtungsradsverkehr im Mittel 0,44 m zu angrenzenden Grünstreifen und 0,35 m zu angrenzenden Gehwegen.

Als Kenngröße des seitlichen Abstandsverhaltens wurde auch für alle Radverkehrsanlagen im Zweirichtungsradsverkehr der seitliche Mindestabstand zum Rand der Radverkehrsanlage näherungsweise anhand des 0,1-Quantils für die maximal beobachtete Anzahl an Radfahrern im Querschnitt ermittelt. Die 0,1-Quantile des seitlichen Abstands sind in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage und der Art der baulichen Begrenzung in Bild 4-21 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das 0,1-Quantil bei der Radverkehrsanlage in Hamburg – aufgrund des hohen Bewuchses aus Sträuchern – deutlich größer ist als bei den übrigen Radverkehrsanlagen. Der Mittelwert des 0,1-Quantils aller Radverkehrsanlagen beträgt bei angrenzendem Grünstreifen 0,30 m (ohne die Radverkehrsanlage in Hamburg: 0,24 m) und bei angrenzendem Gehweg 0,18 m.

Für die untersuchten Radverkehrsanlagen im Einrichtungsradsverkehr ist der mittlere seitliche Abstand in Abhängigkeit von der Art der Begrenzung getrennt nach Führungsform in Bild 4-22 dargestellt. Analog zum Zweirichtungsradsverkehr ist zu erkennen, dass bei einer größeren Breite der Radverkehrsanlage der mittlere seitliche Abstand zum Rand ebenfalls größer ist. Zur Bestimmung des Mindestabstands zum Rand der

Radverkehrsanlage im Einrichtungsradverkehr wurde ebenfalls das 0,1-Quantil des seitlichen Abstands ermittelt. Die 0,1-Quantile des seitlichen Abstands bei zwei Radfahrern im Querschnitt sind in Abhängigkeit von der Art der Begrenzung und der Breite der Radverkehrsanlage getrennt nach der Führungsform in Bild 4-23 dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Radfahrstreifen grundsätzlich ein größerer Abstand zum Hochbord im Vergleich zur Kfz-Fahrbahn gewählt wird. Mit zunehmender Breite des Radfahrstreifens erhöht sich ebenfalls der Mindestabstand zu beiden Rändern der Radverkehrsanlage.

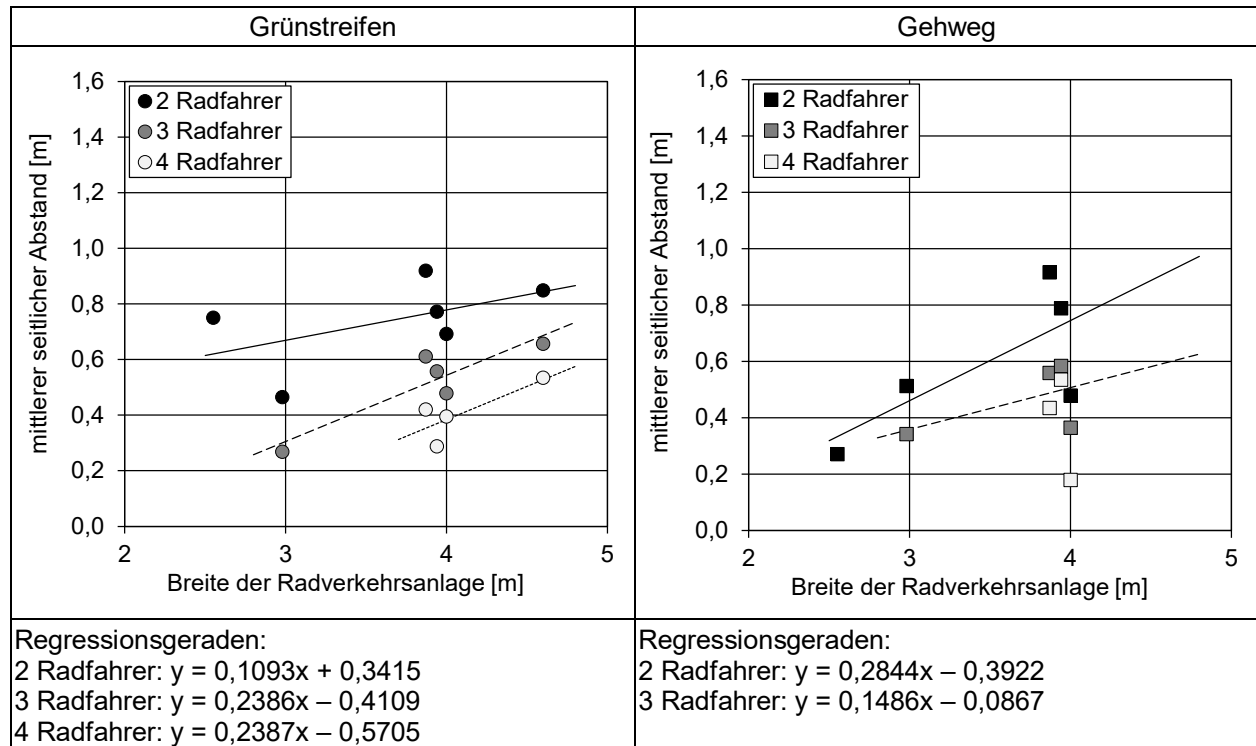


Bild 4-20: Mittlerer seitlicher Abstand zu Grünstreifen (links) oder zu Gehwegen (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt und der Breite der Radverkehrsanlage im Zweirichtungsradverkehr

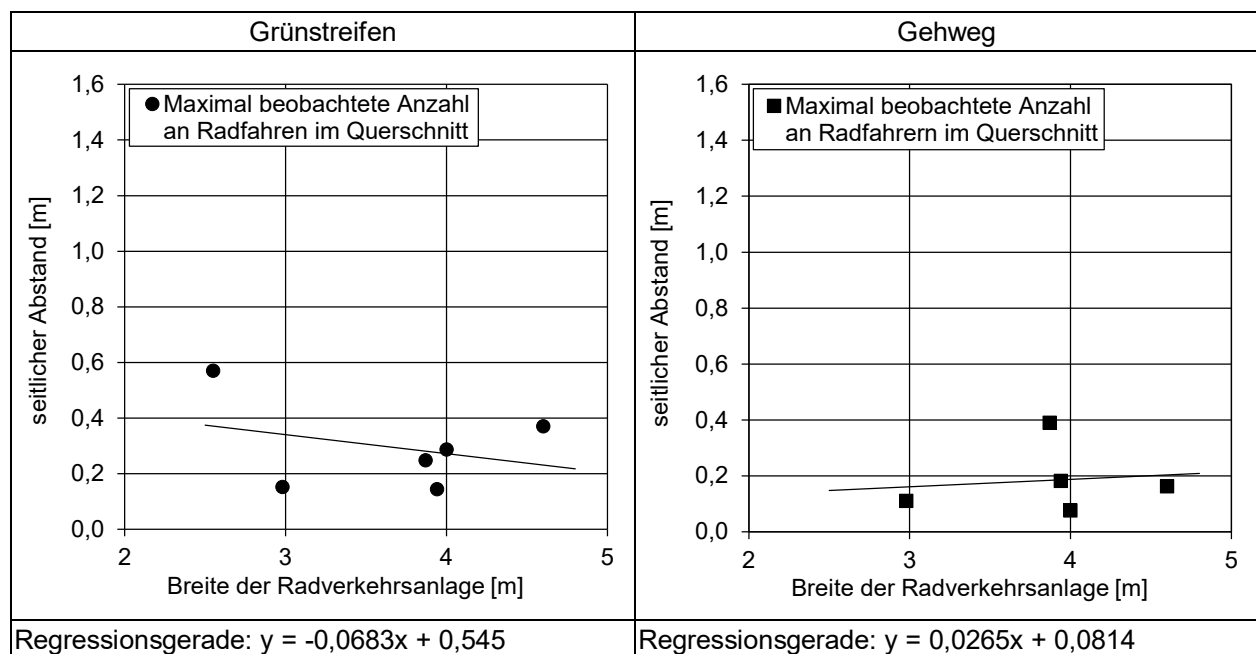


Bild 4-21: 0,1-Quantil des seitlichen Abstands zu Grünstreifen (links) oder zu Gehwegen (rechts) für die maximal beobachtete Anzahl an Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage im Zweirichtungsradverkehr

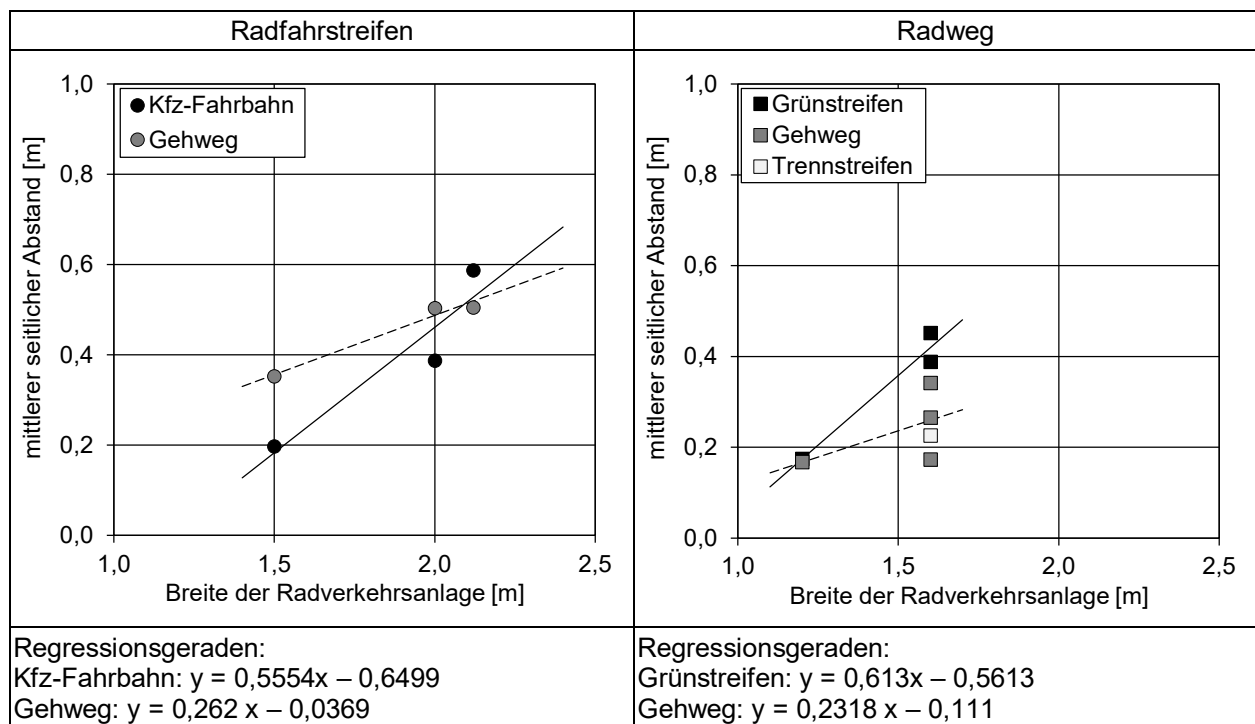


Bild 4-22: Mittlerer seitlicher Abstand bei zwei Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Art der Begrenzung und der Breite der Radverkehrsanlage getrennt nach Radfahrstreifen (links) und Radweg (rechts) im Einrichtungsradverkehr

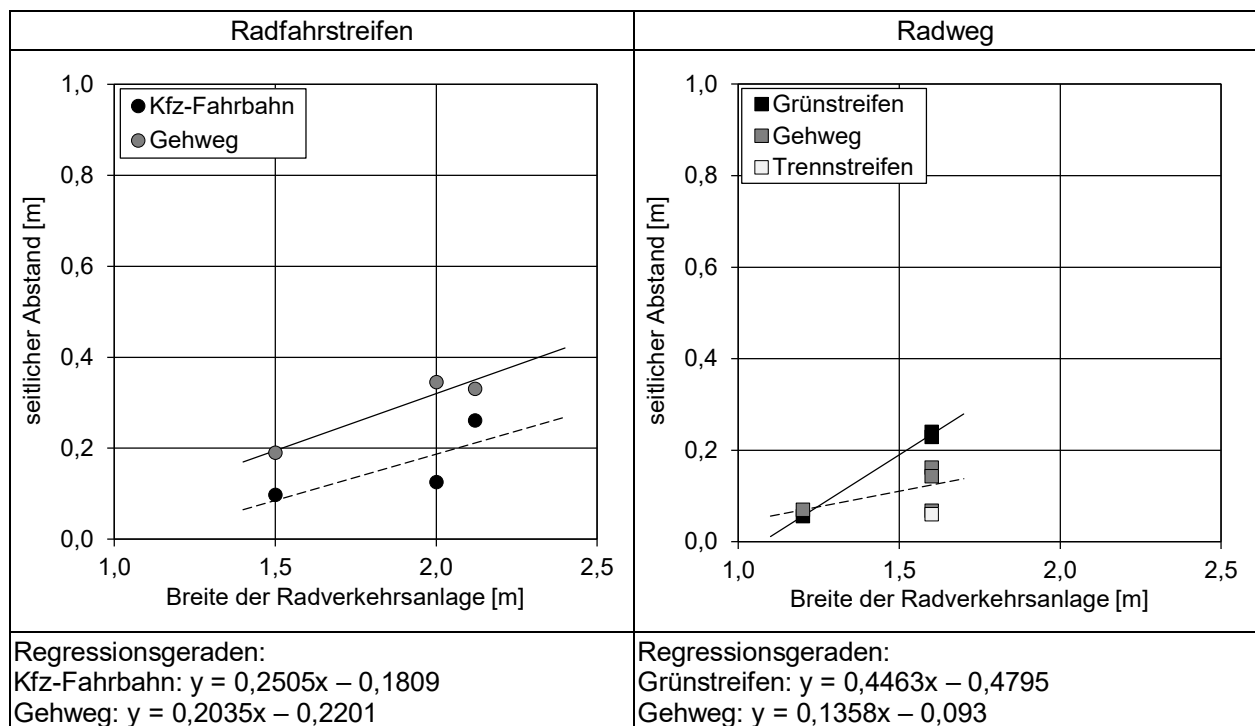


Bild 4-23: 0,1-Quantil des seitlichen Abstands bei zwei Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Art der Begrenzung und der Breite der Radverkehrsanlage getrennt nach Radfahrstreifen (links) und Radweg (rechts) im Einrichtungsradverkehr

Im Rahmen der Verkehrsmessung konnte beobachtet werden, dass Radfahrer zum Überholen oder bei Begegnungen die Radverkehrsanlage verlassen und auf dem Gehweg bzw. der Kfz-Fahrbahn fahren. Deshalb wurde für jede untersuchte Radverkehrsanlage im Einrichtungsradverkehr der prozentuale Anteil der Überholungen, die außerhalb der Radverkehrsführung durchgeführt wurden, bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-4 zusammen mit der Bemessungsverkehrsstärke im Sinne des HBS (FGSV, 2015a) sowie der Breite der Radverkehrsanlage dargestellt. Die beiden höchsten Anteile an Überholungen außerhalb der

Radverkehrsanlage konnten mit 91,9 % auf der Lindwurmstraße in München und mit 80,6 % auf der Oberbaumbrücke in Berlin ermittelt werden. Die Häufigkeit der Nutzung der Flächen des Kfz- und Fußgängerverkehrs ist dabei maßgeblich auf die Breite der Radverkehrsanlage von 1,20 bzw. 1,50 m zurückzuführen. Beim Vergleich der drei untersuchten Radwege mit einer Breite von 1,60 m wird deutlich, dass an der Warendorfer Straße mit der höchsten Bemessungsverkehrsstärke der geringste Anteil an Überholungen außerhalb der Radverkehrsführung ermittelt wurde. Trotz deutlich geringerer Bemessungsverkehrsstärken ist der prozentuale Anteil an Überholungen außerhalb der Radverkehrsanlage an der Wolbecker Straße und der Berliner Straße fast doppelt so hoch.

Für die untersuchten Radverkehrsanlagen im Zweirichtungsradverkehr wurde ebenfalls der prozentuale Anteil der Überholungen und Begegnungen, die außerhalb des Querschnitts der Anlagen durchgeführt wurden, ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-5 zusammen mit der Bemessungsverkehrsstärke nach dem HBS sowie der Breite der Radverkehrsanlage dargestellt. Es zeigt sich, dass lediglich an der Erhardtstraße in München sowie „An der Alster“ in Hamburg Überholungen und Begegnungen außerhalb der Radverkehrsanlage beobachtet wurden. Während der prozentuale Anteil an der Erhardtstraße mit 7,2 % relativ gering ist, liegt der Wert bei der Radverkehrsanlage in Hamburg bei 55,8 %.

Stadt	Radverkehrsanlage	Bemessungsverkehrsstärke [Rad/h]	Breite der Radverkehrsführung [m]	Überholungen außerhalb der Radverkehrsführung [%]
Berlin	Oberbaumbrücke	656	1,50	80,6
Freiburg	Eschholzstr.	264	2,12	35,7
München	Lindwurmstr. (Radfahrstreifen)	576	2,00	30,9
München	Lindwurmstr. (Radweg)	428	1,20	91,9
Münster	Wolbecker Str.	412	1,60	58,1
Münster	Warendorfer Str.	1084	1,60	31,8
Berlin	Berliner Str.	300	1,60	61,3

Tab. 4-4: Bemessungsverkehrsstärke nach dem HBS (FGSV, 2015a), Breite der Radverkehrsführung sowie prozentualer Anteil der Überholungen, die außerhalb der Radverkehrsführungen beobachtet wurden, für die Einzelanlagen im Einrichtungsradverkehr

Stadt	Radverkehrsanlage	Bemessungsverkehrsstärke [Rad/h]	Breite der Radverkehrsführung [m]	Überholungen und Begegnungen außerhalb der Radverkehrsführung [%]
Mülheim	Radschnellweg Ruhr	356	4,00	0
Münster	Promenade	1852	4,60	0
Wuppertal	Nordbahntrasse	472	3,87	0
Göttingen	eRadschnellweg	720	3,94	0
München	Erhardtstraße	940	2,98	7,2
Hamburg	An der Alster	988	2,55	55,8

Tab. 4-5: Bemessungsverkehrsstärke nach dem HBS (FGSV, 2015a), Breite der Radverkehrsführung sowie prozentualer Anteil der Überholungen und Begegnungen, die außerhalb der Radverkehrsführungen beobachtet wurden, für die Einzelanlagen im Zweirichtungsradverkehr

Sofern Radfahrer bei einer Begegnung oder Überholung die Flächen des Fuß- oder Kfz-Verkehrs nutzten, wurde dieser zusätzliche Breitenbedarf bestimmt. In Bild 4-24 ist der mittlere seitliche Abstand zum Rand der Radverkehrsanlage in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage beim Ausweichen auf den Gehweg oder die Kfz-Fahrbahn getrennt nach Ein- und Zweirichtungsradverkehr dargestellt. Im Zweirichtungsradverkehr wurde beim Ausweichen auf den Gehweg zusätzlich nach der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt differenziert.

Bei den Ergebnissen im Zweirichtungsradverkehr ist auffällig, dass bei zwei Radfahrern im Querschnitt ein größerer seitlicher Abstand zur Radverkehrsanlage gewählt wird als bei drei Radfahrern im Querschnitt. Im Einrichtungsradverkehr konnte ein geringer Abstand zur Radverkehrsanlage beim Ausweichen auf die Kfz-Fahrbahn im Vergleich zum Gehweg beobachtet werden. Des Weiteren lässt sich insgesamt erkennen, dass mit einer größeren Breite der Radverkehrsanlage der seitliche Abstand beim Ausweichen auf die Kfz-Fahrbahn oder den Gehweg grundsätzlich geringer wird.

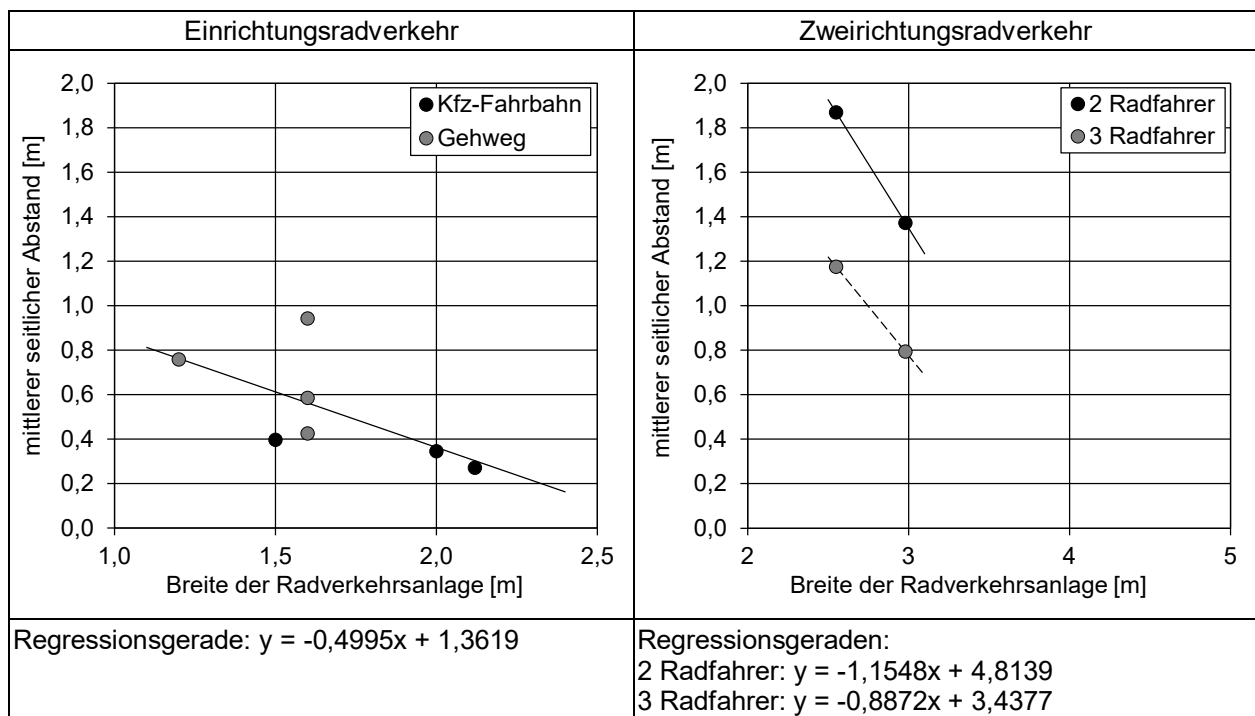


Bild 4-24: Mittlerer seitlicher Abstand zum Rand der Radverkehrsanlage in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage (links) beim Ausweichen auf den Gehweg bzw. die Kfz-Fahrbahn im Einrichtungsradsverkehr und (rechts) beim Ausweichen auf den Gehweg in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt im Zweirichtungsradsverkehr

4.3.2 Einfluss der Geschwindigkeit

Neben den seitlichen Abständen zwischen den einzelnen Radfahrern im Querschnitt und dem Rand der Radverkehrsanlage bei Überholungen und Begegnungen wurde die gefahrene Geschwindigkeit der jeweils beteiligten Radfahrer bestimmt. Dadurch konnte – neben der Breite der Radverkehrsanlage – ebenfalls die gefahrene Geschwindigkeit als mögliche Einflussgröße auf das seitliche Abstandsverhalten untersucht werden. Im Detail wurde dabei analysiert, ob ein Zusammenhang zwischen

- der gefahrenen Geschwindigkeit bei einer Überholung oder Begegnung und dem seitlichen Abstand zum Rand der Radverkehrsanlage,
- der gefahrenen Geschwindigkeit bei einer Überholung und dem seitlichen Radabstand zum überholten Radfahrer,
- der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen beiden Radfahrern bei einer Überholung und dem seitlichen Radabstand zueinander sowie
- der gefahrenen Geschwindigkeit bei einer Begegnung und dem seitlichen Radabstand zueinander besteht.

Da die Anzahl der Radfahrer im Querschnitt einen maßgeblichen Einfluss auf das seitliche Abstandsverhalten hat, wurden die oben beschriebenen Zusammenhänge jeweils in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt analysiert. Des Weiteren wurde bei der Analyse des seitlichen Abstands zum Rand der Radverkehrsanlage die Art der Begrenzung berücksichtigt.

Im Rahmen der Analyse wurde die Nullhypothese aufgestellt, dass es sich bei den oben genannten Zusammenhängen jeweils um zwei unabhängige Variablen handelt. Anhand des Chi-Quadrat-Tests nach Pearson wurde die Nullhypothese für jede Einzelanlage auf Signifikanz geprüft. Für die Auswertung wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ gewählt. Wenn der ermittelte p-Wert des Signifikanztests kleiner oder gleich dem Signifikanzniveau ist, wird die Nullhypothese verworfen. Für diesen Fall ist die Gegenhypothese, dass ein statistischer Zusammenhang zwischen den beiden untersuchten Variablen vorliegt, anzunehmen.

Die Auswertungen des Signifikanztests für die Nullhypothese konnten keine einheitlichen Ergebnisse für alle Einzelanlagen liefern. Im Zweirichtungsradverkehr konnte für jede Radverkehrsanlage mindestens ein signifikanter Zusammenhang zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit bei einer Überholung oder Begegnung und dem seitlichen Abstand zum Rand der Radverkehrsanlage ermittelt werden. Dabei fällt auf, dass ein signifikanter Zusammenhang immer dann ermittelt wurde, wenn nicht die maximal beobachtete Anzahl an Radfahrern im Querschnitt vorlag. Dabei wurde fast ausschließlich eine positive Korrelation zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit und dem seitlichen Abstand zum Rand der Radverkehrsanlage ermittelt. Basierend auf diesen Ergebnissen lässt sich somit die Aussage treffen, dass die verfügbare Breite von Radfahrern auch genutzt wird, um die Radverkehrsanlage bei höheren gefahrenen Geschwindigkeiten mit einem größeren seitlichen Abstand zum Rand zu befahren.

Bei den untersuchten Zusammenhängen zwischen den seitlichen Radabständen und der Geschwindigkeit musste lediglich vereinzelt die Nullhypothese verworfen werden, wobei sowohl eine positive als auch negative Korrelation ermittelt wurde. Es kann somit keine einheitliche Aussage getroffen werden, dass Radfahrer bei einer Überholung oder Begegnung mit einer höheren Geschwindigkeit oder Geschwindigkeitsdifferenz auch einen größeren Radabstand zum anderen Radfahrer wählen.

4.4 Geschwindigkeitsverhalten bei aktiven Überholungen

Bei den untersuchten Einzelanlagen konnte aufgrund der Methodik der durchgeführten Messungen nicht analysiert werden, inwiefern Radfahrer bei einer aktiven Überholung ihre gefahrene Geschwindigkeit verändern. Da für die drei untersuchten Netzabschnitte jeweils mindestens 20 Verfolgungsfahrten pro Fahrtrichtung durchgeführt wurden, konnten die einzelnen Überholungen auf den Strecken der Netzabschnitte näher analysiert werden. Dabei wurde zunächst für jeden Radfahrer, der eine aktive Überholung durchgeführt hat, die Wunschgeschwindigkeit auf der jeweiligen Strecke ermittelt. Anschließend wurde die mittlere Geschwindigkeit über den gesamten Vorgang des Überholens bestimmt. Für jede Überholung wurde die Differenz zwischen der mittleren Geschwindigkeit beim Überholvorgang und der Wunschgeschwindigkeit berechnet. Dabei zeigte sich, dass bei 61 % der beobachteten Überholungen die mittlere gefahrene Geschwindigkeit um mindestens 1 km/h erhöht wurde. In den übrigen Fällen wurde die Überholung mit einer mittleren gefahrenen Geschwindigkeit, die kleiner oder gleich der Wunschgeschwindigkeit ist, durchgeführt. Die mittleren Erhöhungen der gefahrenen Geschwindigkeit beim aktiven Überholvorgang sind in Form von Boxplots in Bild 4-25 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Mittelwert der Erhöhungen der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit bei einer aktiven Überholung im Bereich von 3,6 bis 4,4 km/h liegt. In 50 % der Fälle beträgt die Differenz maximal 2,7 bis 3,3 km/h. Es lässt sich somit schlussfolgern, dass die Geschwindigkeit beim aktiven Überholen meist nur moderat erhöht wird. Allerdings zeigen die oberen Whisker (Maximum: 8,6 bis 13,2 km/h), dass einige Radfahrer während des Überholvorgangs die mittlere gefahrene Geschwindigkeit stark erhöhen und „aus dem Sattel gehen“.

Die dargestellten Ergebnisse basieren jedoch auf einer relativ geringen Datengrundlage. Zur detaillierten Modellierung des Überholvorgangs im Radverkehr wären umfangreiche Auswertungen von Trajektorien notwendig.

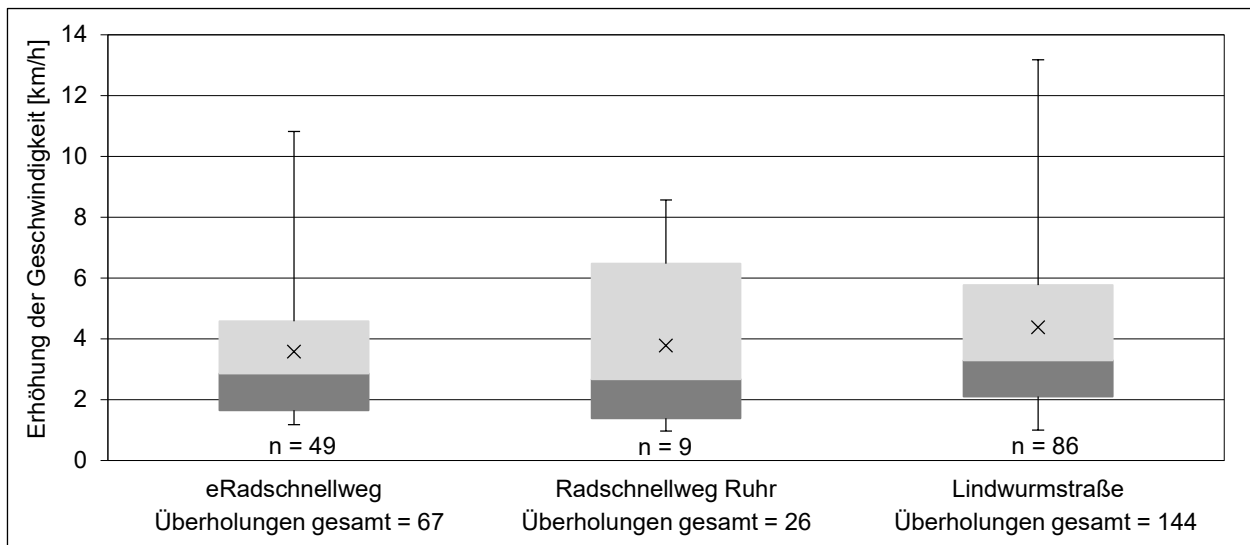


Bild 4-25: Erhöhung der gefahrenen Geschwindigkeit bei einer aktiven Überholung auf den untersuchten Netzabschnitten (Verfolgungsfahrten)

4.5 Geschwindigkeitsverhalten an Steigungsstrecken

An den untersuchten Steigungsstrecken wurde das Geschwindigkeitsverhalten jedes Radfahrers über den gesamten Streckenabschnitt analysiert. Dazu wurden zunächst die einzelnen Geschwindigkeitsprofile der GPS-gestützten Verfolgungsfahrten mit einem gleitenden Mittelwert geglättet. Die geglätteten Geschwindigkeitsprofile wurden anschließend sowohl getrennt nach den drei Fahrradtypen Alltagsrad, Pedelec und Rennrad als auch zusammenfassend ausgewertet. Zur Auswertung der Geschwindigkeitsprofile erfolgte eine Unterteilung der gesamten Steigungsstrecke in Teilstrecken von jeweils 50 m Länge. Für jedes Geschwindigkeitsprofil wurde durch Mittelung aller Datenpunkte einer Teilstrecke eine mittlere Geschwindigkeit für jede Teilstrecke bestimmt. Durch diesen Ansatz konnte der Einfluss der unterschiedlichen Anzahl der einzelnen GPS-Erfassungspunkte der Geschwindigkeitsprofile einer Teilstrecke auf das Gesamtergebnis reduziert werden. Bei der Universitätsstraße in Bochum und der Lerchenstraße in Essen wurde aufgrund der Länge von 585 m bzw. 1.400 m eine Teilstreckenlänge von 100 m gewählt.

Zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Entfernung vom Beginn der Steigungsstrecke und der gefahrenen Geschwindigkeit wurden logarithmische, exponentielle und polynomische Modellgleichungen auf der Grundlage der Ergebnisse der Verfolgungsfahrten entwickelt. Anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) wurden die entwickelten Modellgleichungen auf Signifikanz geprüft und die Modellgleichung ermittelt, die den Zusammenhang am besten beschreibt. Zur Ableitung des Geschwindigkeitsverhaltens an den Steigungsstrecken wurde jeweils eine polynomische Modellgleichung für die einzelnen Teilstrecken ermittelt. Die Auswertung der Geschwindigkeitsprofile ist am Beispiel der Bessemerstraße in Bochum anhand von Boxplots und der zugehörigen Modellgleichung in Bild 4-26 dargestellt.

Neben der absoluten Geschwindigkeitsänderung wurde auch die relative Geschwindigkeitsänderung an den Steigungsstrecken untersucht. Es wurde für jedes Geschwindigkeitsprofil die Anfangsgeschwindigkeit zur Normierung verwendet, um die Geschwindigkeitsdifferenz in Abhängigkeit von der Entfernung vom Beginn der Steigungsstrecke zu ermitteln. Analog zu den absoluten Geschwindigkeitsänderungen wurde die Steigungsstrecke dazu ebenfalls in einzelne Teilstrecken unterteilt. Vereinzelt konnte – insbesondere bei Pedelecs und geringen Längsneigungen – beobachtet werden, dass die gefahrene Geschwindigkeit geringfügig zunahm und oberhalb der Anfangsgeschwindigkeit lag. Für diesen Fall wurde für die weiteren Auswertungen eine Geschwindigkeitsdifferenz von 0 km/h für das Geschwindigkeitsprofil an den entsprechenden Teilstrecken angesetzt. Die Auswertung des normierten Geschwindigkeitsprofils für die Bessemerstraße in Bochum ist in Bild 4-27 dargestellt.

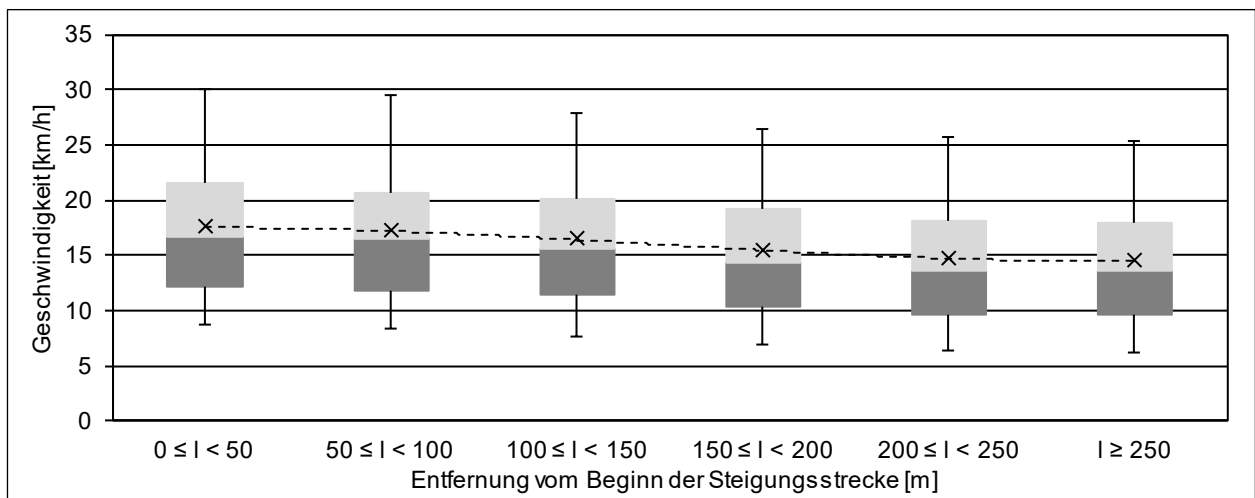


Bild 4-26: Geschwindigkeitsprofil basierend auf Verfolgungsfahrten für die Bessemerstraße in Bochum für alle Fahrradtypen

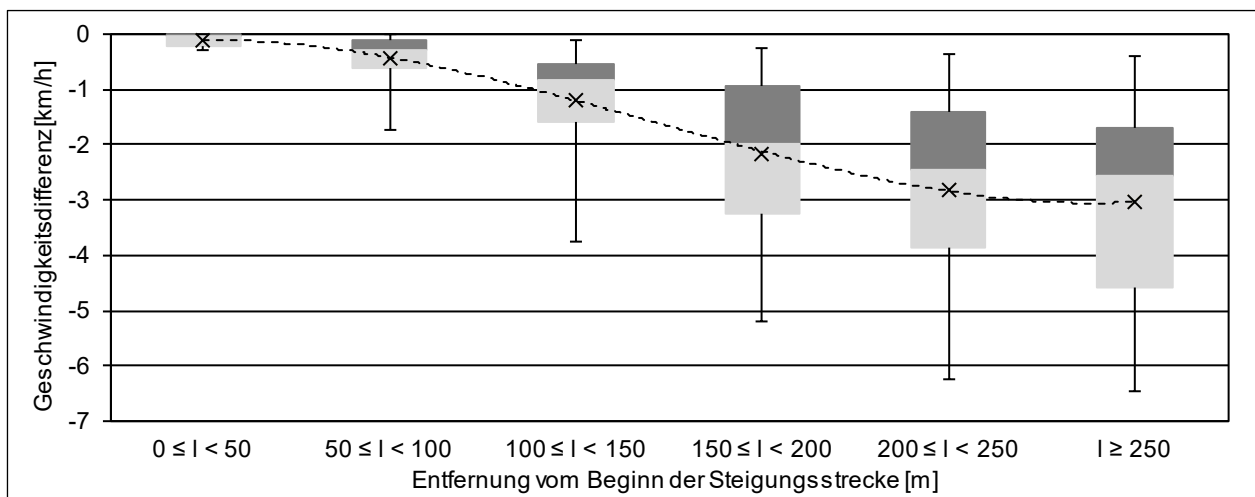


Bild 4-27: Normiertes Geschwindigkeitsprofil basierend auf Verfolgungsfahrten für die Bessemerstraße in Bochum für alle Fahrradtypen

Die entwickelten polynomischen Modellgleichungen für die einzelnen Steigungsstrecken über das gesamte Fahrradkollektiv sind in Bild 4-28 dargestellt. An den Steigungsstrecken der Bessemerstraße, der Lindwurmstraße und der Morgenstraße mit einer Längsneigung von 3,5 bis 4,2 % ist die Geschwindigkeitsänderung in 150 m Entfernung vom Beginn der Steigungsstrecke am höchsten. Bei den beiden untersuchten Steigungsstrecken mit einer Länge von mehr als 400 m ist zu erkennen, dass sich nach einer gewissen Entfernung vom Beginn der Steigungsstrecke die gefahrene Geschwindigkeit nicht mehr ändert und die Steigungsstrecke mit der Beharrungsgeschwindigkeit befahren wird.

Neben den GPS-gestützten Verfolgungsfahrten wurde das Geschwindigkeitsverhalten auch anhand von Querschnittsmessungen an der Universitätsstraße und der Bessemerstraße in Bochum sowie der Lerchenstraße in Essen analysiert. Dazu wurde jeweils am Anfang, in der Mitte und am Ende der Steigungsstrecke die Geschwindigkeit von unbeeinflusst fahrenden Radfahrern gemessen und der Fahrradtyp ermittelt. Die gemessenen Geschwindigkeiten an den Messquerschnitten wurden jeweils getrennt nach Fahrradtyp sowie für das gesamte Fahrradkollektiv ausgewertet.

Für die erhobenen Geschwindigkeiten an den einzelnen Messquerschnitten wurde zunächst jeweils der Mittelwert gebildet. Anschließend wurde anhand der Mittelwerte die relative Geschwindigkeitsänderung an einzelnen Messquerschnitten bestimmt. Dazu wurde der Mittelwert am ersten Messquerschnitt am Beginn der Steigungsstrecke als Anfangsgeschwindigkeit zur Normierung verwendet. Die ermittelten relativen Geschwindigkeitsänderungen an den Messquerschnitten der drei Steigungsstrecken wurden mit den Ergeb-

nissen der Verfolgungsfahrten in Bild 4-28 verglichen. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse der Querschnittsmessung eine hohe Übereinstimmung mit den normierten Geschwindigkeitsprofilen basierend auf den Verfolgungsfahrten aufweisen. Lediglich für die Universitätsstraße weichen die Ergebnisse an den beiden Messquerschnitten um ungefähr -1 km/h von den normierten Geschwindigkeitsprofilen ab.

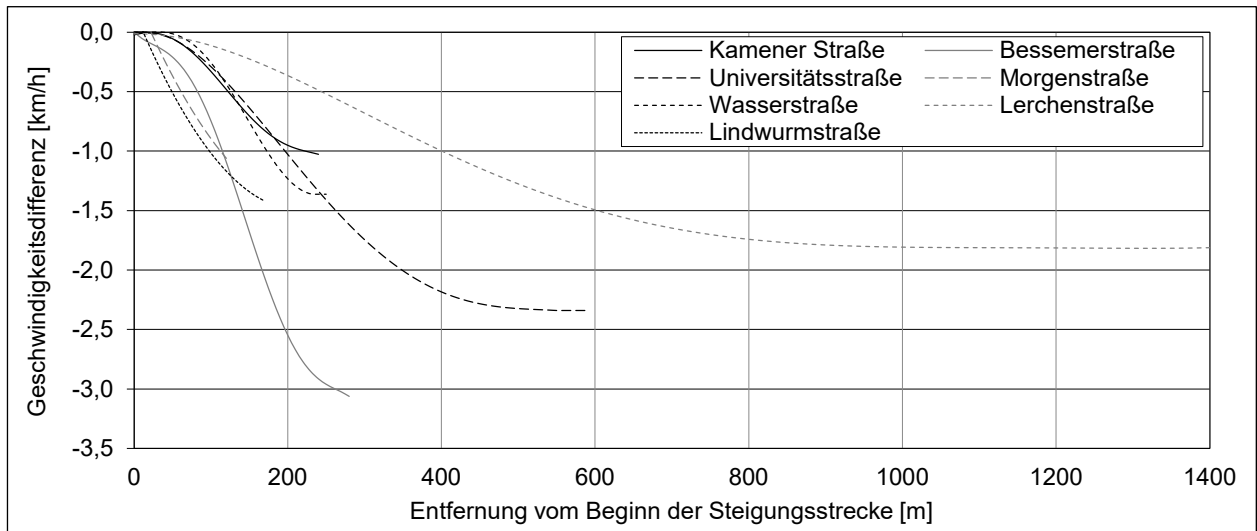


Bild 4-28: Normierte Geschwindigkeitsprofile basierend auf Verfolgungsfahrten aller untersuchten Steigungsstrecken für alle Fahrradtypen

5 Analyse des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten

Neben der empirischen Analyse des Verkehrsablaufs auf zwölf Einzelanlagen wurde der Verkehrsablauf auf drei längeren Radverbindungen, die den Charakter eines Netzabschnitts aufweisen, untersucht. Dabei wurden für jeden Netzabschnitt beide Fahrtrichtungen analysiert. An allen drei Netzabschnitten wurden Fahrtzeitmessungen durchgeführt. Die Fahrtzeiten wurden anhand von GPS-gestützten Verfolgungsfahrten (V) sowie Bluetooth-Messungen (BT) ermittelt. Auf dem Netzabschnitt Lindwurmstraße in München wurde keine Bluetooth-Messung durchgeführt, da aufgrund der fahrbahnbegleitenden Führung der Radverkehrsanlagen keine eindeutige Identifikation von Radfahrern und Kraftfahrzeugen in den erhobenen Daten möglich ist. Die Ergebnisse der erhobenen Fahrtgeschwindigkeiten auf den untersuchten Netzabschnitten sind in Bild 5-1 dargestellt. Es zeigt sich, dass die ermittelten Fahrtgeschwindigkeiten basierend auf den Bluetooth-Messungen insgesamt eine deutlich größere Streuung im Vergleich zu den Ergebnissen der Verfolgungsfahrten aufweisen. Dies ist auf die höhere Anzahl an Fahrten, die anhand der Bluetooth-Messung erhoben wurden, zurückzuführen.

Die RIN (FGSV, 2008) enthalten differenziert nach der Verkehrswegekategorie Zielvorgaben für die angestrebte Fahrtgeschwindigkeit im Alltagsradverkehr, die auch die Zeitverluste an Knotenpunkten umfassen. Diese Angaben basieren allerdings auf wenigen empirischen Werten und stellen somit vielmehr Einschätzungen dar. Die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten für die einzelnen Verfolgungsfahrten wurden anhand der Methodik zur Ermittlung der Angebotsqualität von Netzabschnitten im Kfz-Verkehr des HBS (FGSV, 2015a) bestimmt. Dabei werden für den Hauptknotenpunkt am Beginn des Netzabschnitts nur die Zeitverluste hinter der Knotenpunktmitte und für den Hauptknotenpunkt am Ende des Netzabschnitts nur die Zeitverluste vor der Knotenpunktmitte berücksichtigt.

Der eRadschnellweg ist gemäß den RIN der Verkehrswegekategorie IR II zuzuordnen. Nach den RIN ist für diese Verkehrswegekategorie eine Zielgröße von 15 bis 25 km/h für die Fahrtgeschwindigkeit definiert. Die Fahrtgeschwindigkeit auf dem eRadschnellweg liegt in Fahrtrichtung Nord zwischen 6,5 und 31,7 km/h und in Fahrtrichtung Süd zwischen 7,4 und 31,1 km/h. Der Mittelwert und der Interquartilsabstand der auf den Bluetooth-Messungen basierenden Fahrtgeschwindigkeiten sind in Fahrtrichtung Nord höher als in Fahrtrichtung Süd. Anhand der Ergebnisse der Verfolgungsfahrten sind jedoch der Mittelwert und der Interquartilsabstand in Fahrtrichtung Süd höher. Die mithilfe der Bluetooth-Messung und der Verfolgungsfahrten erhobenen Mittelwerte der Fahrtgeschwindigkeiten liegen für beide Fahrtrichtungen innerhalb des Bereichs der Zielgröße der RIN.

Auf dem Radschnellweg Ruhr wurde eine Fahrtgeschwindigkeit in Fahrtrichtung Ost im Bereich von 10,1 bis 31,7 km/h und in Fahrtrichtung West zwischen 10,3 und 35,5 km/h ermittelt. Beim Vergleich der beiden Fahrtrichtungen wird deutlich, dass der Mittelwert der Fahrtgeschwindigkeit sowie der Interquartilsabstand, in dem sich die mittleren 50 % der Daten befinden, in Fahrtrichtung West höher sind als in Fahrtrichtung Ost. Dies ist auf die nahezu konstante Längsneigung von 1,0 % in Fahrtrichtung Ost zurückzuführen. Der Radschnellweg Ruhr ist nach den RIN der Verkehrswegekategorie AR II bzw. AR III zuzuordnen. Gemäß den RIN ist für diese Verkehrswegekategorie eine Zielgröße von 20 bis 30 km/h für die Fahrtgeschwindigkeit definiert. In Fahrtrichtung Ost konnte diese Zielgröße basierend auf den Bluetooth-Messungen nicht erreicht werden. Die Hinweise zur Anwendung der RIN (FGSV, 2018) enthalten für den Alltagsradverkehr in Abhängigkeit von der Art der Radverkehrsanlage und der Längsneigung mittlere Fahrtgeschwindigkeiten auf Strecken ohne Knotenpunkte mit Wartepflicht. Für selbstständig geführte Radwege in der Ebene wird eine Fahrtgeschwindigkeit von 19 km/h angesetzt. Die anhand der Bluetooth-Messung erhobenen Mittelwerte der Fahrtgeschwindigkeit von 18,1 km/h in Fahrtrichtung Ost und 21,8 km/h in Fahrtrichtung West liegen in dieser Größenordnung.

Auf dem Netzabschnitt der Lindwurmstraße wurden für beide Fahrtrichtungen vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der Fahrtgeschwindigkeit anhand der Verfolgungsfahrten gewonnen. In Fahrtrichtung Ost wurden Fahrtzeiten im Bereich von 12,5 bis 23,6 km/h und in Fahrtrichtung West von 12,5 bis 22,5 km/h ermittelt. Die Lindwurmstraße ist gemäß den RIN der Verkehrswegekategorie IR III zuzuordnen. Nach den RIN ist für diese Verkehrswegekategorie eine Zielgröße von 15 bis 20 km/h für die Fahrtgeschwindigkeit definiert. Die erhobenen Mittelwerte der Fahrtgeschwindigkeiten anhand der Verfolgungsfahrten liegen für beide Fahrtrichtungen innerhalb des Bereichs der Zielgröße.

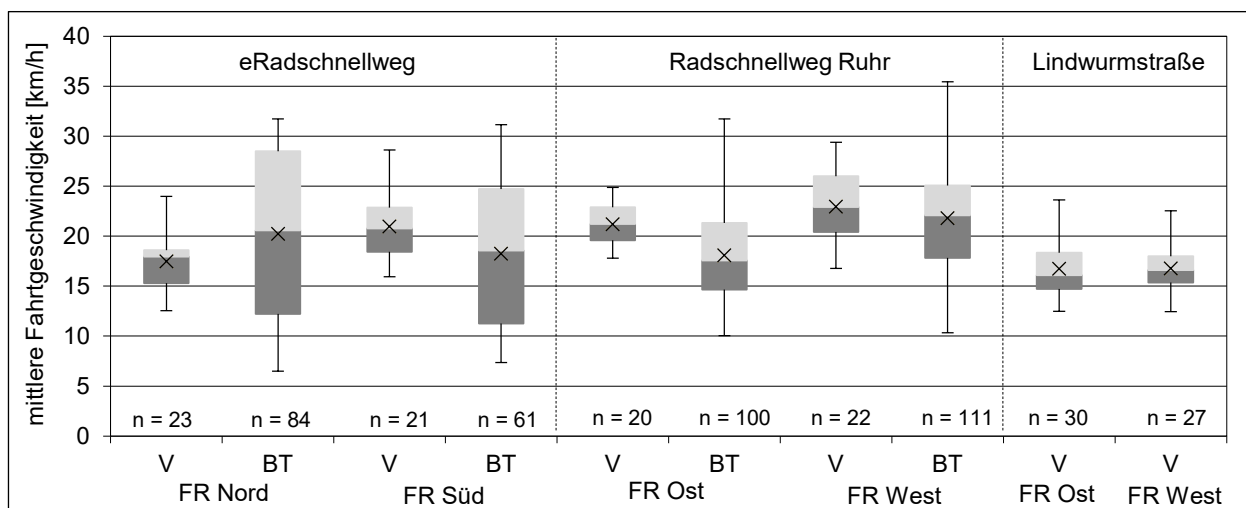


Bild 5-1: Mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf den untersuchten Netzabschnitten anhand von Verfolgungsfahrten (V) und Bluetooth-Messungen (BT)

Zur Ermittlung möglicher Einflussgrößen auf die Fahrtgeschwindigkeit auf Netzabschnitten im Radverkehr wurden die Verfolgungsfahrten näher analysiert. Dazu wurde zunächst der Einfluss der Knotenpunkte untersucht. Da der untersuchte Netzabschnitt auf dem Radschnellweg Ruhr keine plangleichen Knotenpunkte aufweist, wurde dieser bei der Analyse des Einflusses der Knotenpunkte nicht berücksichtigt. Für jede Verfolgungsfahrt wurde die Anzahl der Halte an Knotenpunkten mit LSA ermittelt. Da die einzelnen Fahrtrichtungen der beiden Netzabschnitte eine unterschiedliche Anzahl an Knotenpunkten mit LSA aufweisen, wurde zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse der prozentuale Anteil der Durchfahrten ohne Halt an Knotenpunkten mit LSA ermittelt. Die Wertepaare aus der Fahrtgeschwindigkeit und dem prozentualen Anteil der Durchfahrten ohne Halt sind für jede Verfolgungsfahrt in Bild 5-2 dargestellt.

Zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem prozentualen Anteil der Durchfahrten ohne Halt und der mittleren Fahrtgeschwindigkeit wurden logarithmische, exponentielle und polynomische Modellgleichungen auf der Grundlage der Ergebnisse der Verfolgungsfahrten entwickelt. Anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) wurden die entwickelten Modellgleichungen auf Signifikanz geprüft und die Modellgleichung ermittelt, die den Zusammenhang am besten beschreibt. Für die Auswertung des Signifikanztests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ gewählt. Dabei zeigte sich, dass der Zusammenhang zwischen dem prozentualen Anteil der Durchfahrten ohne Halt und der mittleren Fahrtgeschwindigkeit an allen untersuchten Netzabschnitten mit einer Exponentialfunktion signifikant beschrieben werden kann. Die Exponentialgleichungen mit der höchsten Übereinstimmung mit den ermittelten Werten für jeden Netzabschnitt sind ebenfalls in Bild 5-2 dargestellt.

Neben der Anzahl der Halte wurde der Einfluss der Verlustzeit an Knotenpunkten, die sich aus der Wartezeit und dem Zeitverlust aus Verzögerung und Beschleunigung zusammensetzt, auf die mittlere Fahrtgeschwindigkeit analysiert. Dazu wurde die Verlustzeit an den Knotenpunkten für jede Verfolgungsfahrt ermittelt und anhand der Länge des Netzabschnitts skaliert. Für den Knotenpunkt am Beginn des Netzabschnitts wurden nur die Zeitverluste hinter der Haltlinie und für den Knotenpunkt am Ende des Netzabschnitts nur die Zeitverluste vor der Haltlinie berücksichtigt. Die Wertepaare aus der mittleren Fahrtzeit und der mittleren Verlustzeit an Knotenpunkten sind für jede Verfolgungsfahrt in Bild 5-3 dargestellt. Zusätzlich wurde analysiert, inwieweit sich die prozentuale Anzahl der Durchfahrten ohne Halt und die mittlere Verlustzeit gegenseitig beeinflussen. Dazu wurden anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse Modellgleichungen entwickelt, die zum einen den Zusammenhang zwischen der mittleren Fahrtgeschwindigkeit und der mittleren Verlustzeit an Knotenpunkten und zum anderen den Zusammenhang zwischen der mittleren Verlustzeit und den Durchfahrten ohne Halt signifikant beschreiben. Die Modellgleichungen sind ebenfalls in Bild 5-3 dargestellt. Für den Zeitverlust aus Verzögerung und Beschleunigung an Knotenpunkten konnte im Mittel über alle Verfolgungsfahrten mit Verlustzeiten ein Wert von 5 s ermittelt werden.

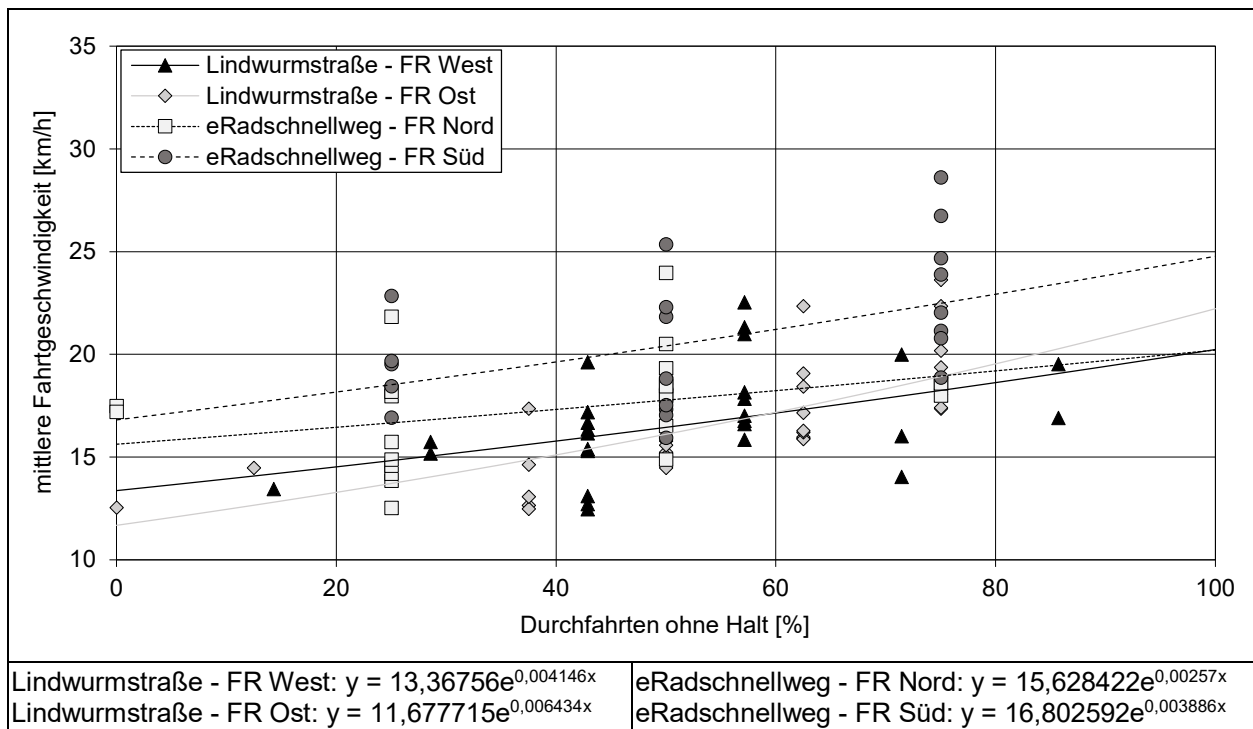


Bild 5-2: Zusammenhang zwischen der mittleren Fahrtgeschwindigkeit und dem prozentualen Anteil der Durchfahrten ohne Halt an Knotenpunkten mit LSA für die Verfolgungsfahrten auf den Netzabschnitten Lindwurmstraße in München und eRadschnellweg in Göttingen

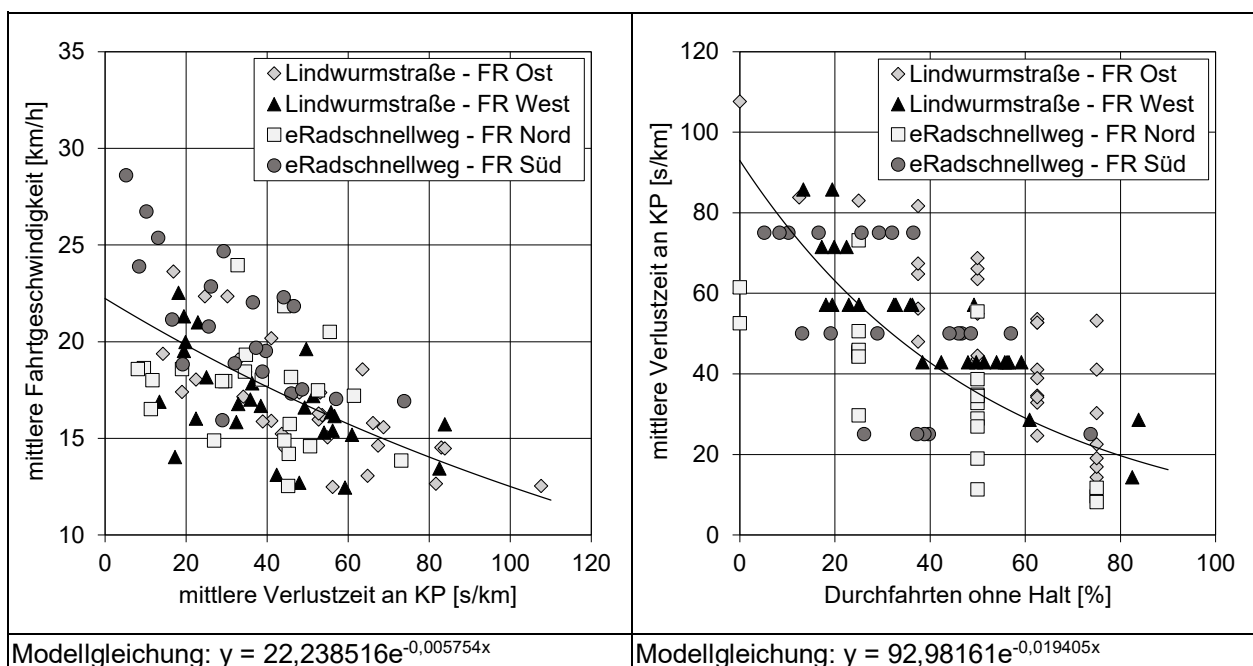


Bild 5-3: Zusammenhang zwischen der mittleren Fahrtgeschwindigkeit und der mittleren Verlustzeit an Knotenpunkten (links) sowie zwischen der mittleren Verlustzeit an Knotenpunkten und dem prozentualen Anteil der Durchfahrten ohne Halt an Knotenpunkten mit LSA (rechts) für die Verfolgungsfahrten auf den Netzabschnitten Lindwurmstraße in München und eRadschnellweg in Göttingen

Des Weiteren wurde für jede Verfolgungsfahrt die Anzahl der Störungen, die sich aus Begegnungen und Überholungen sowie weiteren punktuellen Beeinträchtigungen im Fahrverhalten zusammensetzen, erhoben. Da die drei Netzabschnitte unterschiedliche Längen aufweisen, wurde zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse die Störungsrate pro Kilometer ermittelt. Die Wertepaare aus der mittleren Fahrtgeschwindigkeit und der Störungsrate sind für jede Verfolgungsfahrt in Bild 5-4 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Störungsrate

auf dem eRadschnellweg deutlich über den Werten der anderen beiden Netzabschnitte liegt. Dies ist zum einen auf die Führung im Zweirichtungsradverkehr zurückzuführen, weil Begegnungen in der Störungsrate berücksichtigt werden. Zum anderen wurden auf dem eRadschnellweg deutlich höhere Verkehrsstärken im Vergleich zum Radschnellweg Ruhr gemessen, wodurch sich eine ebenfalls deutlich höhere Begegnungs- und Überholungsrate ergibt.

Eine einfaktorielle Varianzanalyse wurde ebenfalls zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Störungsrate und der mittleren Fahrtgeschwindigkeit anhand von Modellgleichungen für jeden Netzabschnitt durchgeführt. Dabei konnte lediglich für den Radschnellweg Ruhr in Fahrtrichtung West sowie die Lindwurmstraße in Fahrtrichtung West ein signifikanter Zusammenhang ermittelt werden. Die Exponentialgleichungen zur Beschreibung des Zusammenhangs sind ebenfalls in Bild 5-4 dargestellt. Auf den übrigen Netzabschnitten konnte kein signifikanter Einfluss der Störungsrate auf die mittlere Fahrtgeschwindigkeit festgestellt werden.

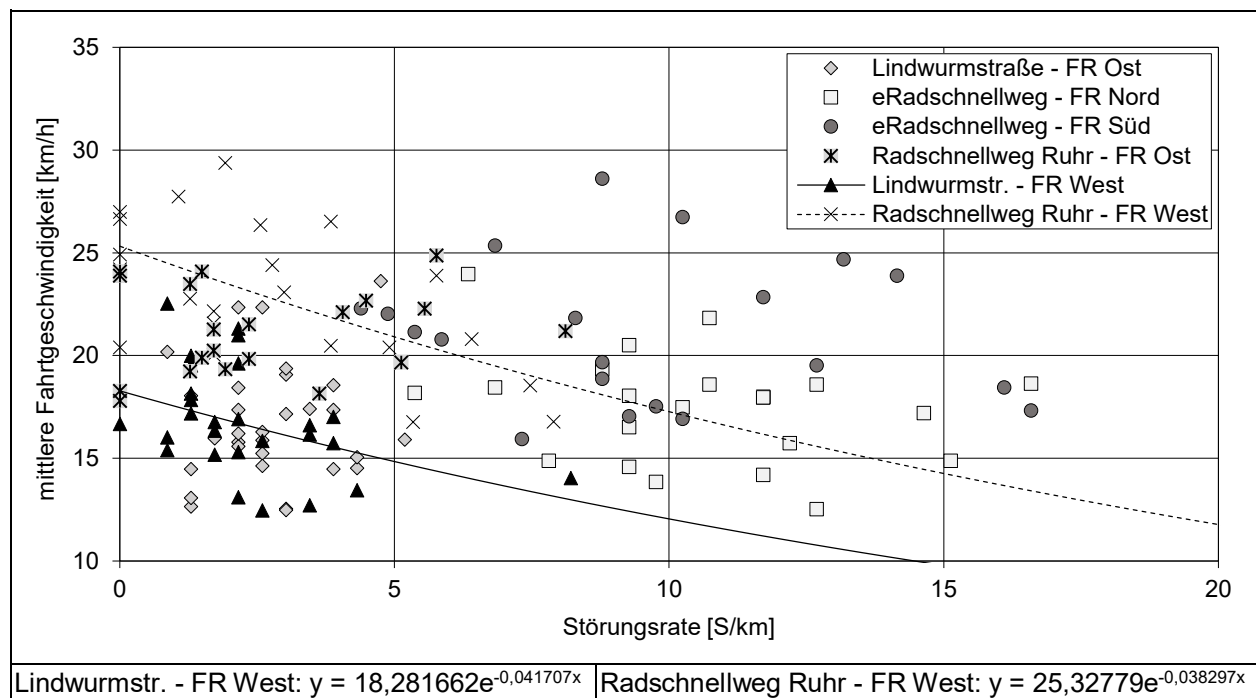


Bild 5-4: Zusammenhang zwischen der mittleren Fahrtgeschwindigkeit und der Störungsrate für die Verfolgungsfahrten auf den analysierten Netzabschnitten

Die ermittelte Störungsrate berücksichtigt sowohl aktive als auch passive Überholungen. Radfahrer, die mit einer relativ geringen Geschwindigkeit eine Strecke befahren, werden durch Radfahrer mit einer höheren Geschwindigkeit überholt. Dementsprechend weisen Radfahrer, die mit einer relativ geringen Geschwindigkeit fahren, eine hohe Anzahl an passiven Überholungen auf. Anhand der erhobenen Daten wurde analysiert, ob ein Zusammenhang zwischen der passiven Überholungsrate und der mittleren Fahrtgeschwindigkeit besteht. Die Wertepaare aus der mittleren Fahrtgeschwindigkeit und der passiven Überholungsrate sind für jede Verfolgungsfahrt in Bild 5-5 dargestellt. Für die Netzabschnitte Lindwurmstraße, Radschnellweg Ruhr in Fahrtrichtung West und eRadschnellweg in Fahrtrichtung Süd konnten signifikante Modellgleichungen für den Zusammenhang ermittelt werden. Die ermittelten Modellgleichungen sind ebenfalls in Bild 5-5 dargestellt. Auf dem eRadschnellweg in Fahrtrichtung Nord und dem Radschnellweg Ruhr in Fahrtrichtung Ost konnte kein signifikanter Einfluss der passiven Überholungsrate auf die mittlere Fahrtgeschwindigkeit festgestellt werden.

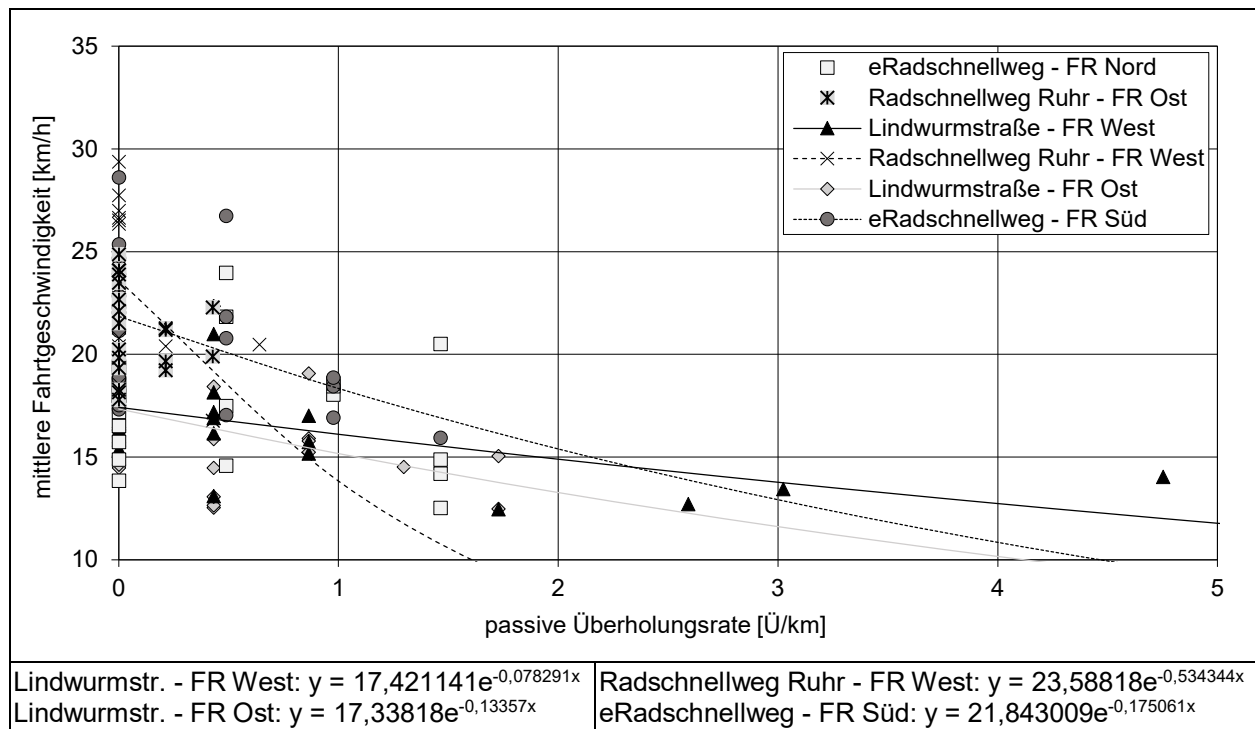


Bild 5-5: Zusammenhang zwischen der mittleren Fahrtgeschwindigkeit und der passiven Überholungsrate für die Verfolgungsfahrten auf den analysierten Netzabschnitten

Anhand der Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass der für die Lindwurmstraße in Fahrtrichtung West und den Radschnellweg Ruhr in Fahrtrichtung West ermittelte Zusammenhang zwischen der Störungsrate und der mittleren Fahrtgeschwindigkeit auf den Einfluss der passiven Überholungsrate auf die mittlere Fahrtgeschwindigkeit zurückzuführen ist. Somit wirkt sich eine hohe Störungsrate nicht auf die mittlere Fahrtgeschwindigkeit aus, sondern resultiert aus einer geringen Wunschgeschwindigkeit auf den Strecken.

Insgesamt ist anhand der Ergebnisse der Verfolgungsfahrten festzuhalten, dass die mittlere Fahrzeit auf Netzabschnitten maßgeblich durch die Knotenpunkte mit Wartepflicht beeinflusst wird. Dabei haben sowohl die Anzahl der Halte als auch die Verlustzeit an den Knotenpunkten einen maßgeblichen Einfluss auf die mittlere Fahrtgeschwindigkeit.

6 Mikroskopische Simulation

6.1 Grundlagen

Aufbauend auf den empirischen Erhebungen und Analysen wurden mikroskopische Simulationen des Verkehrsablaufs auf Radverkehrsanlagen mit PTV Vissim durchgeführt. Es wurden die Untersuchungsstrecken modelliert und beobachtbare Fahrverhaltensparameter anhand der empirischen Daten kalibriert. Das resultierende Überholverhalten wurde anhand der empirisch beobachteten und der theoretisch auftretenden Anzahl der Überholungen validiert. Mit Reihensimulationen wurden die empirischen Daten inter- und extrapoliert, um die Datenbasis für die Verfahrensermittlung zu bilden.

Das Fahrverhalten in PTV Vissim wird durch eine Vielzahl verschiedener Parameter bestimmt. Da im Wesentlichen das Verhalten auf der freien Strecke bei der Dimensionierung der Breite von Radverkehrsanlagen relevant ist, konnten die Parameter, die ausschließlich das Verhalten an Knotenpunkten oder vor statischen Hindernissen beeinflussen, aus der detaillierten Betrachtung ausgeschlossen werden. Die erarbeitete Kalibrierung ist daher auf Strecken anwendbar, Knotenpunkte müssen separat kalibriert werden.

Die Literaturanalyse hat gezeigt, dass Behinderungen beim Überholen (und Begegnen) der wichtigste Grund für Beeinträchtigungen der Verkehrsqualität sind. Daher muss die Kalibrierung primär darauf ausgerichtet sein, ein realitätsgetreues Überholverhalten zu erreichen. Die Anzahl der Überholungen wird maßgeblich dadurch bestimmt, welche Geschwindigkeiten die Radfahrer erreichen wollen und ob ausreichend Platz für die Überholungen vorhanden ist. Erst durch Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen mehreren Fahrrädern entstehen Überholwünsche. Eine genaue Abbildung der Wunschgeschwindigkeiten ist daher wichtig für realitätsnahe Simulationsergebnisse.

In der Simulation ist es möglich, Überholungen sowohl innerhalb des Fahrstreifens als auch im Gegenverkehr zu modellieren. Im Gegenverkehr zu überholen bedeutet, dass der Verkehrsraum des entgegenkommenden Radverkehrs zum Überholen mitbenutzt wird, wenn dies konfliktfrei möglich ist. Bei Zweirichtungsradwegen kommen beide Arten des Überholvorgangs zum Einsatz. Dementsprechend sind die Parameter, die das Überholen im Gegenverkehr beeinflussen, sowie solche, die das Überholen im eigenen Fahrstreifen bestimmen, wichtig für die Kalibrierung.

Das Längsverhalten, d. h. die Parameter des Fahrzeugfolgemodells, beeinflusst das Überholen vor allem dahingehend, dass der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug festgelegt wird. Weiterhin wirkt sich das Folgeverhalten auf die Kapazität im hochbelasteten Zustand aus. Da Verkehrszusammenbrüche in der Realität nicht beobachtet werden konnten, konnte dieser Aspekt in die Kalibrierung aber nur sekundär durch die Betrachtung von Zeitlücken einbezogen werden. Schließlich hat das Querverhalten, also die Wahl der Querposition innerhalb des Fahrstreifens unabhängig von Überholvorgängen, einen Einfluss auf die Überholungen, da bei Fahrpositionen in der Mitte des Fahrstreifens das Überholen durch schnellere Fahrräder blockiert werden kann. Eine Tabelle sämtlicher Parameter, die das Fahrverhalten beeinflussen, befindet sich im Anhang C. Das Nebeneinanderfahren mehrerer Radfahrer in der Realität reduziert die zum Überholen zur Verfügung stehende Breite. Dies kann simulationsseitig bisher nicht gezielt abgebildet werden und wird daher – unter der Annahme, dass in der Realität eine gewisse Kooperationsbereitschaft der Nebeneinanderfahrenden besteht, um den Überholenden Platz zu machen – nicht betrachtet.

6.2 Modellierung der Untersuchungsstrecken

Im Rahmen des Projekts wurden Messungen für drei verschiedene Teilfragestellungen durchgeführt. Dementsprechend wurden Einzelanlagen und Netzabschnitte sowie Steigungsstrecken in PTV Vissim modelliert und simuliert. Die Differenzierung der empirischen Erhebungsmethoden diente der Bestimmung von Kennwerten zur Beschreibung einzelner Aspekte des Radverkehrs. Äquivalente Kennwerte wurden in der Simulation ermittelt und zur Kalibrierung herangezogen. Im folgenden Kapitel werden diese drei Modelltypen, die ermittelten Kennwerte und die jeweilige Modellierungsmethodik beschrieben.

6.2.1 Modellaufbau

Aus den Verkehrsmessungen lagen Daten zu der Anzahl der Überholungen (pro Messzeitraum), den Abständen der Fahrräder untereinander und zum Rand während der Überholungen sowie der Anzahl der ankommenden Fahrräder und deren Geschwindigkeiten an jeweils zwei Messquerschnitten vor. Die Kalibrierung fokussierte sich auf die Anpassung an die beobachteten aggregierten Kenngrößen (Anzahl der Überholungen, Überholabstände und Geschwindigkeitsverteilungen). Aspekte der detaillierten Beschreibung von Beschleunigungsverläufen konnten auf der Grundlage der empirischen Daten nicht untersucht werden.

Einzelanlagen

Anhand der Simulation des Verkehrsablaufs auf Einzelanlagen wurden Geschwindigkeiten, Überholungen und Zeitlückenverteilungen in der Ebene untersucht. Die Kalibrierung der Simulationsmodelle der Einzelanlagen zielte primär auf das Überholverhalten, da dieses maßgebend für die Qualität des Verkehrsablaufs ist. In der Simulation wurden die Kennwerte möglichst in der gleichen Weise wie bei den Messungen ermittelt, um systematische Abweichungen auszuschließen. Für alle Auswertungen wurden daher die beobachteten Radfahrer so in das Modell eingesetzt, wie sie in der Realität gemessen wurden. Dies ist für die Anzahl der Überholvorgänge wichtig, da beispielsweise die Pulkbildung durch Einflüsse von Knotenpunkten die auftretenden Überholungen beeinflussen kann. Das Einsetzen der Radfahrer erfolgte mit einem internen Python-Skript. Dabei ruft PTV Vissim in jedem Zeitschritt ein Skript auf, das aus einer Liste ausliest, ob in dem entsprechenden Zeitschritt ein Radfahrer einzusetzen ist und welche Geschwindigkeit dieser hat. Diese Liste basiert auf den Erhebungsdaten des jeweils ersten Messquerschnitts. Da die Untersuchung der Geschwindigkeitsverteilung keine Beeinflussung der gefahrenen Geschwindigkeiten durch andere Radfahrer aufgezeigt hat, wurde die gemessene Geschwindigkeit an das Simulationsmodell als Wunschgeschwindigkeit übergeben (siehe Kapitel 4.1.5). Die Modelle der Einzelanlagen enthalten somit keine stochastischen Komponenten im Verkehrszufluss. Die bei den Messungen eingesetzten Radargeräte konnten bei nah aneinander vorbeifahrenden Radfahrern allerdings die Geschwindigkeit nicht getrennt ermitteln. Daher gibt es einige Fahrräder in den Messdaten, von denen zwar der Zeitstempel, aber keine Geschwindigkeit erfasst worden ist. Je höher die Belastung auf einer Strecke ist und entsprechend viele Radfahrer dicht beieinander fahren, umso größer ist der Anteil fehlender Geschwindigkeitserfassungen. In der Modellierung wurde in diesem Fall näherungsweise die Geschwindigkeit des zum gleichen Zeitpunkt gemessenen Radfahrers verwendet.

Zur Auswertung der Simulationen wurden verschiedene Messungen vorgenommen. Äquivalent zum zweiten Messquerschnitt der realen Untersuchungsstrecke wurden mithilfe einer Querschnittsmessung in PTV Vissim die resultierenden Ankunftszeiten (und damit die Brutto-Zeitlücken) und Geschwindigkeiten ausgewertet. Als Auswertungszeitraum wurde die höchstbelastete Stunde einer Richtungsfahrbahn verwendet. Bei Zweirichtungswegen wurde entsprechend die Stunde gewählt, die von beiden Richtungen isoliert betrachtet die höchste Belastung aufweist. Zur Auswertung von Überholungen wurden die Fahrzeugprotokolle aus der Simulation mithilfe eines Python-Skripts ausgewertet. Eine Überholung wurde als solche gewertet, wenn ein Radfahrer sich auf gleicher Längsposition bei einer Toleranz von 1 m mit einem anderen Radfahrer befand und sich während der aufgezeichneten Zeit die Differenz der Längsposition gegenüber dem anderen Radfahrer um mindestens 0,5 m vergrößerte. Das Auswerteskript lieferte außerdem Erkenntnisse über den Seitenabstand zwischen Überholendem und Überholtem, die Geschwindigkeiten und die Differenzgeschwindigkeit während des Überholvorgangs. Die Überholungen wurden bei der empirischen Erhebung nicht im gesamten Bereich zwischen den beiden Messquerschnitten der Geschwindigkeitsmessung erfasst, sondern in einem Ausschnitt, in dem die Kameraaufzeichnung durchgeführt wurde. Die Auswertung des Überholens in PTV Vissim wurde auf einen Bereich gleicher Länge beschränkt. Da die empirischen Daten der Überholungen aggregiert vorlagen, wurde der gesamte Erhebungszeitraum simuliert.

Steigungsstrecken

An Steigungsstrecken ist es wichtig, das Geschwindigkeitsverhalten über den gesamten Steigungsverlauf hinweg korrekt abzubilden. Diesbezüglich gibt es nur wenig Literatur, sodass nicht auf eine bestehende Starteinstellung zurückgegriffen werden kann.

Da an den Steigungsstrecken nicht die Beeinflussung von Radfahrern untereinander, sondern lediglich der Einfluss der Steigung auf die Geschwindigkeiten untersucht werden sollte, wurde bei der Modellierung die zeitliche Abfolge der einzelnen Radfahrer so groß gewählt, dass eine Beeinflussung ausgeschlossen werden konnte. Zur Kalibrierung der Steigungsstrecken standen zwei Datensätze zur Verfügung: Die durch Verfolgungsfahrten ermittelten Geschwindigkeitsverläufe an allen sieben Steigungsstrecken, die als über 50 m oder 100 m aggregierte mittlere Geschwindigkeiten einzelner Radfahrer vorlagen, sowie ergänzend für drei Steigungsstrecken Querschnittsmessungen mit Radartechnik. Das Geschwindigkeitsverhalten einzelner Radfahrer konnte mithilfe der Verfolgungsfahrten nachvollzogen werden. Dabei war die Stichprobengröße aufgrund der aufwändigen Erhebung gering, insbesondere wenn nur einzelne Fahrradttypen betrachtet wurden. Ergänzend lagen für die Bessemerstraße, die Lerchenstraße und die Universitätsstraße Querschnittsmessungen mit deutlich größerem Stichprobenumfang vor. An diesen Untersuchungsstrecken wurden jeweils zu Beginn, in der Mitte und am Ende der Steigungsstrecke die Geschwindigkeiten der vorbeifahrenden Radfahrer erfasst.

Da sich alle sieben Untersuchungsstrecken hinsichtlich der Steigung und des beobachteten Geschwindigkeitsverlaufs in die drei Steigungsklassen 2,5 %, 3,5 % und 4,0 % einteilen lassen, wurden für diese Steigungsklassen jeweils repräsentative Modelle aufgebaut. Diese drei Modelle wurden anhand der Daten der Bessemerstraße, der Universitätsstraße und der Lerchenstraße kalibriert und mithilfe der Daten der anderen Messstellen validiert.

Um das Verhalten einzelner Radfahrer isoliert betrachten zu können, wurden in PTV Vissim Fahrzeugzuflüsse mit einem Zeitintervall von einer Minute und einer Verkehrsstärke von 60 Rad/h angelegt. Dabei wurde die Option *exakter Zufluss* verwendet. Das bedeutet, dass pro Minute genau ein Radfahrer eingesetzt wird. Dieses Intervall schließt Überholungen nicht vollständig aus. Da aber die Überholung von einem Radfahrer durch die Breite der Messstrecke problemlos möglich ist, finden keine relevanten Beeinträchtigungen aufgrund von Überholvorgängen statt.

Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs der Verfolgungsfahrten bildet die Wunschgeschwindigkeit der in der Simulation abgebildeten Radfahrer die Spannweite der in den Verfolgungsfahrten gemessenen Geschwindigkeiten ab, stellt aber keine empirische Häufigkeitsverteilung dar. Um sicherzustellen, dass die Radfahrer mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren, befindet sich der Zufluss in der Simulation 100 m vor Beginn der Steigung. In einem mit den realen Untersuchungsstrecken vergleichbaren Abstand der Messquerschnitte wurden in der Simulation ebenfalls entsprechende Messquerschnitte angelegt, an denen die lokalen Geschwindigkeiten der Radfahrer erfasst wurden (vgl. Bild 6-1). Zusätzlich erfolgte die Erfassung der Geschwindigkeiten entlang der gesamten Steigungsstrecke durch die Aufzeichnung und Auswertung des Fahrzeugprotokolls der Simulation. Die mittleren Geschwindigkeiten auf allen Abschnitten wurden entsprechend der Auswertungen der empirischen Daten ermittelt.

Die Modellierung von Steigungen in PTV Vissim kann auf verschiedene Arten erfolgen. Die intuitivste Möglichkeit ist, die Steigung als Parameter der Strecke selbst einzustellen. Dies bewirkt eine Reduktion der Maximalbeschleunigung in Abhängigkeit von der Längsneigung um den wirkenden Anteil der Erdbeschleunigung. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, für den entsprechenden Streckenabschnitt eine eigene Beschleunigungsverteilung zu definieren. Durch die Anlage eines Fahrverhaltensmodells für Steigungen und die Einstellung des entsprechenden Streckenverhaltenstyps kann diese Verteilung verwendet werden. Ebenso kann mit einem Langsamfahrbereich oder einer Wunschgeschwindigkeitsentscheidung direkt die gefahrene Geschwindigkeit in der Steigung beeinflusst werden. Die beiden letztgenannten Möglichkeiten können allerdings die große Streuung der Geschwindigkeiten im Radverkehr nicht korrekt abbilden und müssten für verschiedene Steigungen neu kalibriert werden. Es wäre also nicht möglich, allgemeingültige Einstellungen zu definieren. Die Anpassung der Beschleunigungen über die Streckensteigung ist daher die Vorzugslösung und wurde im Rahmen der Kalibrierung angewandt.

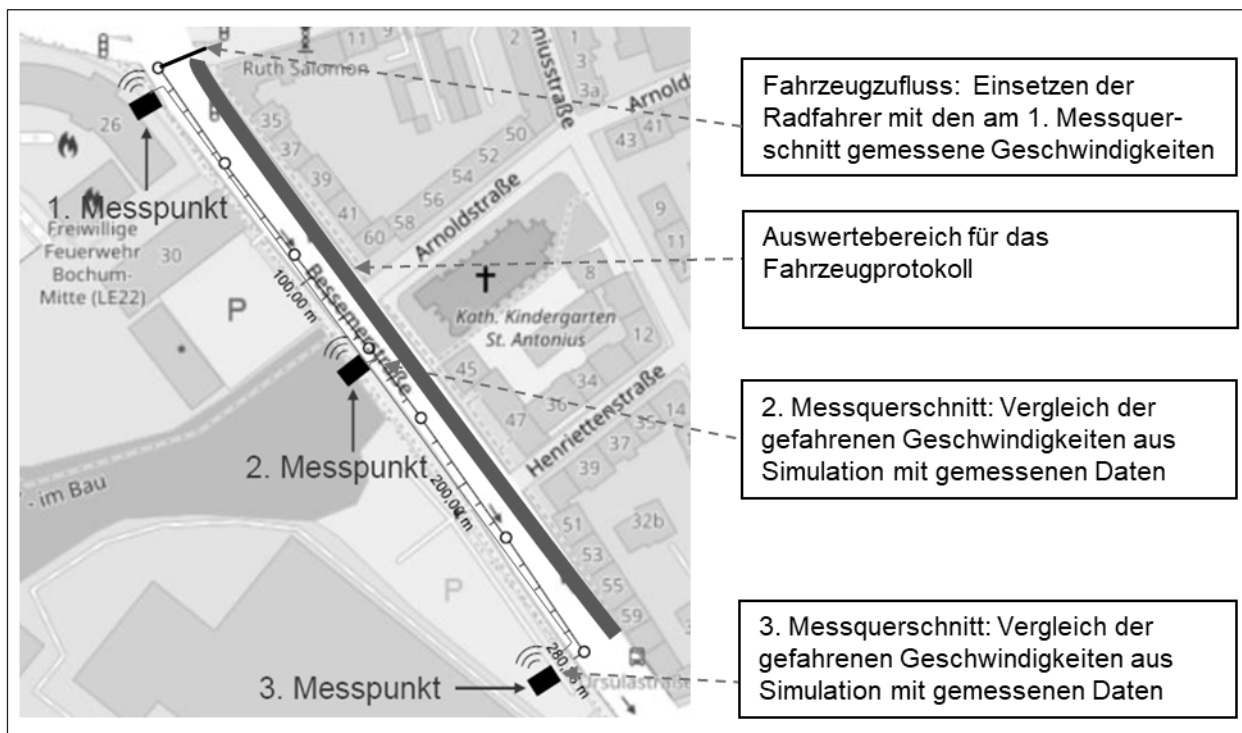


Bild 6-1: Prinzipskizze des Modellaufbaus für Steigungsstrecken (Karte: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

Netzabschnitte

Die Simulation von Netzabschnitten erfolgte mit dem Ziel, die anhand der Einzelanlagen und Steigungsstrecken definierten Parameter auch auf einen Netzabschnitt anzuwenden und zu validieren. Die integrierte Bewertung inklusive der Knotenpunkte ermöglicht Schlussfolgerungen hinsichtlich der Anwendung der Simulation zur Bewertung von Netzabschnitten. Die untersuchten Netzabschnitte umfassen verschiedene Radverkehrsanlagen und verlaufen dabei auch über Knotenpunkte hinweg. Die Signalprogramme wurden für die Untersuchung von den zuständigen Behörden zur Verfügung gestellt. Eine gesonderte Betrachtung des Verhaltens an Knotenpunkten wurde nicht vorgenommen, da Kapazitätsbeschränkungen an Knotenpunkten nicht Gegenstand der Untersuchung waren. Signalisierte Knotenpunkte wurden in den Netzabschnitten als störende Elemente abgebildet, die Einfluss auf die Fahrtzeiten haben. Dafür wurden die für den Radverkehr entlang der Strecke relevanten Schaltungen als Festzeitprogramm im Simulationsmodell implementiert. Nicht detailliert abgebildet wurden die jeweiligen Radverkehrsführungen an den Knotenpunkten, da der Einfluss der Führungsform am Knotenpunkt nicht Gegenstand der Untersuchung war. Ebenfalls nicht simuliert wurden Kfz- und Fußgängerverkehrsströme, die in der Praxis besonders an Knotenpunkten einen Einfluss auf die Verkehrsqualität des Radverkehrs haben können. Für das Verhalten auf der Strecke wurden die hier im Projekt erarbeiteten Parameter verwendet. An Knotenpunkten und deren Zulauf wurden die Ergebnisse des Projekts „Verkehrsaufbau an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen“ (BUSCH et al., 2019) zur Einstellung der Fahrverhaltensparameter verwendet.

6.2.2 Kalibrierung

Grundlage für die Kalibrierung, die nach den Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation der FGSV (2006a) erfolgte, bildeten die einzelnen Modelle der realen Untersuchungsstrecken und die empirisch ermittelten Kennwerte. Da viele Einflussfaktoren auf den realen Verkehrsablauf in der Simulation nicht gezielt abgebildet werden sollten, konnten keine Kenngrößen zur Bewertung der Güte der Kalibrierung bestimmt werden. So wurde in der Realität regelmäßig beobachtet, dass Radfahrer zum Überholen und Ausweichen die angrenzende Infrastruktur mitnutzen. Dieser Effekt wäre in der Simulation abbildbar, entspricht aber nicht der Annahme eines regelkonformen Verhaltens im HBS (FGSV, 2015a). Die exakte Ka-

librierung für eine solche Situation war aufgrund der vorliegenden Daten weder umsetzbar noch zielführend. Zur Kalibrierung wurden, soweit möglich, Parameterwerte direkt anhand der empirischen Daten bestimmt und mithilfe der Kenngrößenverteilungen qualitativ validiert.

Zur Auswahl eines Startparametersatzes wurden zum einen die Fahrverhaltensparameter, welche in PTV Vissim als Standardwerte für den Radverkehr hinterlegt sind („Radweg (freies Überholen)“), und zum anderen die Fahrverhaltensparameter „Cykelsti“ nach COWI (2013) verwendet (vgl. Anhang C). Letztere weisen defensivere Einstellungen hinsichtlich des Überholens auf.

Der erste Vergleich des Fahrverhaltens für einen Einrichtungs- und einen Zweirichtungsradweg zeigt für das Parameterset „Cykelsti“ eine bessere Übereinstimmung der Kenngrößen (Zeitlückenverteilung, Geschwindigkeitsverteilung und Anzahl der Überholungen) als der Parametersatz „Radweg (freies Überholen)“. In Bild 6-2 ist gut zu erkennen, dass die Verteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten in der Simulation mit den „Radweg“-Parametern in PTV Vissim zu einer Überschätzung der Anteile hoher Geschwindigkeiten führt. Abweichungen von den gemessenen Geschwindigkeiten sind denkbar, wenn entweder die Messung am ersten Querschnitt nicht der eigentlichen Wunschgeschwindigkeit entsprochen hat oder das Überholverhalten und damit die räumliche Verteilung der Radfahrer auf der Strecke in der Simulation von den realen Überholvorgängen abweicht. Dass in der Simulation jeweils die gleichen Startgeschwindigkeiten verwendet werden, aber die Abweichung nur bei dem Radweg-Parametersatz auftritt, spricht dafür, dass in der Simulation eine zu geringe Beeinflussung durch Überholmanöver stattfindet. Die Simulation mit „Cykelsti“-Parametern zeigt hinsichtlich der Geschwindigkeitsverteilung eine bessere Übereinstimmung mit den empirischen Ergebnissen (vgl. Bild 6-2). In Bild 6-3 ist die Verteilung der Zeitlücken am zweiten Messquerschnitt dargestellt. Beide Zeitlückenmessungen aus der Simulation zeigen eine leichte Unterschätzung der Anteile der Zeitlücken zwischen 1 und 8 s. Allerdings können auch die fehlenden Geschwindigkeitsdaten der auf gleicher Höhe erfassten Radfahrer aus der Seitenradarmessung für Abweichungen zwischen Empirie und Simulation ursächlich sein. Dieser erste Vergleich lässt vermuten, dass mit dem Fahrverhaltensparametersatz „Radweg“ weniger Pulks aufgrund eines geringeren Ausmaßes der Behinderungen beim Überholen entstehen. Die Auswertung des Modells der Erhardtstraße in München ergab auf einem 100 m langen Abschnitt 56 Überholungen in der Simulation nach „Cykelsti“ und 211 Überholungen mit „Radweg“-Parametern, wohingegen 104 Überholungen in den Videoauswertungen ermittelt wurden. Die Auswertung anhand der Erhardtstraße weist also auf eine Überschätzung der durchführbaren Überholungen durch die „Radweg“-Parameter und eine leichte Unterschätzung durch die „Cykelsti“-Parameter hin.

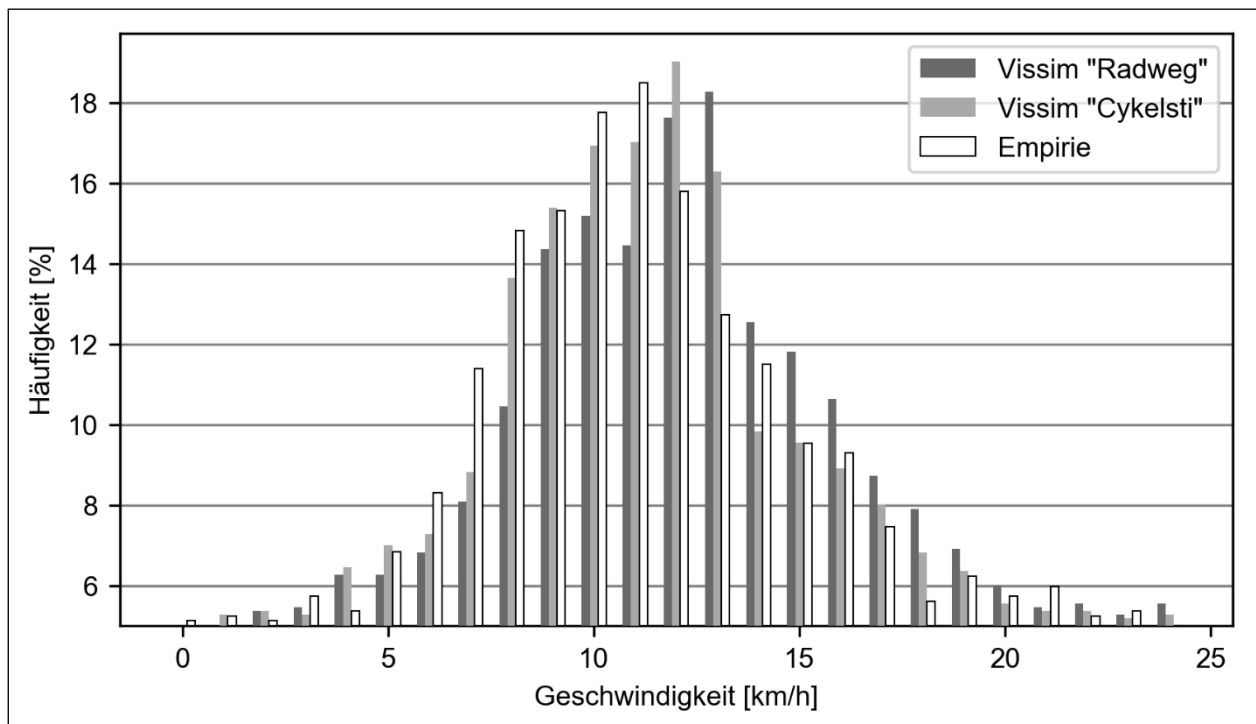


Bild 6-2: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung aus der Simulation mit den empirischen Daten am zweiten Messpunkt am Beispiel der Erhardtstraße in München

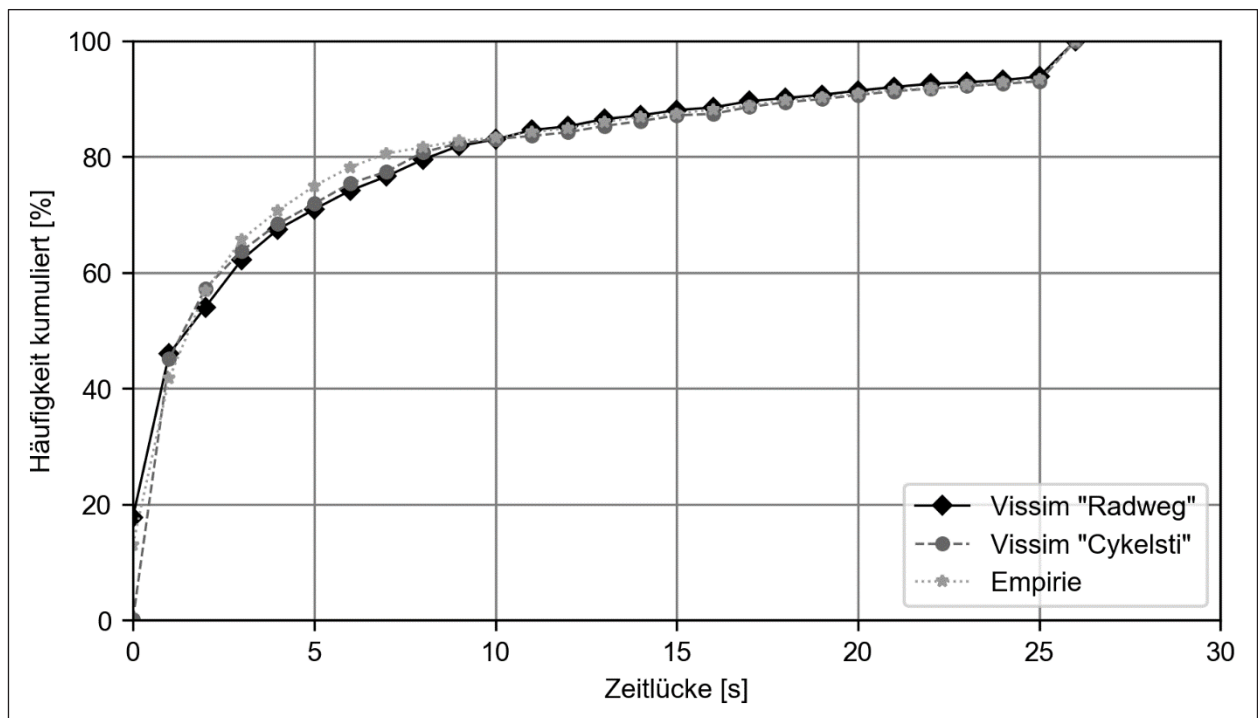


Bild 6-3: Vergleich der Zeitlückenverteilung aus der Simulation mit den empirischen Daten am zweiten Messpunkt am Beispiel der Erhardtstraße in München

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden die Parametereinstellungen „Cykelsti“ (COWI, 2013) als Startwerte für die Kalibrierung verwendet. Um die Wirkungszusammenhänge zwischen Parametereinstellungen und Überholungen quantifizieren zu können, wurde zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Mit der Sensitivitätsanalyse wurden Parameter, die nicht anhand von Messungen direkt eingestellt werden konnten, untersucht. Daher wurden Parameter des Fahrzeugfolgeverhaltens, die das Überholen potenziell beeinflussen können, sowie Parameter, die das Überholen im Gegenverkehr bestimmen, mithilfe einer Laborstrecke analysiert. Die Basisparameter wurden entsprechend des Fahrverhaltensparametersatzes „Cykelsti“ gewählt. Mithilfe eines entwickelten Skripts wurde aus den Simulationsergebnissen die Anzahl der Überholungen pro Rad und km berechnet. Darüber hinaus wurde mit Hilfe der Funktion *Reisezeitmessung* in PTV Vissim die Verlustzeit pro Radfahrer über die Laborstrecke ermittelt.

Bezüglich des Fahrzeugfolgeverhaltens wurden solche Parameter als relevant betrachtet, die den Annäherungsvorgang beeinflussen. Daher wurden die Parameter *CC0*, *CC1* und *CC3* des Wiedemann-Modells untersucht. *CC0* bezeichnet dabei den Stillstandsabstand, *CC1* den zeitlichen Folgeabstand in Sekunden und *CC3* beeinflusst das Annäherungsverhalten eines schnelleren an einen langsameren Radfahrer. Die Sensitivitätsanalyse ergab, dass lediglich der Parameter *CC1* einen relevanten Einfluss auf die Anzahl der Überholungen hat, die Beeinflussung aber insgesamt gering ist. Bei der Messung wurden die Folgeabstände sekundenfein erhoben und es erfolgte keine Differenzierung der Zeitlücken nach Querposition, so dass die Parametereinstellung nicht empirisch überprüft werden konnte. Da ein hoher Anteil von Zeitlücken zwischen 0 und 1 s (vgl. Bild 6-3) gemessen wurde, wurde angenommen, dass der Parameterwert von im Mittel 0,5 s plausibel ist.

Darüber hinaus erfolgte eine Anpassung der Parameter *Überholgeschwindigkeitsfaktor*, *Angenommene Geschwindigkeit des Gegenverkehrs* und *Vorausschauweite* zur Einstellung des Überholverhaltens im Gegenverkehr. Da der Standardwert von 1,3 für den Überholgeschwindigkeitsfaktor im Radverkehr unrealistisch ist, wurde dieser auf 1,1 reduziert. Dies entspricht einer Erhöhung der Geschwindigkeit um maximal 2,5 km/h während des Überholens, wenn die Fahrgeschwindigkeit 25 km/h beträgt. Die Sichtweite hängt in erster Linie von der Beschaffenheit der Strecke ab. Da Zweirichtungsradwege häufig bei Radschnellwegen Anwendung finden und hochbelastete Radverkehrsanlagen oft eine gestreckte Linienführung und gute Sichtverhältnisse aufweisen, wurde eine Sichtweite von 400 m angenommen. Die angenommene Geschwindigkeit des Gegenverkehrs wurde auf Basis des Medians der empirischen Messungen auf 20 km/h festgelegt. Um zu verifizieren, dass diese Einstellungen nicht zu unrealistischem Überholverhalten führen,

wurden alle drei Parameter im Rahmen der Sensitivitätsanalyse überprüft (siehe Anhang E). Die vorgenommenen Anpassungen wurden grundsätzlich durch die Sensitivitätsanalyse bestätigt. Bei einer weiteren Erhöhung der Vorausschauweite über 400 m hinaus bleibt die Häufigkeit der Überholungen konstant. Eine Veränderung der angenommenen Geschwindigkeit des Gegenverkehrs bewirkt nur bei starken Abweichungen vom Mittelwert der gefahrenen Geschwindigkeiten eine Änderung des Überholverhaltens. Eine Zunahme der Überholungen könnte mit einer Erhöhung des Überholgeschwindigkeitsfaktors erreicht werden, dies würde allerdings zu unplausibel hohen Zunahmen der gefahrenen Geschwindigkeiten führen.

Die vorgenommenen Modelleinstellungen und die Beurteilung der Modellierungsgüte werden im Folgenden detailliert betrachtet.

Einzelanlagen

Zur Kalibrierung des Überholverhaltens wurde zunächst das seitliche Abstandsverhalten beim Überholen im eigenen Fahrstreifen über den Parameter *Mindestseitenabstand* angepasst. Eine Kalibrierung durch den Vergleich von gemessenen und simulierten Überholabständen auf einzelnen Anlagentypen wäre wünschenswert gewesen, war aber aufgrund der Tatsache, dass ein bedeutender Anteil der Überholungen auch auf angrenzenden Anlagen durchgeführt wurde, nicht zielführend. In der Realität gibt es – im Gegensatz zur Simulation – oft keine feste seitliche Begrenzung. Zwar sind vier der untersuchten Zweirichtungsradwege baulich abgegrenzt, allerdings weisen diese nur niedrige Belastungsverhältnisse (z. B. Mülheim) oder ein sehr großes Breitenangebot (Münster) auf. Als Anhaltspunkt zur Definition eines Mindestabstands wurden sowohl die Verteilungen der Überholabstände (vgl. Bild 4-14 und Bild 4-15) als auch die mittleren gemessenen Radabstände in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt (vgl. Bild 4-16 und Bild 4-18) herangezogen. Die empirischen Daten lassen erkennen, dass die Radfahrer die gesamte Breite der Radverkehrsanlagen ausnutzen, also die beobachteten Seitenabstände bei großen Breiten ebenfalls größer sind. Das Ziel bei der Kalibrierung der Simulation ist es, den minimalen Seitenabstand abzubilden, der von einer Mehrheit der Radfahrer zum Überholen akzeptiert wird.

Das 0,1-Perzentil der Radabstände im Einrichtungsradsverkehr beträgt 0,80 m, der Median liegt zwischen 1,00 und 1,10 m. Auf der schmalsten Anlage liegt auch der mittlere seitliche Abstand beim Überholen bei 0,80 m, während dieser Wert für Radwege mit Standardbreite ebenfalls 1,00 m beträgt. Dies legt nahe, dass auch bei hohen Verkehrsdichten ein seitlicher Radabstand von 0,80 m nur von wenigen Radfahrern unterschritten wird und nach Möglichkeit ein größerer Abstand eingehalten wird. Das Modell bildet diese Abhängigkeit vom verfügbaren Platz nicht ab, weshalb ein Abstand von 0,80 m angesetzt wurde. Da im Modell der Nettoabstand eingestellt wird, muss von diesem Wert die Fahrradbreite abgezogen werden. Die exakten Fahrzeugbreiten der beobachteten Fahrräder sind zwar nicht bekannt, im Mittel entspricht die im Vissim-3-D-Modell verwendete Breite von 0,63 m aber den am Markt angebotenen Fahrrädern. Auf den gefahrenen Abstand wird im Modell zusätzlich eine normalverteilte Zufallsvariable $N(1, 0,15)$ addiert. Daher wurden 4 cm auf den Überholabstand addiert, um zu gewährleisten, dass in 90 % der simulierten Überholvorgänge ein Netto-Abstand von 0,17 m (brutto 0,80 m) nicht unterschritten wird. Für den in der Simulation einzustellenden Mindestabstand wurden somit 0,21 m angenommen. Daraus resultiert ein minimaler Platzbedarf zum Überholen von etwa 1,43 m.

Das in PTV Vissim hinterlegte Modell kann einen linearen Zuwachs des Abstands mit zunehmender Geschwindigkeit berücksichtigen. In den empirischen Daten ist allerdings kein Zusammenhang zwischen den gefahrenen Geschwindigkeiten und den Überholabständen feststellbar (siehe Kapitel 4.3.2). Die Einstellung für den Parameter *Mindestseitenabstand* beträgt daher 0,21 m sowohl im Stand als auch bei 50 km/h für Einrichtungsradsverkehr. Weitere Parameter, die das Überholen im eigenen Fahrstreifen bestimmen, sind der *Kollisionszeitgewinn*, die *minimale Längsgeschwindigkeit* und die *Zeit zwischen Richtungswechseln*. Da gewährleistet sein muss, dass auch langsame Radfahrer Querbewegungen durchführen können, wurde die *minimale Längsgeschwindigkeit* auf 5 km/h gesetzt. Die Zeit zwischen Richtungswechseln wurde auf 8 s erhöht.

Das resultierende Überholverhalten wurde anhand der Modelle der Einzelanlagen validiert. Dazu wurden neben den Überholungen aus der Simulation und der Empirie auch die theoretischen Überholungen betrachtet. Die theoretischen Überholungen wurden auf Basis der gemessenen Geschwindigkeiten berechnet. Sie stellen die Überholungen dar, die ohne jedwede Interaktion auf der gesamten Länge der untersuchten Strecke bei gleichbleibenden Geschwindigkeiten theoretisch auftreten würden. Insgesamt zeigte

sich, dass die gewählte Einstellung das sehr defensive Überholverhalten durch den „Cykelsti“-Parametersatz korrigiert. Der Vergleich der beobachteten Überholungen mit den theoretischen Überholungen und den in der Simulation gemessenen Überholungen zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung (vgl. Anhang D). Die stark abweichenden Werte auf der Oberbaumbrücke können dadurch erklärt werden, dass sich kurz nach der Messstelle ein signalisierter Knotenpunkt befindet, der im Modell nicht nachgebildet wurde. In der Realität finden daher weniger Überholungen statt.

Im Zweirichtungsradverkehr ergeben sich durch die Streckengeometrie unterschiedliche Möglichkeiten zur Kalibrierung des Überholverhaltens. Dafür ist auch die implizite Spurbreite (Fahrzeugbreite + Überholabstand) entscheidend. Für schmale Zweirichtungsradwege, wie „An der Alster“ in Hamburg, ist daher nur die Modellierung durch Überholen im Gegenverkehr möglich. Dies bedeutet, dass pro Richtung zwei Fahrstreifen von 1,25 m Breite angelegt werden, wovon einer ein Überholfahrstreifen ist und den entgegenkommenen normalen Fahrstreifen jeweils vollständig überlappt. Dadurch können die Fahrräder die gesamte Breite des Radwegs nutzen, wenn kein Gegenverkehr vorhanden ist. An Radwegen mit mehr als 4,00 m Gesamtbreite kann auch innerhalb von zwei getrennten Fahrstreifen überholt werden. Bei moderaten Verkehrsstärken kann daher entweder die Strecke ohne Überholen im Gegenverkehr oder mit Überholen im Gegenverkehr über die gesamte Breite modelliert werden. Auf breiteren Radwegen kann auch Überholen im Gegenverkehr auf nur einem Teil der Strecke in der Mitte implementiert werden, äquivalent zu einem Überholfahrstreifen im Kfz-Verkehr, der in beide Richtungen verwendet werden kann (siehe Bild 6-4). In Abhängigkeit von den vorherrschenden Verkehrsstärken kann es auf die Kapazität der Strecken einen großen Einfluss haben, welche dieser Modellierungsarten verwendet wird. Je höher und je asymmetrischer die Verkehrsnachfrage ist, umso wichtiger ist die Überholmöglichkeit auf der gesamten Fläche. Um verschiedene Möglichkeiten für die Modellierung zu evaluieren, wurden die Strecken unterschiedlich modelliert. Während die Untersuchungsstrecken in Göttingen und Münster als getrennte, nebeneinanderliegende Einrichtungsradwege modelliert wurden, wurden die Untersuchungsstrecken in Hamburg, München, Mülheim und Wuppertal mit Überholen im Gegenverkehr simuliert.

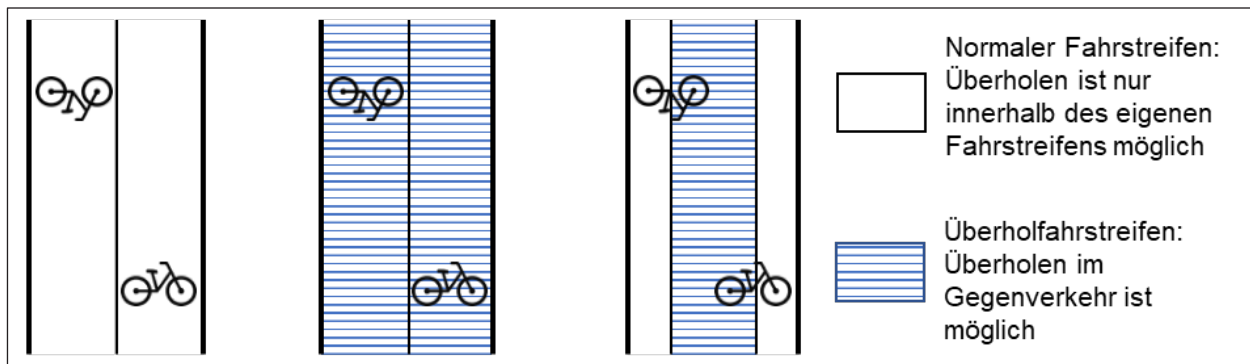


Bild 6-4: Modellierungsmöglichkeiten von Zweirichtungsradwegen mithilfe von Überholen ausschließlich innerhalb des eigenen Fahrstreifens, Überholen im Gegenverkehr auf der ganzen Breite und Überholen im Gegenverkehr auf einer Teilfläche der Radverkehrsanlage

Beim Vergleich mit den empirischen Daten zeigten sich teilweise deutliche Abweichungen in der Anzahl der Überholungen. Auf dem Zweirichtungsradweg „An der Alster“ in Hamburg finden keine Überholungen statt, da die Verkehrsstärken in beiden Fahrtrichtungen ähnlich hoch sind. Daher herrscht auch in der schwächer belasteten Richtung zu viel Gegenverkehr, der in der Simulation dazu führt, dass keine Überholungen durchgeführt werden können. Dies wird durch den hohen Anteil von Überholvorgängen außerhalb der Anlage in den empirischen Daten bestätigt (55,8 %). Da die Erhardtstraße in München mit 7,9 % einen sehr geringen Anteil von Überholungen außerhalb der Anlage aufweist, eignete sich diese Anlage gut für die Kalibrierung. Hier wurden in der Simulation 85 Überholungen beobachtet, während in der Realität 109 Überholungen gemessen wurden. Aufgrund der Messungenauigkeiten und der Tatsache, dass es sich nur um Messwerte einer Anlage handelt, war eine exakte Kalibrierung zur Nachbildung der gemessenen Anzahl der Überholungen nicht sinnvoll. Es ist aber vorstellbar, dass die tatsächlichen Überholungen auf Zweirichtungsradwegen mit häufigen Überholvorgängen im Gegenverkehr tendenziell durch die Simulation unterschätzt werden.

Steigungsstrecken

Die Kalibrierung der Simulationsmodelle der Steigungsstrecken erfolgte über die Anpassung der Beschleunigungsfunktionen. Als Startwerte standen die Beschleunigungsfunktionen des vorimplementierten Fahrzeugtyps „Zweirad“ und des im Rahmen der COWI-Studie erarbeiteten Fahrzeugtyps „Cyclist“ (COWI 2013) zur Verfügung.

Die Boxplots in Bild 6-5 zeigen den Median und die Quartile der gefahrenen Geschwindigkeiten an den beiden Messquerschnitten für das Beispiel der Bessemerstraße in Bochum mit 3,6 % Steigung. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der „Cyclist“-Beschleunigungsverteilung die Geschwindigkeiten am zweiten Messquerschnitt im Mittel unterschätzt werden. Mit den „Zweirad“-Standardeinstellungen wird die Steigung gar nicht wirksam, da die Maximalbeschleunigungen, die denen für Kfz entsprechen, zu hoch sind. Am dritten Messquerschnitt bildet das „Cyclist“-Verhalten zwar die mittleren Geschwindigkeiten gut ab, die Spannweite ist aber deutlich geringer als in den empirischen Daten. Zwei grundsätzliche Probleme werden hier deutlich: Erstens werden in der Simulation Steigungen direkt wirksam, während in den empirischen Daten die Verzögerung erst nach einigen Metern Steigungsstrecke eintritt, beispielsweise weil vor der Steigung nochmal „Schwung geholt“ wird oder zu Beginn der Steigung für einen begrenzten Zeitraum mehr Kraft aufgewendet werden kann. Dieser Effekt wird in dem in PTV Vissim implementierten Modell zur Abbildung von Steigungen nicht berücksichtigt. Für die Bewertung des Verkehrsablaufs hat diese Abweichung aber einen geringen Einfluss. Zweitens erfolgt die Reduzierung der gefahrenen Geschwindigkeiten für alle Fahrzeuge auf ein Beharrungsgeschwindigkeitsintervall. Dieses ergibt sich bei der Geschwindigkeit, bei der die Maximalbeschleunigung gleich der Beschleunigungsreduktion durch die Steigung ist. Die Lage der Maximalbeschleunigung für ein Fahrzeug innerhalb der Verteilung ergibt sich durch eine Zufallszahl. Da diese Zufallszahl nicht mit der Zufallszahl für die Zuweisung der Wunschgeschwindigkeit gekoppelt ist, bremsen schnelle Fahrräder mit der gleichen Wahrscheinlichkeit wie langsame Fahrräder auf eine niedrige Beharrungsgeschwindigkeit ab. Es ist allerdings anzunehmen, dass in der Realität schnelle Radfahrer eher ein höheres Kraft- und Beschleunigungsvermögen aufweisen. Das ist für die Bewertung der Verkehrsqualität problematisch, da von der Breite der Geschwindigkeitsverteilung maßgeblich der Überholbedarf und damit der Störeinfluss abhängt. Diesem Problem kann begegnet werden, indem unterschiedliche Fahrzeugklassen für unterschiedlich schnelle Radfahrer gebildet werden. Dieses Vorgehen ist in der Kalibrierung allerdings sehr aufwendig.

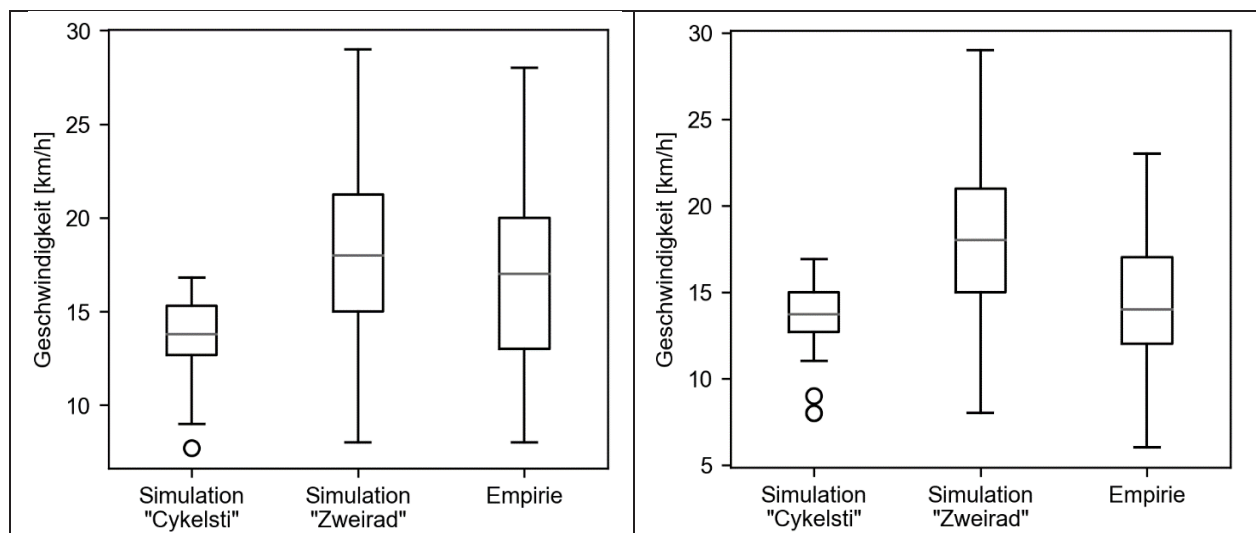


Bild 6-5: Vergleich der gemessenen Geschwindigkeiten am zweiten (links) und dritten (rechts) Messpunkt in der Bessemerstraße in Bochum mit Simulationsergebnissen

Anhand der drei implementierten Modelle der Bessemerstraße in Bochum, der Lerchenstraße in Essen und der Universitätsstraße in Bochum wurden die Kalibrierungsmöglichkeiten im Rahmen des bestehenden Modells ausführlich untersucht (siehe Anhang F). Dabei zeigten sich zum einen die hohe Komplexität der Kalibrierung mittels der Beschleunigungsfunktionen und zum anderen die strukturellen Probleme bei der Anpassung der Simulationsergebnisse an die empirischen Daten. Zwar lieferten die durchgeführten Verkehrsmessungen aufgrund der detaillierten Geschwindigkeitsverläufe einen guten Einblick in das Verhalten von Radfahrern an Steigungsstrecken. Es zeigte sich aber, dass dieses Verhalten mit dem vorliegenden

Modell nicht hinreichend abbildbar ist. Um das Modell zu verbessern, wäre wiederum eine breitere Datenbasis notwendig, da die vorliegenden Messdaten auch darauf hinweisen, dass es eine Vielzahl an Einflussgrößen auf die Geschwindigkeiten an Steigungsstrecken gibt. Bei ähnlichen Steigungen zeigten sich verschiedene Geschwindigkeitsniveaus und -verläufe, die mithilfe der erhobenen Daten nicht ausreichend begründet werden können. Solche Einflussfaktoren könnten beispielsweise die Länge der Steigungsstrecke oder die Radverkehrsführung vor oder nach der Steigungsstrecke sein.

Netzabschnitte

Für die Nachbildung des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten wurde das Fahrverhalten auf der Strecke analog zu den Einzelanlagen eingestellt. Die Einstellung des Fahrverhaltens im Bereich von Knotenpunkten und bis 20 m vor der Haltlinie eines Knotenpunkts wurde gemäß den Empfehlungen zur Simulation von Radfahrstreifen in Kreuzungsbereichen von BUSCH et al. (2019) vorgenommen. Eine weitere Kalibrierung der Fahrverhaltensparameter fand anhand der Modelle der Netzabschnitte nicht statt. Die Wunschesgeschwindigkeitsverteilungen wurden anhand der empirischen Daten, differenziert nach den Fahrradtypen Lastenrad, Pedelec und Alltagsrad, ermittelt. Dabei umfasst die Geschwindigkeitsverteilung für Alltagsräder auch die in der Erhebung als Rennrad klassifizierten Fahrräder. Aufgrund der starken Unterschiede des Fahrzeugkollektivs wurde zwischen Radschnellwegen und anderen Radverkehrsanlagen differenziert. Während für die Strecke des Radschnellwegs Ruhr die Daten aus Mülheim und Wuppertal verwendet wurden, wurden für die Strecken in München und Göttingen die Erhebungen aller anderen Radverkehrsanlagen als Datenbasis verwendet. Die entsprechenden Verteilungen befinden sich im Anhang G.

Diskussion

Die Einstellungen des Fahrverhaltensparametersatzes „Cykelsti“ (COWI, 2013) wurden auf Basis von Videoanalysen des Radverkehrs in Kopenhagen entwickelt. Die Grundannahmen wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung überwiegend bestätigt. Die zur Kalibrierung der Untersuchungsstrecken vorgenommenen Analysen zeigten aber, dass eine exakte Kalibrierung des Fahrverhaltens auf der Strecke mit den vorliegenden Messdaten nur begrenzt möglich ist. Verbesserungen in der Modellierung könnten durch eine Kalibrierung der Überholvorgänge anhand von Trajektorien realer Überholungen erreicht werden. Dadurch könnten Details des Überholvorgangs (bspw. der exakte Geschwindigkeitsverlauf für den gesamten Überholvorgang) erhoben und in der Simulation abgebildet werden. Allerdings bestünde trotz einer solchen Kalibrierung noch Unsicherheit darüber, wie sich Überholvorgänge bei höherer Radverkehrsdichte entwickeln. Es ist vorstellbar, dass das Interaktionsverhalten von Radfahrern auch von der Verkehrsdichte abhängig ist. Die heutigen Belastungen an Radverkehrsanlagen in Deutschland lassen aber eine empirische Untersuchung dieser Hypothese nicht zu. Aussagen zur Kapazität sind daher anhand der hier durchgeführten Simulationen nicht möglich. Unter Umständen wäre dazu die direkte Weiterentwicklung des Modells und nicht nur dessen Kalibrierung notwendig. Hier werden sich durch den Ausbau von „Protected Bike Lanes“ und die weiterhin steigende Radnutzung in Städten vermutlich in den nächsten Jahren bessere Untersuchungsmöglichkeiten ergeben. Zur Extrapolation der empirischen Daten auf hohe Verkehrsstärken erweitert die Simulation aber die vorliegenden Erkenntnisse zur Verkehrsqualität.

Im Zweirichtungsradverkehr wäre eine Modellvalidierung der Abbildung des Überholens im Gegenverkehr anhand einer breiteren Datenbasis wünschenswert. Aufgrund der Problematik der Nutzung anderer Verkehrsflächen für den Überholvorgang einerseits und eher geringen Verkehrsstärken auf abgegrenzten Anlagen andererseits konnten die Modellannahmen nur anhand einer geringen Anzahl an Messungen überprüft werden. Weiterhin konnte die Abbildung von Gruppen von Radfahrern in der Simulation im Rahmen dieses Projekts nicht vorgenommen werden. Die Auswirkungen auf den Verkehrsablauf wurden daher in der Extrapolation auf größere Verkehrsstärken nicht berücksichtigt. In Abhängigkeit vom jeweiligen Kollektiv könnte die Gruppenbildung aber einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Verkehrsqualität haben.

Die Kalibrierung des Geschwindigkeitsverhaltens an Steigungen konnte aufgrund der Komplexität der Problemstellung nicht abschließend behandelt werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, um einerseits eine ausreichende empirische Grundlage zu schaffen und andererseits das empirisch beobachtete Verhalten hinreichend in der Simulation abbilden zu können.

6.3 Extrapolation der Untersuchungsergebnisse

6.3.1 Vorgehensweise

Um Wirkungen auf den Verkehrsablauf durch zukünftige Entwicklungen, wie steigende Verkehrsstärken und zunehmende Pedelec- und Lastenrad-Anteile, abbilden zu können, wurden Reihensimulationen einer Modellstrecke mit unterschiedlichen Breiten im Einrichtungs- und Zweirichtungsradverkehr durchgeführt. Zur Beschreibung der Auswirkungen dieser Einflussgrößen auf den Verkehrsablauf wurden verschiedene Kenngrößen zur Quantifizierung der Qualität des Verkehrsablaufs beschrieben und getestet.

Um verschiedene Kennzahlen für die Bewertung des Verkehrsablaufs im Radverkehr aus der Simulation zu betrachten, wurde vor der Durchführung der Reihensimulation eine Auswertung eines 100 m langen und 2,00 m breiten Radwegs mit steigender Radverkehrsnachfrage vorgenommen. Ausgewertet wurden die relativen Verlustzeiten, die fahrstreifenbezogene und flächenbezogene Verkehrsdichte, die mittleren Geschwindigkeiten und die Fahrtzeitanteile, in denen die gefahrene Geschwindigkeit kleiner als die Wunschgeschwindigkeit ist (siehe Bild 6-6). Verlustzeiten, Verkehrsdichten und Geschwindigkeiten wurden mithilfe der Streckenauswertung in PTV Vissim ermittelt. Die Fahrtzeitanteile unter der Wunschgeschwindigkeit wurden mithilfe eines Skripts aus dem Fahrzeugprotokoll ermittelt.

Die unterschiedlichen Kennzahlen haben verschiedene Vor- und Nachteile. Die relative Verlustzeit bezeichnet die zusätzliche Fahrtzeit gegenüber der konstanten Fahrt mit der Wunschgeschwindigkeit durch das gesamte Netz. Diese gibt direkt Auskunft über den aus Behinderungen resultierenden Zeitverlust, der einen wichtigen Aspekt der Verkehrsqualität darstellt. In der mittleren Geschwindigkeit machen sich Fahrtzeitverluste zwar ebenso bemerkbar, wenn auch absolut in geringerem Maße. Da sich die Geschwindigkeiten bei hohen Verkehrsdichten an die Geschwindigkeiten der langsamsten Radfahrer anpassen, eignet sich die mittlere Geschwindigkeit aber nicht für einen Vergleich der Verkehrsqualität von Radfahrerkollektiven mit verschiedenen Wunschgeschwindigkeitsverteilungen und ist damit weniger aussagekräftig. Die Verkehrsdichte (längen- und flächenbezogen) spiegelt das Maß der Beeinflussung zwischen den Radfahrern wider und ist daher ein sinnvolles Bewertungsmaß. Sie lässt sich außerdem gut direkt aus Messdaten ermitteln. Der Vergleich mit den Fahrtzeitanteilen unterhalb der Wunschgeschwindigkeit und der Verlustzeit kann verwendet werden, um das Maß der Beeinflussung bei verschiedenen Dichtewerten zu bestimmen.

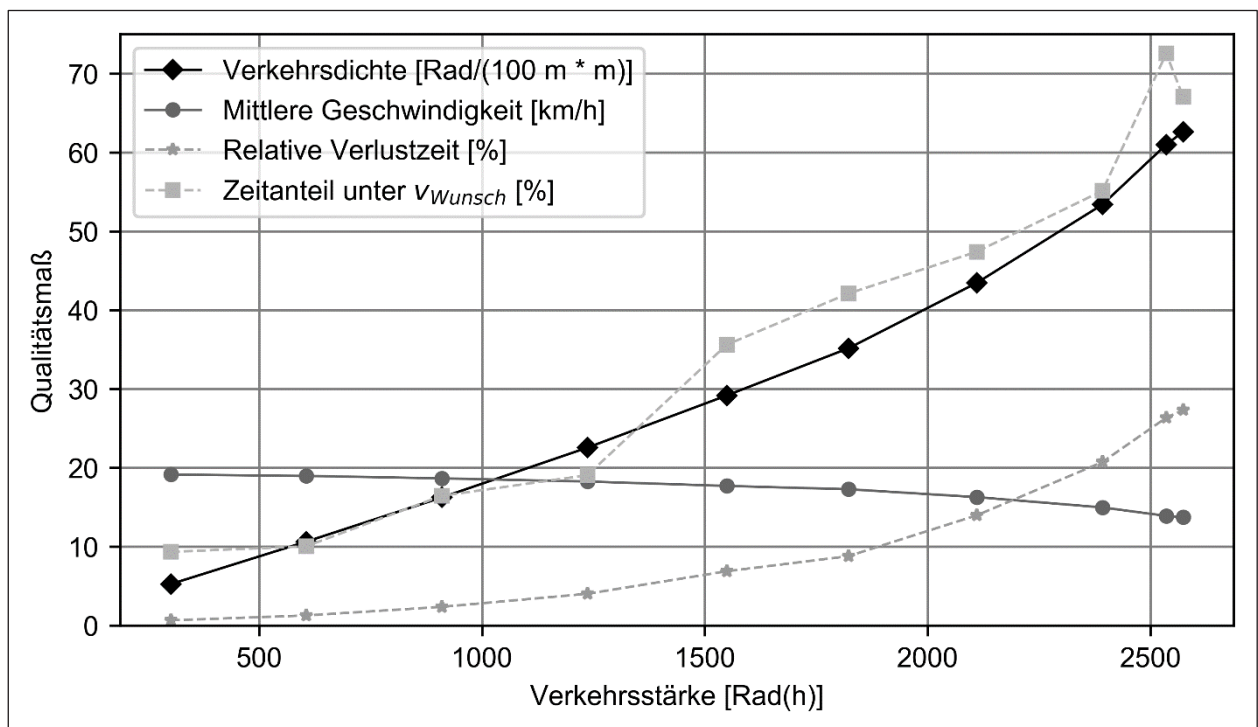


Bild 6-6: Mittels Simulation ermittelte Qualitätsmaße für die Bewertung des Verkehrsablaufs auf der Lindwurmstraße

Für die Reihensimulation wurde jeweils eine etwa 1,5 km bzw. 2 km lange Modellstrecke im Ein- bzw. Zweirichtungsradverkehr angelegt. Die Auswertungen wurden für ein 1000 m langes Teilstück vorgenommen. Der Vor- und Nachlauf beträgt im Einrichtungsradverkehr jeweils 200 m, im Zweirichtungsradverkehr 400 m. Die Fahrzeugzuflüsse wurden in 15-Minuten-Intervallen in Schritten von 300 Rad/h erhöht.

Die Einstellungen des Fahrverhaltens wurden mit Ausnahme des Mindestseitenabstands entsprechend der Ergebnisse aus Kapitel 6.2 gewählt. Ziel der Reihensimulation war die Bestimmung eines Qualitätsmaßes für den Radverkehr unter der Annahme sozial breit akzeptierter Überholabstände. Dafür wurden nur Radverkehrsanlagen mit einer Breite von mindestens 2,00 m abgebildet. Basierend auf den empirischen Erhebungen wurde der gewählte mittlere Überholabstand auf diesen Anlagen mit 1,00 m (vgl. Kapitel 4.3.1) angesetzt. Der Mindestseitenabstand wurde daher für die Reihensimulationen auf 0,37 m (netto) erhöht, woraus ein mittlerer akzeptierter Überholabstand von 1,00 m (brutto) resultiert. Die Geschwindigkeitsverteilungen wurden anhand der empirisch ermittelten Daten aller Messstrecken ermittelt. Es wurden separate Verteilungen für normale Fahrräder, Lastenräder und Pedelecs bestimmt. Zwar wiesen Rennräder und Alltagsräder in den Verkehrsmessungen unterschiedliche Verläufe der Verteilungen auf, allerdings ist nicht zu erwarten, dass bei der Anwendung in der Praxis anhand der verfügbaren Daten zur Fahrzeugzusammensetzung eine Unterscheidung zwischen Alltagsrädern und Rennrädern vorgenommen werden kann. Die Beschleunigungsfunktionen entsprechen den COWI „Cykelsti“-Einstellungen.

In den Reihensimulationen wurde der Einfluss folgender Faktoren auf den Verkehrsablauf untersucht:

- Breite der Radverkehrsanlage
- Pedelec-Anteil
- Lastenrad-Anteil
- Gegenverkehrsstärke im Zweirichtungsradverkehr

Die Breiten der Radverkehrsanlagen im Einrichtungsradverkehr wie auch die Breiten je Richtung im Zweirichtungsradverkehr wurden jeweils zwischen 2,00 m, 2,50 m, 3,00 m und 3,50 m variiert. Die genannten Breiten wurden für alle anderen Einflussfaktoren untersucht. Pedelec- und Lastenrad-Anteile sowie die Gegenverkehrsstärke wurden hingegen nicht gegeneinander variiert, d. h. die jeweils anderen Einflüsse blieben unberücksichtigt.

Die Pedelec- und Lastenrad-Anteile im Basisfall beruhen auf den empirisch ermittelten Fahrzeugkollektiven. Im Mittel wurde auf allen Untersuchungsstrecken ein Pedelec-Anteil von 6 % und ein Lastenrad-Anteil von 1,6 % gemessen (vgl. Kapitel 4.1.1). Als Grundeinstellungen wurden daher ein Pedelec-Anteil von 5 % und ein Lastenrad-Anteil von 1,5 % gewählt. Für die Abbildung einer zunehmenden Verbreitung von Pedelecs und eines zunehmenden Lastenradverkehrs wurden jeweils die Anteile der Pedelecs und Lastenräder erhöht, während der Anteil des jeweils anderen Fahrzeugtyps mit der Grundeinstellung beibehalten wurde. Die zunehmenden Anteile gehen also zulasten der Anteile der Alltagsräder. Der Pedelec-Anteil wurde zwischen 5 und 50 % und der Lastenrad-Anteil zwischen 1,5 % und 15 % variiert. Auf der Grundlage einer Marktrecherche derzeit angebotener Lastenräder wurden die Lastenräder je zur Hälfte mit einer Breite von 65 bzw. 84 cm simuliert. Zur Ermittlung des Einflusses der Gegenverkehrsstärke auf die Verkehrsqualität im Zweirichtungsverkehr wurde in der Hauptrichtung äquivalent zum Einrichtungsradverkehr ein um 300 Rad/h je 15 min steigender Zufluss simuliert. In der Gegenrichtung wurde über den gesamten Zeitraum eines Simulationslaufs ein stochastischer Zufluss entsprechend der zu testenden Gegenverkehrsstärken zwischen 100 und 1800 Rad/h eingestellt. Tab. 6-1 fasst die eingestellten Parameterwerte zusammen.

Da es nicht möglich war, eine allgemein gültige Kalibrierung für das Geschwindigkeitsverhalten an Steigungsstrecken zu ermitteln, wurden Steigungen in der Reihensimulation nicht berücksichtigt.

Parameter	Untersuchte Ausprägungen der Parameter						
Pedelec-Anteil [% des Fahrzeugzuflusses]	5 %	10 %	15 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Lastenrad-Anteil [% des Fahrzeugzuflusses]	1,5 %	3 %	4 %	5 %	7 %	10 %	15 %
Gegenverkehrsstärke [Rad/h]	100	300	600	900	1200	1500	1800

Tab. 6-1: Variation der Fahrzeugzuflüsse in der Reihensimulation

Für die Simulation und Kalibrierung der Einzelanlagen und Netzabschnitte wurde die zu diesem Zeitpunkt verfügbare Vissim-Version 11 verwendet. Es stellte sich heraus, dass diese Version Einschränkungen bei der Modellierung des Überholens im eigenen Fahrstreifen aufweist, welche fast ausschließlich bei sehr hohen Verkehrsstärken auftreten. Die nachfolgend dokumentierten Reihensimulationen wurden mit der Vissim-Version 2021 durchgeführt, in der die Einschränkungen behoben wurden. Für die bisher beschriebenen Ergebnisse hat die Einschränkung keinen Einfluss, da die simulierten Verkehrsstärken ausreichend gering waren.

6.3.2 Auswertung der Einzelanlagen

Zur Bewertung der Verkehrsqualität wurden die mittlere Geschwindigkeit, die Verkehrsdichte und die relative Verlustzeit im Untersuchungsabschnitt erhoben. Die Kenngrößen wurden mithilfe der Streckenauswertungsfunktion in PTV Vissim ermittelt. Der Anteil der Fahrzeit unter der Wunschgeschwindigkeit wurde bei den Reihensimulationen nicht berechnet, da die Auswertung nicht mithilfe der Streckenauswertung vorgenommen werden kann und die zusätzliche Aussagekraft gering ist. Für einen Vergleich mit dem bisherigen Verfahren des HBS (FGSV, 2015a) wurden zusätzlich die auf einem 100 m langen Teilstück der Untersuchungstrecke durchgeführten Überholungen ausgewertet.

Je Parameterkombination wurden fünf Simulationsläufe durchgeführt und die Mittelwerte aller Kenngrößen gebildet. Die Entwicklung der Kenngrößen wird im Folgenden in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke dargestellt und für verschiedene Simulationsläufe miteinander verglichen. Die Verkehrsstärke auf dem Untersuchungsabschnitt wurde ebenfalls mithilfe von Streckenauswertungen gemessen und entspricht somit der tatsächlichen Verkehrsstärke des Streckenintervalls.

Beim Vergleich der Kenngrößen auf Strecken verschiedener Breite im Einrichtungsradverkehr in Bild 6-7 fällt auf, dass auf der 2,00 m breiten Strecke schon bei heutzutage üblichen Verkehrsstärken im Bereich von 600 Rad/h gegenseitige Behinderungen auftreten. Dies äußert sich in einer leichten Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit und einer Erhöhung der Verlustzeit. Es zeigt sich außerdem, dass erst eine Erhöhung der Breite von 2,00 auf 3,00 m eine deutliche Verbesserung der Verkehrsqualität bewirkt, während bei einer Breite von 2,50 m noch sehr ähnliche Qualitätsmaße gemessen wurden. Der Grund dafür ist, dass bei einer Breite von 3,00 m eine „implizite dritte Spur“ zur Verfügung steht, also das gleichzeitige Überholen von zwei Fahrrädern möglich ist. Wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben ist zwar unklar, ob Radfahrer bei hohen Verkehrsdichten nicht auch kleinere Abstände zum Überholen akzeptieren. Die Ergebnisse decken sich allerdings mit den empirischen Befunden, dass auf der 2,55 m breiten Radverkehrsanlage in Hamburg maximal zwei Radfahrer im Querschnitt, auf der 2,98 m breiten Anlage in München dagegen maximal drei Radfahrer im Querschnitt beobachtet wurden (vgl. Kapitel 4.3.1). Sie stehen auch im Einklang mit den Ergebnissen einer Erhebung in Kopenhagen (GREIBE und BUCH, 2016). Dabei wurden zwar leicht größere Kapazitäten für breite Radverkehrsanlagen bis 2,50 m im Vergleich mit normalbreiten Anlagen ab 1,80 m Breite festgestellt, aber größere Breiten von über 3,00 m für die Realisierung einer dritten impliziten Spur empfohlen.

Bei allen Strecken bis zu einer Breite von 3,00 m konnten die Zuflüsse ab einer bestimmten Verkehrsstärke nicht mehr abgewickelt werden. Die Kapazität wurde also bei allen Strecken bis 3,00 m Breite zumindest in einzelnen Simulationsläufen und Auswertintervallen erreicht, nur auf der 2,00 m breiten Strecke stellte sich wiederholt eine konstante maximale Verkehrsstärke und -dichte von ca. 2.500 Rad/h bzw. 120 Rad/(km*m) ein. Da die Ermittlung und Kalibrierung der Kapazität nicht Gegenstand der Untersuchung waren, ist dieser Zusammenhang nicht direkt auf die Realität übertragbar. Allerdings sollte das bei weiteren Untersuchungen berücksichtigt werden.

Bei der Untersuchung des Pedelec-Anteils zeigte sich ein nur sehr geringer Einfluss auf die Verkehrsqualität (Bild 6-8). Ein höherer Anteil an Pedelecs macht sich am stärksten durch die höheren mittleren Geschwindigkeiten bemerkbar. Dieser Effekt beruht ausschließlich auf den geringfügig höheren Wunschgeschwindigkeiten im Kollektiv der Pedelec-Fahrer. Es ist anzunehmen, dass Pedelecs besonders bei Steigungsstrecken einen größeren Einfluss auf den Verkehrsablauf als in der Ebene haben. Da der Einfluss von Steigungen allerdings nicht untersucht wurde, bleibt diese Fragestellung offen.

Die Erhöhung des Lastenrad-Anteils hat ebenfalls nur eine geringe Beeinträchtigung der Verkehrsqualität zur Folge (Bild 6-9 und Bild 6-10). So beträgt die relative Verlustzeit bei einem Lastenrad-Anteil von 15 % und einer Verkehrsstärke von 600 Rad/h auf dem 2,00 m breiten Radweg 4 %. Bei einem Lastenrad-Anteil

von 1,5 % und sonst gleichen Einstellungen beträgt die relative Verlustzeit 2 %. Der Einfluss verschiedener Lastenrad-Anteile zeigt sich vor allem in Bereichen mit hoher Verkehrsnachfrage auf einer 2,00 m breiten Strecke. Bei größeren Breiten ist der Einfluss durch den Lastenrad-Anteil geringer. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei einer Breite von 2,00 m die höhere Verkehrsdichte und damit die Interaktionen zwischen den Radfahrern das Geschwindigkeitsverhalten stark beeinflussen. Bei Breiten über 2,50 m ist die gegenseitige Beeinflussung dagegen so gering, dass der Lastenrad-Anteil keinen Einfluss auf die Qualitätsmaße hat. Daher treten Beeinträchtigungen durch hohe Lastenrad-Anteile von 10 % und 15 % vor allem im Bereich ab 900 Rad/h auf der 2,00 m breiten Untersuchungsstrecke auf.

Im Zweirichtungsradverkehr bewirkt das Überholen im Gegenverkehr nur bei einer geringen Breite von 2,00 m in der Hauptrichtung und nur bei sehr geringen Gegenverkehrsstärken eine deutliche Verbesserung der Verkehrsqualität (Bild 6-11). Schon bei einer Gegenverkehrsstärke von 300 Rad/h ist dieser Effekt nur noch marginal. Bei noch größeren Breiten konnte kein Einfluss der Gegenverkehrsstärke auf alle untersuchten Kenngrößen festgestellt werden.

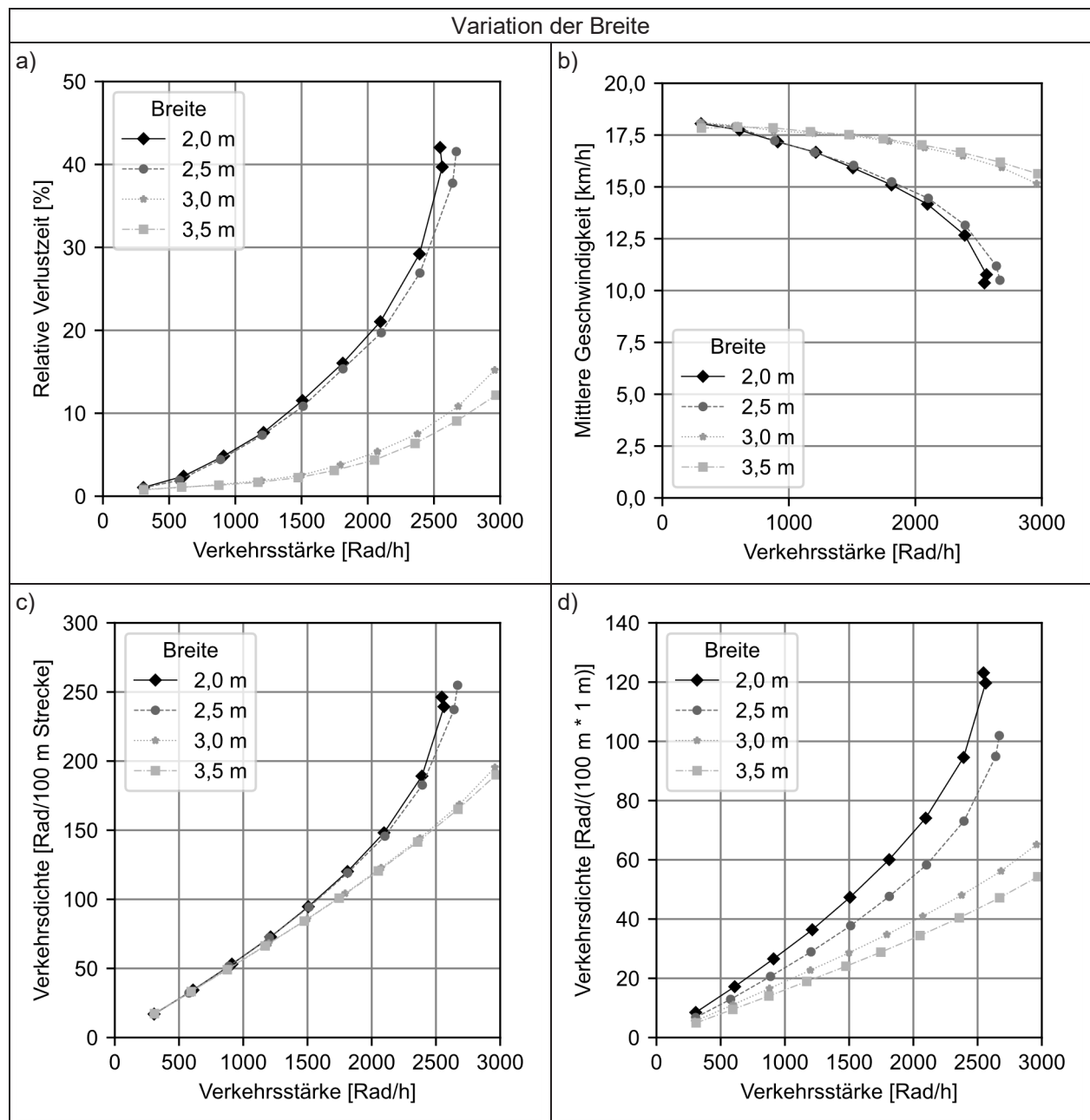


Bild 6-7: a) Relative Verlustzeit, b) mittlere Geschwindigkeit, c) streckenbezogene Verkehrsdichte und d) flächenbezogene Verkehrsdichte in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage im Basisfall im Einrichtungsradsverkehr

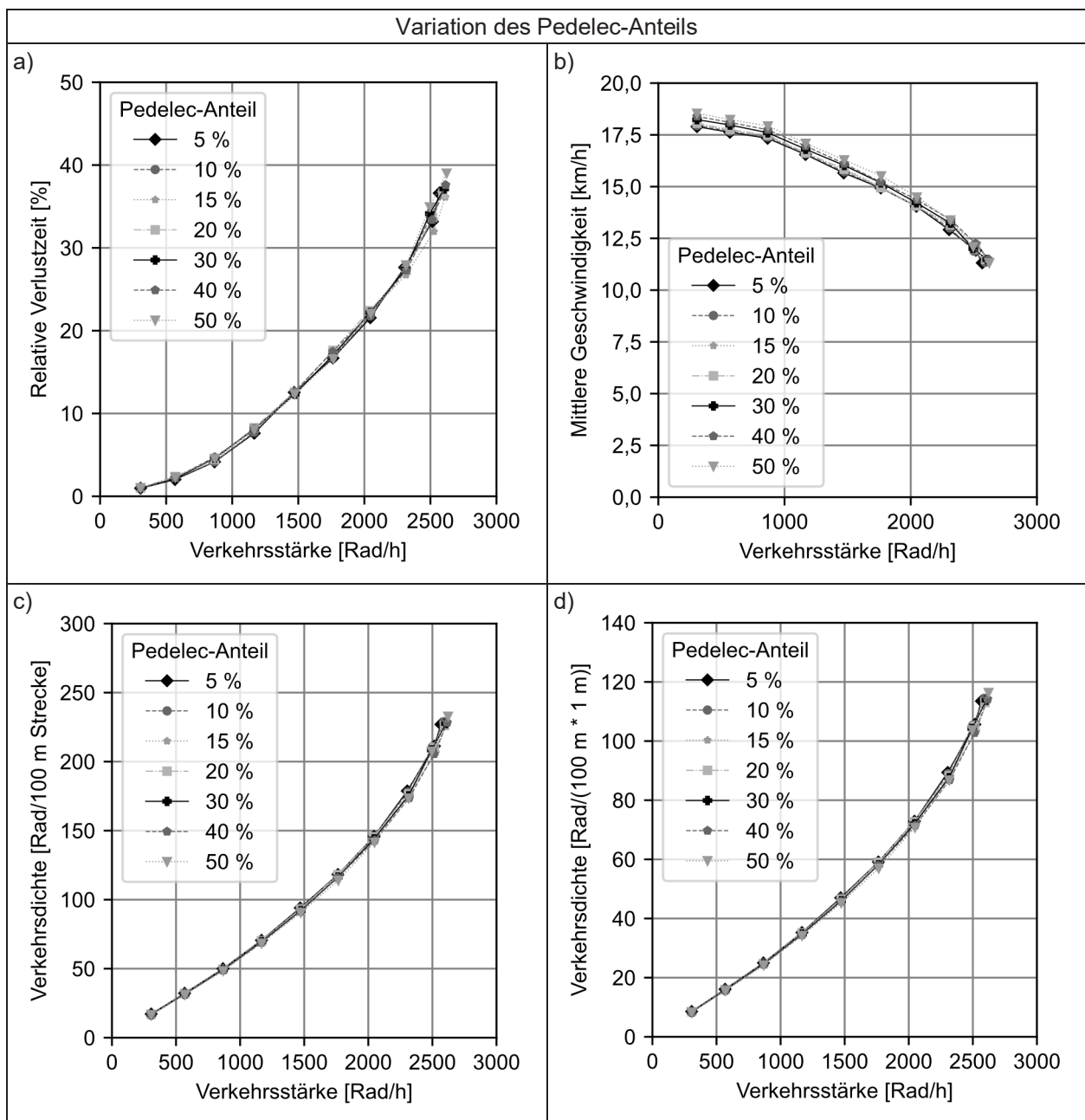


Bild 6-8: a) Verlustzeit, b) mittlere Geschwindigkeit, c) streckenbezogene Verkehrsdichte und d) flächenbezogene Verkehrsdichte in Abhängigkeit vom Pedelec-Anteil auf einer 2,00 m breiten Strecke im Einrichtungsradsverkehr

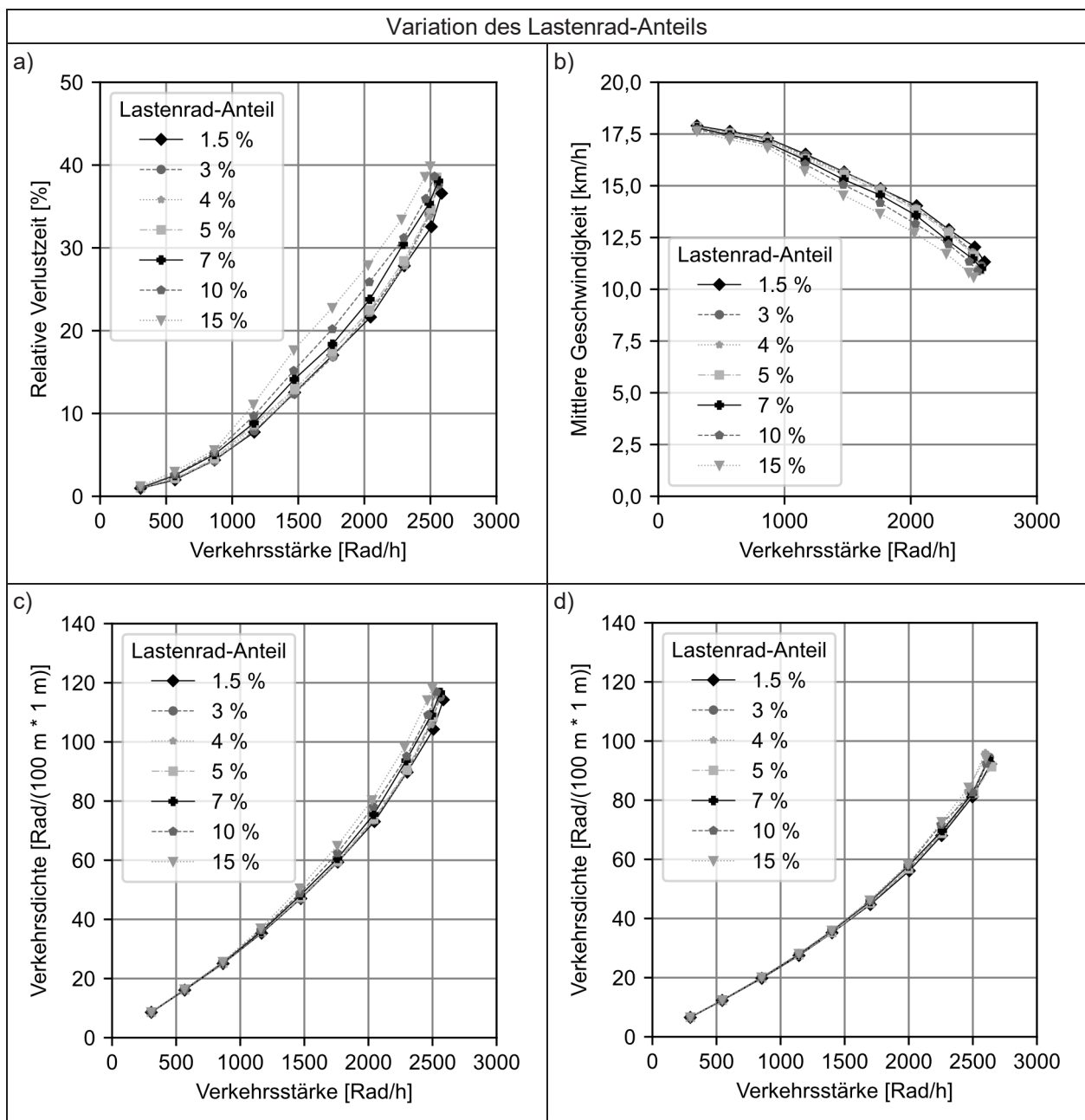


Bild 6-9: a) Verlustzeit, b) mittlere Geschwindigkeit, c) streckenbezogene Verkehrsichte und d) flächenbezogene Verkehrsichte in Abhängigkeit vom Lastenrad-Anteil auf einer 2,00 m breiten Strecke im Einrichtungsradverkehr

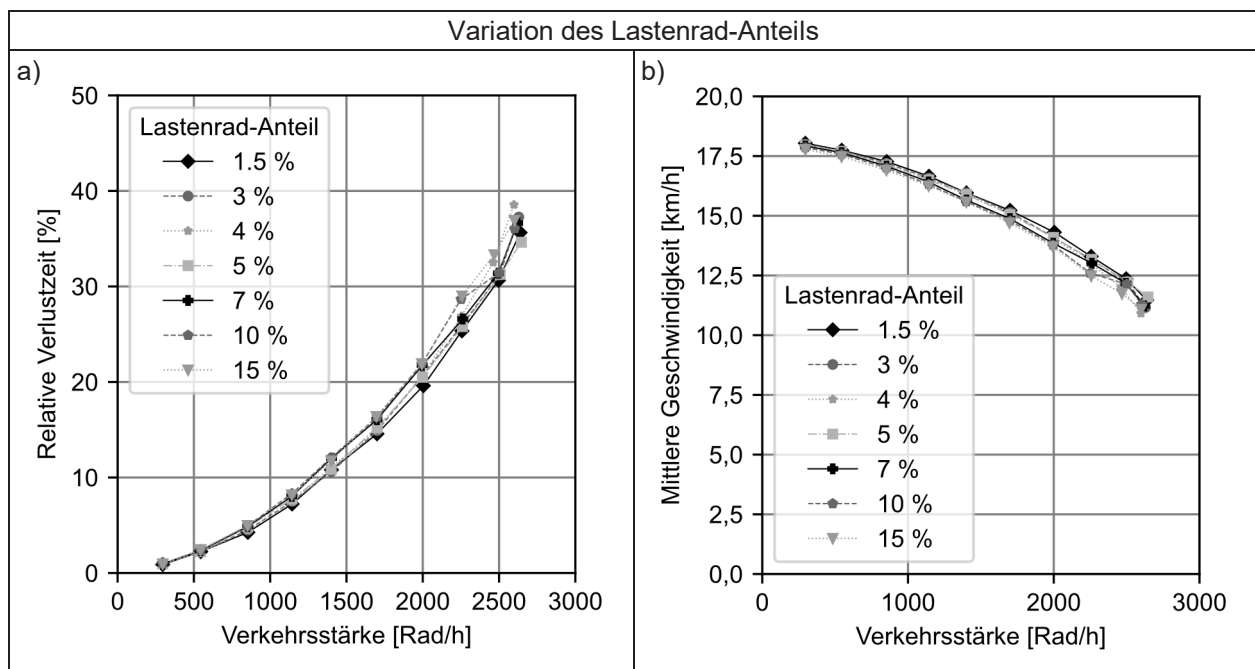


Bild 6-10: a) Verlustzeit und b) mittlere Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Lastenrad-Anteil auf einer 2,50 m breiten Strecke im Einrichtungsradsverkehr

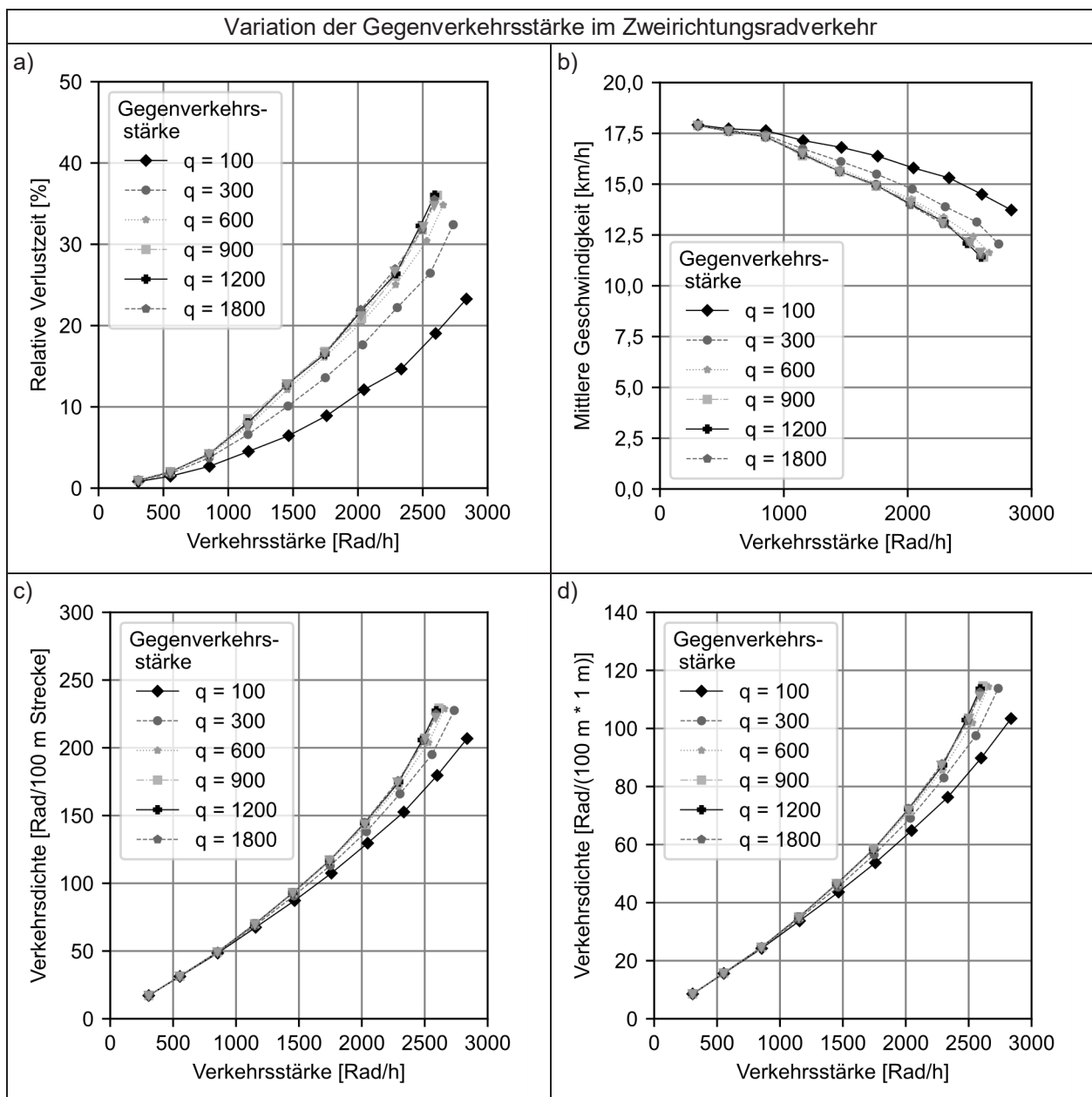


Bild 6-11: a) Verlustzeit, b) mittlere Geschwindigkeit, c) streckenbezogene Verkehrsdichte und d) flächenbezogene Verkehrsdichte in Abhängigkeit von der Gegenverkehrsstärke auf einer 2,00 m breiten Strecke im Einrichtungsradverkehr

6.3.3 Auswertung der Netzabschnitte

Um die Fahrtzeiten entlang von Netzabschnitten bei hohen Verkehrsbelastungen zu ermitteln, wurden analog zu den Einzelanlagen Zuflüsse mit steigenden Verkehrsstärken eingestellt. In der ersten Stunde wurden 300 Rad/h in das Netz eingespeist. Im weiteren Verlauf der Simulation wurde alle 30 Minuten der Zufluss um 300 Rad/h erhöht, bis eine Verkehrsstärke von 2.400 Rad/h erreicht war. Die längeren Intervalle gewährleisteten, dass sich die Radfahrer im Netz verteilen, bis die Verkehrsstärke erneut erhöht wird. Dabei wurde die Option *stochastischer Zufluss* verwendet. Die ersten 15 Minuten jedes Zeitintervalls wurden nicht ausgewertet. Mithilfe der Funktion *Reisezeitmessung* wurden Fahrt- und Verlustzeiten über den gesamten Streckenverlauf ermittelt. Die tatsächliche Verkehrsstärke am Beginn des Netzabschnitts wurde mit Querschnittsmessungen am Beginn der Untersuchungsstrecke ermittelt. Die Fahrtzeiten wurden über die Startzeit des jeweiligen Radfahrers den am Beginn der Strecke vorherrschenden Verkehrsstärken zugeordnet.

Das bedeutet, dass die angegebenen Verkehrsstärken im Zufluss und die tatsächlich auf der Strecke gemessenen Verkehrsstärken jeweils zu Beginn der Fahrt der zugeordneten Radfahrer vorherrschten. Die gemessene Verkehrsstärke weicht von der Verkehrsstärke im Fahrzeugzufluss ab, sobald die Strecke überlastet ist und nicht alle Fahrzeuge im Zufluss in das Netz eingesetzt werden.

Da es entlang der Netzabschnitte in Göttingen und München mehrere signalisierte Knotenpunkte gibt, sind die Abweichungen der Fahrtzeiten sehr viel größer und asymmetrischer als auf dem Netzabschnitt in Mülheim (Bild 6-12 bis Bild 6-14). An den Knotenpunkten kommt es ab Verkehrsstärken von 900 Rad/h zu erheblichen Rückstaus und infolgedessen zu stark steigenden Fahrtzeiten. Aufgrund der unterschiedlichen Entfernung der kapazitätslimitierenden Knotenpunkte von den Fahrzeugzuflüssen wurden je nach Fahrtrichtung unterschiedlich viele Fahrzeuge in das Netz eingesetzt. Aufgrund dessen unterscheiden sich auch die Fahrtzeiten zwischen den Fahrtrichtungen erheblich. Da die Fahrtzeiten nur ausgewertet werden konnten, wenn der Zielquerschnitt überfahren wurde, sind in Göttingen und München die stärker belasteten Richtungen in den hochbelasteten Intervallen nicht mehr vertreten, da die entsprechenden Fahrzeuge den Zielquerschnitt nicht vor Ende der Simulationszeit erreichten.

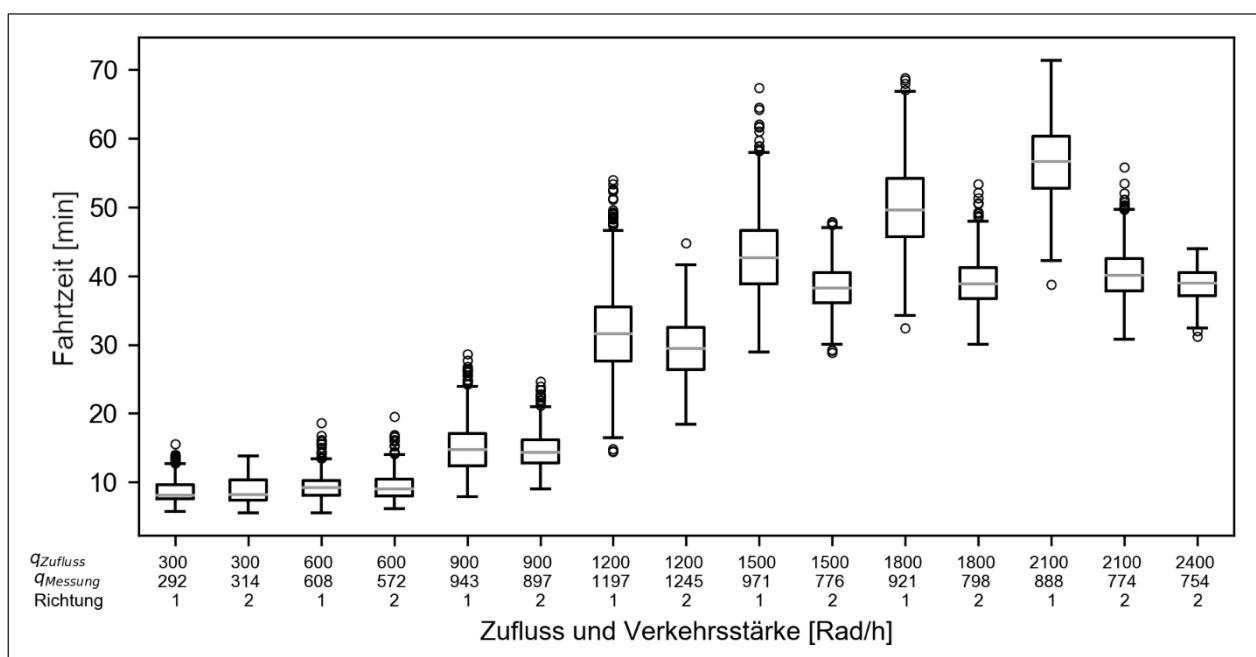


Bild 6-12: In der Simulation ermittelte Fahrtzeiten auf dem Netzabschnitt in Göttingen

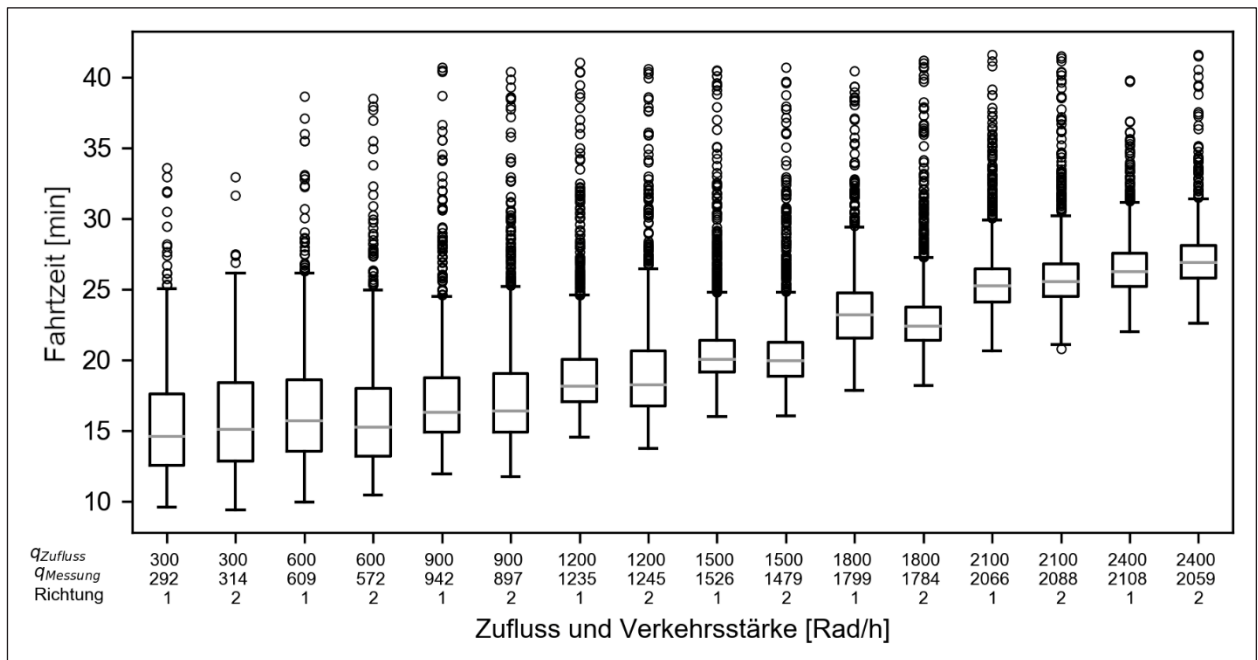


Bild 6-13: In der Simulation ermittelte Fahrzeiten auf dem Netzabschnitt in Mülheim

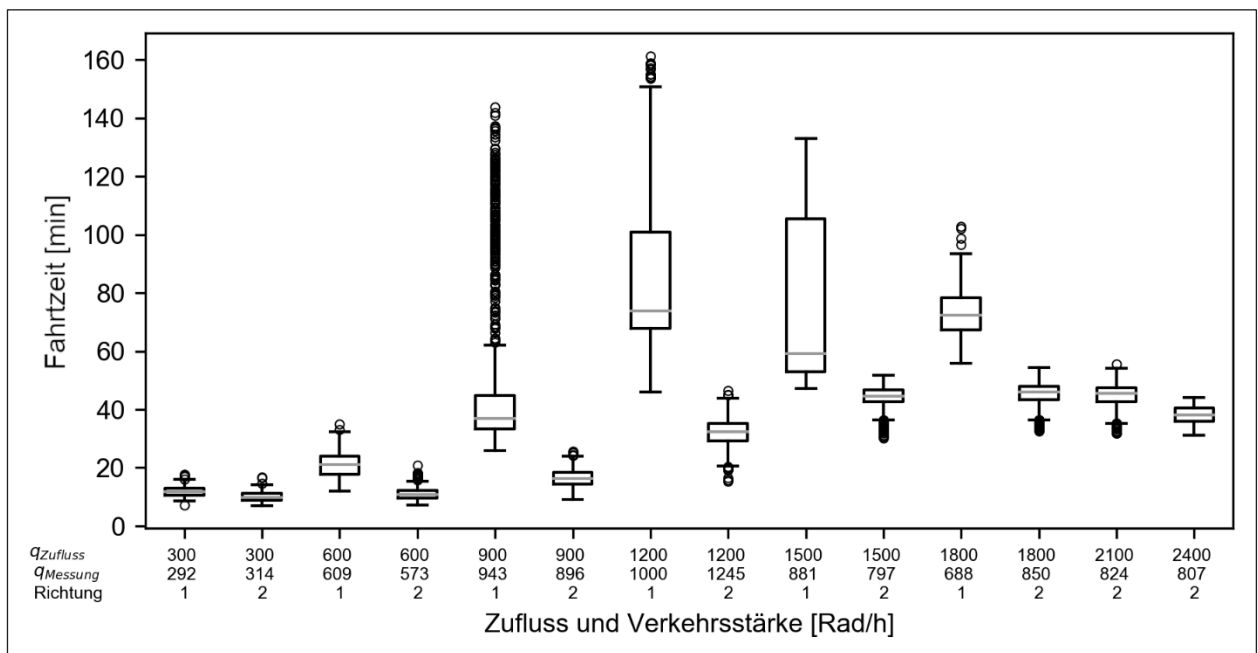


Bild 6-14: In der Simulation ermittelte Fahrzeiten auf dem Netzabschnitt in München

7 Bewertung der Verkehrsqualität auf Radverkehrsanlagen

7.1 Strecken von Radverkehrsanlagen

Das HBS (FGSV, 2015) enthält bereits ein Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität auf Anlagen für den Radverkehr, in dem die Störungsrate als Maß der Qualität des Verkehrsablaufs verwendet wird. Das Verfahren gilt für Strecken von Radwegen und Radfahrstreifen, jedoch nicht für Radverkehr auf der Fahrbahn ohne oder mit Schutzstreifen. Die Bewertung der Verkehrsqualität zielt explizit auf Radverkehrsanlagen mit sehr hoher Verkehrsnachfrage ab, weil sich ansonsten bereits mit den in den RAS (FGSV, 2006) bzw. den RAL (FGSV, 2012) vorgesehenen Regelbreiten für Radverkehrsanlagen, die sich aus funktionalen Erfordernissen begründen, eine mindestens ausreichende Verkehrsqualität ergibt. Insofern werden mit dem Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität die Vorgaben zur Gestaltung von Radverkehrsanlagen aus den Entwurfsrichtlinien um Anforderungen für hoch belastete Anlagen ergänzt, aber nicht ersetzt.

Es wird empfohlen, an den Grundsätzen für die Anwendung des Verfahrens festzuhalten und die Einsatzbereiche dahingehend zu präzisieren, dass

- bei Radwegen zwischen Einrichtungs- und Zweirichtungsradwegen unterschieden wird,
- bei Einrichtungsradwegen und Radfahrstreifen von einer Breite von mindestens 2,00 m entsprechend der in den RAS (FGSV, 2006) genannten Regelbreite für Einrichtungsradwege ausgegangen wird und
- bei Zweirichtungsradwegen von einer Breite von mindestens 3,00 m ausgegangen wird.

Für die Bewertung der Verkehrsqualität auf Radverkehrsanlagen aus Nutzersicht ist nach dem HBS (FGSV, 2015) „die Möglichkeit der Radfahrer, sich im Rahmen der Streckencharakteristik und der verkehrsrechtlichen Regelungen sowie der eigenen Fähigkeiten freizügig, d. h. ohne Beeinträchtigung durch andere Radfahrer, fortzubewegen“, ein maßgebendes Kriterium. Die mittlere Geschwindigkeit auf Strecken von Radverkehrsanlagen wird nicht nur durch die Verkehrsstärke und die Verkehrszusammensetzung, z. B. den Anteil von Fahrrädern mit Elektroantrieb und/oder Lastenrädern, sondern im Wesentlichen auch durch die Breite der Anlage sowie die Längsneigung bestimmt. Auf Strecken mit großen Steigungen erreichen Radfahrer zwar nicht die gleichen Geschwindigkeiten wie in der Ebene oder auf Gefällestrassen, trotzdem sind bei geringer Verkehrsstärke die Kriterien einer guten Bewegungsfreiheit erfüllt. Deshalb wird vorgeschlagen, als zusammenfassendes Kriterium die richtungs- und auf 1 m Breite bezogene Verkehrsdichte k_b als Maß der Verkehrsqualität zu verwenden:

$$k_b = \frac{q}{V_F \cdot b} \quad (7-1)$$

mit

k_b = richtungs- und auf 1 m Breite bezogene Verkehrsdichte auf der Teilstrecke [Rad/(km · m)]

q = Radverkehrsstärke [Rad/h]

V_F = mittlere Fahrtgeschwindigkeit [km/h]

b = Breite der Radverkehrsanlage [m]

Diese hängt von der Verkehrsstärke q sowie den streckengeometrischen (Breite, Längsneigung) und betrieblichen (Ein- oder Zweirichtungsverkehr) Einflussgrößen ab.

Die Einteilung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) lässt sich nicht direkt aus empirischen Ergebnissen ableiten und kann anhand von pragmatischen Festlegungen z. B. hinsichtlich akzeptabler Verkehrsdichten in den einzelnen Qualitätsstufen erfolgen. Die Einteilung kann sich aber auch an den Grenzwerten der Störungsrate des bisherigen Bemessungsverfahrens des HBS 2015 (FGSV, 2015) orientieren, die sich analytisch für bestimmte Breiten der Radverkehrsanlage in die richtungs- und auf 1 m Breite bezogene Verkehrsdichte k_b umrechnen lassen. Für ebene Einrichtungsradwege ohne punktuelle Störeinflüsse mit einem Anteil überbreiter Fahrräder von bis zu 15 % ergibt sich nach dem bisherigen Verfahren eine zulässige Verkehrsstärke in der QSV D von 1914 Rad/h. Dies entspricht unter Verwendung der q - V_F -Beziehungen nach Bild 7-1 einer richtungs- und auf 1 m Breite bezogenen Verkehrsdichte von 64,2 Rad/(km · m) für 2,00 m breite Radverkehrsanlagen, 50,6 Rad/(km · m) für 2,50 m breite Radverkehrsanlagen, 37,3 Rad/(km · m) für 3,00 m breite Radverkehrsanlagen und 31,8 Rad/(km · m) für 3,50 m

breite Radverkehrsanlagen. Unter der Maßgabe, dass auch hochbelastete Radverkehrsanlagen im Sinne einer angebotsorientierten Planung eher großzügig dimensioniert werden sollten, wird aus dieser Umrechnung ein Grenzwert für die QSV D von 40 Rad/(km · m) vorgeschlagen. Einen vollständigen Vorschlag für die Einteilung der QSV A bis F in Abhängigkeit von der mittleren richtungs- und auf 1 m Breite bezogenen Verkehrsdichte, die sich an der Abstufung der bisherigen Grenzwerte des HBS 2015 orientiert, enthält Tab. 7-1. Die Reihensimulationen haben gezeigt, dass unabhängig von der Breite der Radverkehrsanlage bei geringen Radverkehrsstärken eine mittlere richtungs- und auf 1 m Breite bezogene Verkehrsdichte über 10 Rad/(km · m) nicht überschritten und somit mindestens die QSV B erreicht wird. Der Grenzwert der QSV D von 40 Rad/(km · m) bedeutet, dass auf 2,00 m breiten Radverkehrsanlagen bei Radverkehrsstärken bis 1.324 Rad/h und auf 2,50 m breiten Radverkehrsanlagen bei Radverkehrsstärken bis 1.602 Rad/h eine ausreichende Verkehrsqualität (QSV D) vorliegt.

QSV	Richtungs- und auf 1 m Breite bezogene Verkehrsdichte k_B [Rad/(km · m)]
A	≤ 5
B	≤ 10
C	≤ 20
D	≤ 40
E	> 40
F	– ¹⁾

¹⁾ Die Kapazität wird in der Realität selbst bei sehr hohen Radverkehrsstärken nicht erreicht, deshalb ist die QSV F nicht definiert.

Tab. 7-1: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs in Abhängigkeit von der auf 1 m Breite bezogenen Verkehrsdichte je Richtung

Die zuvor genannten Radverkehrsstärken für die unterschiedlichen Breiten von Einrichtungsradswegen gelten unabhängig vom Anteil an Lastenrädern. Ein relevanter Einfluss von Lastenrädern auf die maßgebenden Parameter des Verkehrsablaufs (relative Verlustzeit, mittlere Geschwindigkeit, Verkehrsdichte) ist bei Einrichtungsradswegen mit 2,00 oder 2,50 m Breite erst bei Radverkehrsstärken feststellbar, die über den zulässigen Verkehrsstärken für die QSV D von 1.324 Rad/h bzw. 1.602 Rad/h liegen.

Die Definition von Strecken von Radverkehrsanlagen kann analog zum Verfahren des HBS (FGSV, 2015) für Strecken von Stadtstraßen erfolgen. Demnach sind Strecken fahrtrichtungsbezogene Teile von Radverkehrsanlagen zwischen Hauptknotenpunkten. Hauptknotenpunkte sind Knotenpunkte, an denen die Radfahrer auf der betrachteten Radverkehrsanlage vorfahrtrechtlich untergeordnet sind oder aufgrund einer Lichtsignalanlage wartepflichtig sein können. Knotenpunkte, an denen an die Radfahrer auf der betrachteten Radverkehrsanlage vorfahrtrechtlich übergeordnet ist, sind als Nebenknotenpunkte Bestandteile von Strecken. Strecken beginnen oder enden darüber hinaus auch an der Grenze von Netzabschnitten.

Strecken von Radverkehrsanlagen werden dort in Teilstrecken unterteilt, wo sich eine der streckengeometrischen oder verkehrlichen Einflussgrößen erheblich ändert. Zu den maßgebenden Einflussgrößen zählen die Breite der Radverkehrsanlage und die Längsneigung. Als Mindestlänge für Teilstrecken mit Längsneigungen $s > 1\%$ oder $s < -1\%$ wird ein Wert von 100 m vorgeschlagen. Bereiche mit unterschiedlicher Längsneigung können unter Ansatz einer längengewichteten mittleren Längsneigung zu Teilstrecken zusammengefasst werden, wenn nur dadurch die Mindestlänge von 100 m eingehalten werden kann.

Die Bewertung der Verkehrsqualität erfolgt richtungsbezogen, d. h. bei Zweirichtungsradwegen für jede Fahrtrichtung gesondert. Dazu wird zunächst für jede Teilstrecke die mittlere Fahrtgeschwindigkeit ermittelt. Daraus wird die richtungs- und auf 1 m Breite bezogene Verkehrsdichte berechnet.

Die Ermittlung der mittleren Fahrtgeschwindigkeiten basiert auf den Zusammenhängen zwischen der Radverkehrsstärke und der mittleren Fahrtgeschwindigkeit (q - V_F -Beziehungen). Ein Vorschlag für standardisierte q - V_F -Beziehungen für Teilstrecken von Einrichtungsradswegen und Radfahrstreifen, die aus den Ergebnissen der durchgeführten Verkehrssimulationen abgeleitet wurden, enthält Bild 7-1. Die q - V_F -

Beziehungen basieren auf dem Modellansatz von WU und GEISTEFELDT (2022), der nach der Warteschlangentheorie hergeleitet wurde:

$$V_F(q) = \frac{V_0}{1 + \frac{q}{C_0 - q} \cdot c_{st}} \quad (7-2)$$

mit

V_F = mittlere Fahrtgeschwindigkeit [km/h]

q = Radverkehrsstärke [Rad/h]

V_0 = Geschwindigkeit im freien Verkehr [km/h]

C_0 = Grundkapazität [Rad/h]

c_{st} = Faktor zur Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaft des Warteschlangensystems [-]

Diese q - V_F -Beziehungen wurden unter Annahme einer von der Breite der Radverkehrsanlage unabhängigen Geschwindigkeit im freien Verkehr an die Ergebnisse aus den Reihensimulationen angepasst. Sie gelten genaugenommen nur für den Streckenteil außerhalb der Knotenpunktbereiche. Sie können jedoch vereinfachend für die gesamte Strecke bzw. Teilstrecke einschließlich der Knotenpunktbereiche angesetzt werden. Die Parameter der Modellfunktionen nach Bild 7-1 sind in Tab. 7-2 angegeben.

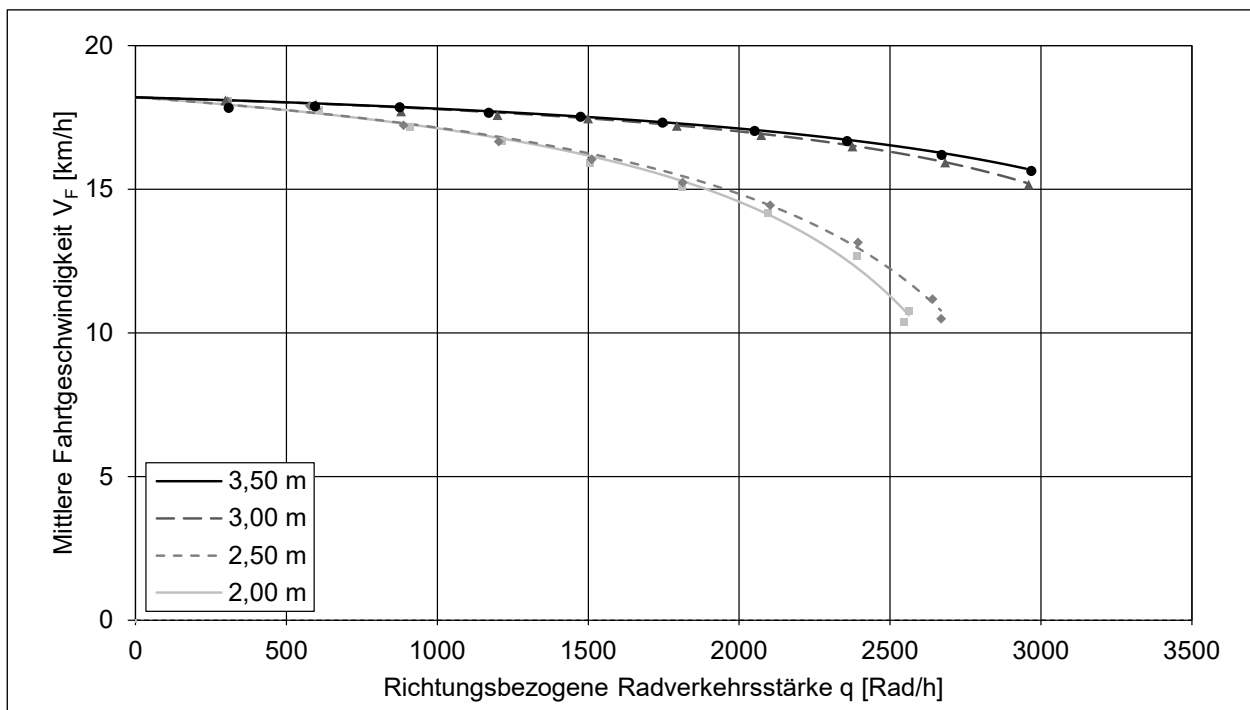


Bild 7-1: Mittlere Fahrtgeschwindigkeit V_F in Abhängigkeit von der richtungsbezogenen Radverkehrsstärke q für Teilstrecken von Einrichtungswegen und Radfahrstreifen mit unterschiedlicher Breite: Ergebnisse der Reihensimulationen und angepasste Modellfunktionen

Parameter	Breite der Radverkehrsanlage			
	2,00 m	2,50 m	3,00 m	3,50 m
V_0	18,2	18,2	18,2	18,2
C_0	3018	3192	4012	4334
c_{st}	0,127	0,135	0,070	0,074

Tab. 7-2: Parameter der q - V_F -Beziehungen in Bild 7-1

Die q - V_F -Beziehungen in Bild 7-1 gelten nur für ebene Strecken mit Längsneigungen von $-1 \% \leq s \leq 1 \%$. Bei größerer Steigung ($s > 1 \%$) oder größerem Gefälle ($s < -1 \%$) ist eine Korrektur der aus den q - V_F -Beziehungen ermittelten Geschwindigkeit erforderlich. Einen Vorschlag für Korrekturwerte in Abhängigkeit von der Länge der Steigungs- oder Gefällestrecke enthält Tab. 7-3. Dabei konnten nur die maximalen Korrekturwerte näherungsweise aus den empirischen Ergebnissen abgeleitet werden, während sich die anderen Werte aus einer systematischen Abstufung in 1 km/h-Schritten mit zunehmender Längsneigung und Länge der Strecke ergeben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Mindestlänge von Teilstrecken 100 m beträgt.

Länge der Strecke	Gefällestrecke				Steigungsstrecke			
	$s < -4 \%$	$s < -3 \%$	$s < -2 \%$	$s < -1 \%$	$s > 1 \%$	$s > 2 \%$	$s > 3 \%$	$s > 4 \%$
≤ 200 m	+4 km/h	+3 km/h	+2 km/h	+1 km/h	-1 km/h	-2 km/h	-3 km/h	-4 km/h
≤ 300 m	+5 km/h	+4 km/h	+3 km/h	+2 km/h	-2 km/h	-3 km/h	-4 km/h	-4 km/h
≤ 400 m	+6 km/h	+5 km/h	+4 km/h	+3 km/h	-3 km/h	-4 km/h	-4 km/h	-4 km/h
≤ 500 m	+6 km/h	+6 km/h	+5 km/h	+4 km/h	-4 km/h	-4 km/h	-4 km/h	-4 km/h
> 500 m	+6 km/h	+6 km/h	+6 km/h	+5 km/h	-4 km/h	-4 km/h	-4 km/h	-4 km/h

Tab. 7-3: Geschwindigkeitskorrektur bei Steigungs- und Gefällestrecken

Für Zweirichtungsradwege haben die Simulationen ähnliche Zusammenhänge zwischen der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit wie bei Einrichtungsradswegen sowie einen relativ geringen Einfluss der Gegenverkehrsstärke ergeben. Daher wird vereinfachend vorgeschlagen, die q - V_F -Beziehungen für 2,00 m breite Einrichtungsradswege nach Bild 7-1 auch für Zweirichtungsradwege ab 3,00 m Breite und die q - V_F -Beziehungen für 3,00 m breite Einrichtungsradswege auch für Zweirichtungsradwege ab 4,00 m Breite anzuwenden. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei mindestens 3,00 m breiten Zweirichtungsradwegen zeitweise zwei Fahrräder und bei mindestens 4,00 m breiten Zweirichtungsradwegen zeitweise drei Fahrräder in der betrachteten Hauptlastrichtung nebeneinander fahren können.

Als Eingangsgrößen für die Bewertung der Angebotsqualität von Netzabschnitten sind u. a. die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten auf den Strecken eines Netzabschnitts zu bestimmen. Die mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf einer Strecke ergibt sich dabei aus dem mit den Teilstreckenlängen gewichteten harmonischen Mittelwert der mittleren Fahrtgeschwindigkeiten auf den einzelnen Teilstrecken.

7.2 Netzabschnitte von Radverkehrsanlagen

Ein Verfahren zur Bewertung der Angebotsqualität auf Netzabschnitten für den Radverkehr ist im HBS (FGSV, 2015) bislang nicht enthalten. Für die Ergänzung eines solchen Bewertungsverfahrens kann die Vorgehensweise bei der Bewertung von Netzabschnitten von Stadtstraßen gemäß Kapitel S6 des HBS jedoch weitgehend übernommen und auf Netzabschnitte der Kategoriengruppen AR mit den Verbindungsfunktionsstufen II und III sowie der Kategoriengruppe IR mit den Verbindungsfunktionsstufen II bis IV gemäß den RIN (FGSV, 2008) übertragen werden.

Als Kriterium für die Angebotsqualität eines Netzabschnitts wird demnach der Fahrtgeschwindigkeitsindex verwendet. Dieser ergibt sich aus der in der Bemessungsstunde zu erwartenden mittleren Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt bezogen auf eine von der Verkehrswegekategorie gemäß den RIN (FGSV, 2008) abhängigen angestrebten mittleren Fahrtgeschwindigkeit:

$$I_{VF,N} = \frac{V_{F,N}}{V_{R,N}} \quad (7-3)$$

mit

$I_{VF,N}$ = Fahrtgeschwindigkeitsindex für den Netzabschnitt [-]

$V_{F,N}$ = zu erwartende mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt in der Bemessungsstunde [km/h]

$V_{R,N}$ = angestrebte mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt [km/h]

Die zu erwartende mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt ergibt sich aus den mittleren Fahrtgeschwindigkeiten auf den einzelnen Strecken und den Zeitverlusten an den Hauptknotenpunkten. Letztere umfassen die Wartezeiten an den Knotenpunkten selbst und zusätzliche Zeitverluste durch Verzögerungen und Beschleunigungen vor und hinter dem Knotenpunkt (bezogen auf die Knotenpunktmitte). Die mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf einem Netzabschnitt ergibt sich somit zu:

$$V_{F,N} = \frac{L_N}{\sum_{i=1}^{n_s} \frac{L_{S,i}}{V_{F,S,i}} + \frac{\sum_{k=1}^{n_k-1} t_{Z,KA,k} + \sum_{k=2}^{n_k} t_{W,k} + \sum_{k=2}^{n_k} t_{Z,KE,k}}{3,6}} \quad (7-4)$$

mit

$V_{F,N}$ = mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt [km/h]

L_N = Länge des Netzabschnitts [m]

$$= \sum_{i=1}^{n_s} L_{S,i}$$

n_s = Anzahl der Strecken

$L_{S,i}$ = Länge der Strecke i [km]

$V_{F,S,i}$ = mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke i [km/h]

n_k = Anzahl der Hauptknotenpunkte

$$= n_s + 1$$

$t_{Z,KA,k}$ = zusätzlicher Zeitverlust hinter dem Knotenpunkt k am Beginn der Strecke i [s]

$t_{W,k}$ = mittlere Wartezeit des betrachteten Verkehrsstroms am Knotenpunkt k am Ende der Strecke i [s]

$t_{Z,KE,k}$ = zusätzlicher Zeitverlust vor dem Knotenpunkt k am Ende der Strecke i [s]

Für die zusätzlichen Zeitverluste vor und hinter dem Knotenpunkt werden für den Radverkehr pauschale Werte von je 3 s vorgeschlagen, die auf der Annahme einer idealen mittleren Verzögerung und Beschleunigung basieren.

Für die angestrebte mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt wird eine Berechnung nach folgender Gleichung vorgeschlagen:

$$V_{R,N} = \frac{L_N}{\frac{L_N}{V_{F,QSV D}} + \frac{t_{Z,KA} + t_{W,QSV D} + t_{Z,KE}}{3,6}} \quad (7-5)$$

mit

$V_{R,N}$ = angestrebte mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt [km/h]

L_N = Länge des Netzabschnitts [km]

$V_{F,QSV D}$ = mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf einem knotenpunktfreiem Netzabschnitt bei Erreichen der QSV D auf der Strecke [km/h]

$$= 17 \text{ km/h}$$

$t_{Z,KA}$ = zusätzlicher Zeitverlust hinter dem Knotenpunkt am Beginn des Netzabschnitts [s]

$$= 3 \text{ s}$$

t_W = mittlere Wartezeit des betrachteten Verkehrsstroms bei Erreichen der QSV D am Knotenpunkt am Ende des Netzabschnitts [s]

- = 25 s bei einem Netzabschnitt der Kategoriengruppe AR
- = 35 s bei einem Netzabschnitt der Kategoriengruppe IR
- $t_{Z,KE}$ = zusätzlicher Zeitverlust vor dem Knotenpunkt am Ende des Netzabschnitts [s]
- = 3 s

Gleichung (7-5) beruht auf der Erkenntnis, dass die erreichbare mittlere Geschwindigkeit auf einem von zwei Hauptknotenpunkten begrenzten Netzabschnitt aufgrund der selbst bei einer ausreichenden Verkehrsqualität (QSV D) anfallenden mittleren Wartezeiten an dem Knotenpunkt am Ende des Netzabschnitts von der Länge des Netzabschnitts abhängt. Je kürzer der Netzabschnitt ist, desto höher ist der Einfluss der mittleren Wartezeit an dem Knotenpunkt am Ende des Netzabschnitts. Zudem hat sich bei der Bestimmung der SAQ_N für die drei in der Empirie und den Simulationsuntersuchungen betrachteten Netzabschnitte gezeigt, dass die in den RIN (FGSV, 2008) angegebenen Zielgrößen der angestrebten mittleren Fahrtgeschwindigkeit auf Netzabschnitten zu hoch sind. Dies resultiert vermutlich u. a. auch daraus, dass der Knotenpunkteinfluss in den Geschwindigkeiten nicht ausreichend berücksichtigt ist.

Zur Einteilung der Stufen der Angebotsqualität eines Netzabschnitts (SAQ_N) A bis F werden die Grenzwerte des Fahrtgeschwindigkeitsindex nach Tab. 7-4 vorgeschlagen, die sich mangels genauerer Erkenntnisse an die Grenzwerte für den Kfz-Verkehr im HBS (FGSV, 2015) anlehnen.

SAQ_N	Fahrtgeschwindigkeitsindex I_{VF} [-]	
	Kategoriengruppe AR	Kategorien- gruppe IR
A	$\geq 1,25$	$\geq 1,50$
B	$\geq 1,20$	$\geq 1,25$
C	$\geq 1,10$	$\geq 1,15$
D	$\geq 1,00$	$\geq 1,00$
E	$\geq 0,85$	$\geq 0,80$
F	$< 0,85$	$< 0,80$

Tab. 7-4: Stufen der Angebotsqualität eines Netzabschnitts in Abhängigkeit vom Fahrtgeschwindigkeitsindex
(Quelle: In Anlehnung an Tabelle S6-1, HBS, FGSV, 2015)

8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wurde das Fahrerverhalten im Radverkehr unter Berücksichtigung des Radfahrerkollektivs auf hochfrequentierten Radverkehrsanlagen analysiert. Dazu wurden Erhebungen des Geschwindigkeits- und seitlichen Abstandsverhaltens an zwölf Einzelanlagen des Radverkehrs mit unterschiedlichen Breiten, Verkehrswegekategorien, Führungsformen, Randnutzungen und Steigungsverhältnissen durchgeführt.

Auf Basis der empirisch ermittelten Kenngrößen wurden Simulationsmodelle für alle Streckentypen aufgebaut, Modellparameter kalibriert und das resultierende Überholverhalten validiert. Mithilfe der ermittelten Modellparameter wurden Reihensimulationen durchgeführt, die die Einflüsse unterschiedlicher Breiten und Radfahrerkollektive auf die Verkehrsqualität quantifizieren.

Als Fahrradtyp wurde das Alltagsrad erwartungsgemäß an allen untersuchten Einzelanlagen am häufigsten beobachtet. Es wurde ein prozentualer Anteil der Alltagsräder in einer Spanne von 63 % bis 91 % beobachtet. Rennräder waren an den untersuchten Einzelanlagen mit 2 % bis 12 % Anteil am Gesamtkollektiv vertreten. Der Pedelec-Anteil wurde an den meisten Radverkehrsanlagen in der Spanne von unter 1 % bis 3 % ermittelt. Nur auf dem Radschnellweg Ruhr und auf der Nordbahntrasse wurde mit 29 % bzw. 7 % ein hoher Pedelec-Anteil gemessen, wobei diese überdurchschnittlich hohen Anteile an Pedelecs vermutlich auf die starke Nutzung durch den Freizeitradverkehr zurückzuführen sind.

Zur Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens wurde zunächst für alle Einzelanlagen geprüft, ob die gefahrenen Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrradtypen sowie des gesamten Fahrradkollektivs einer bestimmten Verteilungsfunktion folgen. Es zeigte sich, dass u. a. die Normalverteilung zur Beschreibung der Geschwindigkeitsverteilung geeignet ist. Als maßgeblicher Einflussfaktor auf die Verteilungsfunktion der Geschwindigkeit des gesamten Fahrradkollektivs konnte die Längsneigung ermittelt werden. Da für die einzelnen Fahrradtypen ein unterschiedliches Geschwindigkeitsverhalten ermittelt wurde, stellt der prozentuale Anteil einzelner Fahrradtypen eine weitere Einflussgröße auf den Mittelwert und die Standardabweichung der Geschwindigkeit des gesamten Fahrradkollektivs dar. Die höchsten mittleren Geschwindigkeiten werden an Radverkehrsanlagen ohne Längsneigung bei einem hohen Anteil der Rennräder erreicht. Für die Radverkehrsanlagen, an denen eine Standardabweichung der Geschwindigkeit größer als 4 km/h ermittelt wurde, ist sowohl der Anteil der Rennräder als auch der Lastenräder und sonstigen Fahrräder jeweils größer als 5 %. Die hohen Standardabweichungen der Geschwindigkeit sind somit auf die Inhomogenität des Fahrradkollektivs durch die relativ hohen Anteile der einzelnen Fahrradtypen zurückzuführen.

Des Weiteren zeigte sich an allen untersuchten Einzelanlagen, dass der Mittelwert der gefahrenen Geschwindigkeiten in der Spitzenstunde fast immer höher ist als zu Schwachlastzeiten. Die Standardabweichungen sind dagegen überwiegend in Schwachlastzeiten höher. Die Ergebnisse sind auf die unterschiedliche Zusammensetzung des Radfahrerkollektivs in den Zeitintervallen zurückzuführen. Das Radfahrerkollektiv besteht in der Morgen- und Nachmittagspitze vor allem aus Pendlern, wohingegen die Schwachlastzeiten von einem hohen Anteil an Freizeitradfahrern geprägt sind.

Sofern keine empirischen Daten zur mittleren Geschwindigkeit sowie deren Standardabweichung an einer Radverkehrsanlage vorliegen, setzt das Bemessungsverfahren des HBS (FGSV, 2015a) eine mittlere Geschwindigkeit von 18 km/h mit einer Standardabweichung von 3 km/h an. Diese Werte beziehen sich auf Strecken ohne Längsneigung. In den durchgeführten Verkehrsmessungen an Einzelanlagen ohne Längsneigung wurden im Mittel eine mittlere Geschwindigkeit von 18,8 km/h und eine Standardabweichung von 3,7 km/h ermittelt.

Die Annahme im Verfahren des HBS (FGSV, 2015a), dass angrenzende lokal begrenzte Flächen wie z. B. ÖV-Haltestellen das Geschwindigkeitsverhalten negativ beeinträchtigen, konnte im Rahmen der Untersuchung nicht bestätigt werden. Allerdings basieren die Ergebnisse auf einer relativ geringen Datengrundlage. Zur detaillierten Analyse des Einflusses aus angrenzenden lokal begrenzten Flächen sind umfangreichere Auswertungen notwendig.

Der Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke q und der mittleren momentanen Geschwindigkeit v ist ein wichtiges Instrument zur Analyse des Verkehrsablaufs auf Straßenverkehrsanlagen. Die Kapazität kann anhand des q - v -Zusammenhangs allerdings nur dann realistisch geschätzt werden, wenn eine ausreichend große Anzahl an Intervallen im Bereich der Überlastung vorliegt. Im Rahmen der empirischen Erhebungen

lag an keiner Radverkehrsanlage eine so hohe Verkehrsnachfrage vor, dass ein kapazitätsbedingter Engpass beobachtet werden konnte. Des Weiteren konnte mit Hilfe von Signifikanztests kein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der mittleren momentanen Geschwindigkeit auf Radverkehrsanlagen basierend auf den empirischen Erhebungen abgeleitet werden.

Das Geschwindigkeitsverhalten an Steigungsstrecken wurde an sieben Steigungsstrecken mit unterschiedlicher Längsneigung, Länge der Steigungsstrecke sowie Führungsform empirisch untersucht. Im Gegensatz zu den untersuchten Einzelanlagen wurde an den Steigungsstrecken der Einfluss der Steigung auf das Geschwindigkeitsverhalten ohne Beeinflussung durch andere Radfahrer oder sonstige Beeinträchtigungen analysiert. Es zeigte sich, dass an Steigungsstrecken die relative Geschwindigkeitsänderung zur Anfangsgeschwindigkeit in 150 m Entfernung vom Beginn der Steigungsstrecke am höchsten ist. Bei den beiden untersuchten Steigungsstrecken mit einer Länge von mehr als 400 m wurde beobachtet, dass sich nach einer gewissen Entfernung vom Beginn der Steigungsstrecke die gefahrenen Geschwindigkeiten nicht mehr ändern und die Steigungsstrecke mit einer Beharrungsgeschwindigkeit befahren wird.

Zur Analyse des seitlichen Abstandsverhaltens wurden anhand von Videomessungen die seitlichen Abstände bei Begegnungen und Überholungen zwischen den einzelnen Radfahrern auf dem Querschnitt sowie die Abstände zum Seitenrand ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass die Anzahl der Radfahrer im Querschnitt, die Breite der Radverkehrsanlage, die Art der Interaktion (Begegnung, Überholung oder Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit) sowie die Art der baulichen Begrenzung einen Einfluss auf das seitliche Abstandsverhalten haben. Einflüsse der Geschwindigkeit und der Führungsform konnten nicht ermittelt werden. Es konnte jedoch beobachtet werden, dass Radfahrer die zur Verfügung stehende Breite der Radverkehrsanlage ausnutzen und größere Radabstände bzw. Abstände zum Rand bei einer Überholung oder Begegnung wählen. Des Weiteren zeigte sich, dass im Ein- und Zweirichtungsradverkehr ein seitlicher Mindestradabstand bei einer Überholung eingehalten wird, der ungefähr dem Wert von 1,00 m entspricht, welcher im Einklang mit den von der ERA (FGSV, 2010) geforderten Verkehrsräumen steht.

Neben der Analyse des Verkehrsablaufs an Einzelanlagen wurde der Verkehrsablauf auf drei längeren Radverbindungen, die den Charakter eines Netzabschnitts aufweisen und sich in mehrere Einzelanlagen (Strecken und Knotenpunkte) gliedern, empirisch untersucht. Dabei wurden insbesondere mögliche Einflussgrößen auf die Fahrtgeschwindigkeit auf Netzabschnitten im Radverkehr anhand von Verfolgungsfahrten näher analysiert. Insgesamt ist anhand der Ergebnisse festzuhalten, dass die mittlere Fahrtzeit auf Netzabschnitten maßgeblich durch die Knotenpunkte mit Wartepflicht beeinflusst wird. Dabei haben sowohl die Anzahl der Halte als auch die Verlustzeiten an den Knotenpunkten einen maßgeblichen Einfluss auf die mittlere Fahrtgeschwindigkeit. Ein Einfluss von Störungen, die sich aus Begegnungen und Überholungen sowie weiteren punktuellen Beeinträchtigungen im Fahrverhalten ergeben, auf die mittlere Fahrtgeschwindigkeit konnte an den untersuchten Netzabschnitten nur in geringem Umfang beobachtet werden.

Die durchgeführten Reihensimulationen für höhere Verkehrsstärken und Anteile spezifischer Fahrradtypen (Lastenräder und Pedelecs) ergaben, dass sowohl der Anteil der Lastenräder als auch der Pedelecs einen sehr geringen Einfluss auf die Verkehrsqualität haben. Entscheidend für die Verkehrsqualität ist vor allem die Breite der Radverkehrsanlage. Unabhängig vom Fahrradkollektiv bietet eine breitere Anlage eine bessere Möglichkeit, den Überholbedarf schnellerer Radfahrer abzudecken und damit die Verkehrsqualität zu verbessern. Die Anteile von Lastenrädern und Pedelecs am Kollektiv verändern zwar die mittleren Geschwindigkeiten, allerdings steigen die Verlustzeiten bei den hier untersuchten Breiten nicht an. Insbesondere zeigte sich eine überproportionale Zunahme der Verkehrsqualität im Einrichtungsverkehr im Vergleich zwischen 2,50 und 3,00 m breiten Anlagen.

Der Einfluss einer Steigung konnte nicht allgemeingültig in der Simulation abgebildet werden und wurde daher nicht simulativ untersucht. Für Radverkehrsanlagen mit Zweirichtungsverkehr konnte in der Reihensimulation ein Einfluss des Gegenverkehrs nur für sehr hohe Gegenverkehrsstärken gezeigt werden. Liegt die Gegenverkehrsstärke unterhalb von 1.200 Rad/h, ist kaum ein Einfluss feststellbar.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus den Verkehrsmessungen und den Simulationsuntersuchungen wurden Hinweise für ein Verfahren zur Bewertung des Verkehrsablaufs auf Strecken mit Anlagen für den Radverkehr erarbeitet. Diese beziehen sich ausschließlich auf Strecken von Radwegen und Radfahrstreifen mit Regelbreiten gemäß den RAS (FGSV, 2006) und den RAL (FGSV, 2012), die in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle eine mindestens ausreichende Verkehrsqualität gewährleisten. Deshalb ist die Bewertung der Verkehrsqualität nur bei sehr hoher Verkehrsnachfrage im Radverkehr sinnvoll. Als Qualitätskriterium wird die richtungs- und auf 1 m Breite bezogene Verkehrsdichte k_B vorgeschlagen. Diese ist mit Hilfe

von q-v-Beziehungen für Einrichtungsverkehr in Abhängigkeit von der Breite der betrachteten Radverkehrsanlage zu bestimmen. Zudem kann mit dem Verfahren die richtungsbezogene mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf einer Strecke bestimmt werden, die als Eingangsgröße für die Bewertung von Netzabschnitten benötigt wird.

Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich des Einflusses der Längsneigung auf die mittlere Geschwindigkeit im Radverkehr. Hier konnten weder aus den Verkehrsmessungen noch aus den Simulationsuntersuchungen ausreichend belastbare Erkenntnisse gewonnen werden. Unabhängig davon enthält der Verfahrensvorschlag dennoch einen Ansatz zur Berücksichtigung der Längsneigung durch eine Anpassung der aus den q-v-Beziehungen bestimmten mittleren Fahrtgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Länge der Steigungs- bzw. Gefällestrecke.

Des Weiteren wurde ein Vorschlag für die Grundzüge eines Verfahrens zur Bewertung der Angebotsqualität auf Netzabschnitten für den Radverkehr erarbeitet. Die Angebotsqualität eines Netzabschnitts wird durch die Entwurfs- und Betriebsmerkmale der Strecken und Knotenpunkte im Zuge dieses Netzabschnitts bestimmt. Als Eingangsgrößen für die Ermittlung der Angebotsqualität eines Netzabschnitts werden die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten auf allen Strecken sowie die mittleren Wartezeiten an allen Hauptknotenpunkten im Zuge des Netzabschnitts benötigt. Die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten auf den Strecken können mit Hilfe von q-v-Beziehungen bestimmt werden, die Wartezeiten an den Knotenpunkten sind mit den entsprechenden Verfahren für diese zu ermitteln. Als Kriterium für die Angebotsqualität eines Netzabschnitts wird – wie im HBS (FGSV, 2015) für den Kfz-Verkehr – der Fahrtgeschwindigkeitsindex vorgeschlagen. Dieser ergibt sich aus der in der Bemessungsstunde zu erwartenden mittleren Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt bezogen auf eine von der Verkehrswegekategorie gemäß den RIN (FGSV, 2008) abhängige angestrebte mittlere Fahrtgeschwindigkeit.

Die Bestimmung der SAQ_N für die drei in der Empirie und den Simulationsuntersuchungen betrachteten Netzabschnitte hat gezeigt, dass die in den RIN (FGSV, 2008) angegebenen Zielgrößen der angestrebten mittleren Fahrtgeschwindigkeit auf Netzabschnitten zu hoch sind. Dies resultiert vermutlich u. a. auch daraus, dass der Knotenpunkteinfluss in diesen angestrebten Geschwindigkeiten nicht ausreichend berücksichtigt ist. Deshalb ist die angestrebte mittlere Fahrtgeschwindigkeit jeweils in Abhängigkeit von der Länge des Netzabschnitts festzulegen.

Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der Zielgrößen der angestrebten mittleren Fahrtgeschwindigkeit auf Netzabschnitten, die nochmals eingehend zu überprüfen sind. Ebenfalls überprüft werden sollte in diesem Zusammenhang die Einteilung der Grenzwerte der SAQ_N A bis F.

Literatur

- AASHTO (2012): Guide for the Development of Bicycle Facilities, 4th Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- VAN AERDE, M. (1995): A Single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Freeways and Arterials. Proceedings of the 74th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.
- AGFS (2014): Radschnellwege in NRW – Dokumentation des Landeswettbewerbs Radschnellwege. Arbeitsgemeinschaft fußgänger- und fahrradfreundlicher Städte, Gemeinden und Kreise in Nordrhein-Westfalen e.V., Köln.
- ALRUTZ, D.; BOHLE, W.; HACKE, U.; LOHMANN, G.; FRIEDRICH, N. (2015): Potenzielle Einflüsse von Pedelecs auf die Verkehrssicherheit. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 82.0533 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Planungsgesellschaft Verkehr PGV-Alrutz und Institut Wohnen und Bauen GmbH, Hannover/Darmstadt.
- AMINI, S.; TWADDLE, H.; LEONHARDT, A. (2016): Modelling of the tactical path selection of bicyclists at signalized intersections. Paper presented at the 95th TRB Annual Meeting, Washington D.C.
- ASTRA (2008): Planung von Velorouten. Bundesamt für Strassen ASTRA (Hrsg.), Bern.
- ASTRA (2015): Velobahnen – Grundlegendokument. Bundesamt für Strassen ASTRA (Hrsg.), Bern.
- BAIER, R.; SCHUCKLIEß, W.; JACHTMANN, Y.; DIEGMANN, V.; MAHLAU, A.; GÄSSLER, G. (2013): Radpotenziale im Stadtverkehr. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 227, Bergisch Gladbach.
- BAST (2017): Richtzeichnungen für Ingenieurbauten (RiZ-ING). Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- BERNARDI, S.; RUPI, F. (2015): An analysis of bicycle travel speed and disturbances on off-street and on-street facilities. Transportation Research Procedia, Volume 5, pp. 82-94.
- BMVI (2012): Nationaler Radverkehrsplan 2020 (NRVP). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Berlin.
- BOTMA, H. (1995): Method to Determine Level of Service for Bicycle Paths and Pedestrian-Bicycle Paths. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1502, pp. 38-44.
- BOUFOUS, S.; HATFIELD, J.; GRZEBIETA, R. (2018): The impact of environmental factors on cycling speed on shared paths. Accident Analysis and Prevention, Volume 110, pp. 171-176.
- BRILON, W.; ZURLINDEN, H. (2003): Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 870, Bonn.
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J.; REGLER, M. (2005): Reliability of Freeway Traffic Flow: A Stochastic Concept of Capacity. In: Transportation and Traffic Theory: Flow, Dynamics and Human Interaction – Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, College Park, Maryland, pp. 125-144.
- BRUST, E.; GRESSMANN, M.; HERKENDELL, F.; HERTEL, D.; MUSCHWECK, O. (2016): Tabellenbuch Fahrradtechnik. Europa-Lehrmittel Verlag, Haan.
- BUSCH, F.; GRIGOROPOULOS, G.; KATHS, H.; BAIER, M. M.; REINARTZ, A.; SCHUCKLIESS, L.; JUNGHANS, M.; LÜCKEN, L.; LEONHARDT, A. (2019): Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 70.0925/2015 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, München/Aachen/Berlin.
- CED (2012): Collection of Cycle Concepts. Cycling Embassy of Denmark (Hrsg.), Kopenhagen.
- CEOGB (2018): Dictionary - Cycling Level of Service. Cycling Embassy of Great Britain, online verfügbar (Abrufdatum 08.10.2018): <https://www.cycling-embassy.org.uk/dictionary/cycling-level-of-service>.
- CEREMA (2008): Recommandations pour les aménagements cyclables (RAC). Cerema (Hrsg.), Lyon.

- CIHT (1998): Cycle Audit and Cycle Review. Chartered Institution of Highways and Transportation (Hrsg.), London.
- COWI (2013): Micro Simulation of Cyclists in Peak Hour Traffic. Hg. v. City of Copenhagen.
- CPH (2014): Focus on Cycling – Copenhagen guidelines for the design of road projects. Technical and Environmental Administration of Copenhagen (Hrsg.), Kopenhagen.
- CROW (2007): Design Manual for Bicycle Traffic, CROW-Fietsberaad (Hrsg.), Ede.
- CROW (2016): Design Manual for Bicycle Traffic. CROW-Fietsberaad (Hrsg.), Ede.
- DRAKE, J. S.; SCHOFFER, J. L.; MAY, A. D. (1967): A Statistical Analysis of Speed Density Hypotheses. Highway Research Record, Volume 154, pp. 53-87.
- FALKENBERG, G.; BLASE, A.; BONFRANCHI, T.; COSSÉ, L.; DRAEGER, W.; VORTISCH, P.; KAUTZSCH, L.; STAPF, H.; ZIMMERMANN, A (2003): Bemessung von Radverkehrsanlagen unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 103, Bergisch Gladbach.
- FGSV (2005): Hinweise zur Signalisierung des Radverkehrs (HSRa). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- FGSV (2006a): Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation – Grundlagen und Anwendungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- FGSV (2006b): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- FGSV (2008): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- FGSV (2010): Empfehlungen für Radverkehrsanlagen (ERA). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- FGSV (2011): Hinweise für barrierefreie Verkehrsanlagen (H BVA). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- FGSV (2014): Arbeitspapier Einsatz und Gestaltung von Radschnellverbindungen (AP RSV). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- FGSV (2015a): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- FGSV (2015b): Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr (RiLSA). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- FGSV (2018): Hinweise zur Anwendung der RIN. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- FGSV (2020): Begriffsbestimmungen für das Straßen- und Verkehrswesen (BBSV). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- FHWA (2009): Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD). Federal Highway Administration (Hrsg.), Washington D.C.
- FSV (2014): Radverkehr RVS 03.02.13, Anlagen für den nichtmotorisierten Verkehr. Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (Hrsg.), Wien.
- GEISTEFELDT, J. (2011): Ermittlung von Wunschgeschwindigkeiten für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation. Tagungsdokumentation zur HEUREKA '11 – Optimierung in Verkehr und Transport, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- GERTZ, C.; PETER, M.; SANDER, H.; WENTERODT, A. (2017): Potenzialanalyse für Radschnellwege in der Metropolregion Hamburg, Hamburg.

- GOULD, G.; KARNER, A. (2009): Modeling Bicycle Facility Operation: Cellular Automaton Approach. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2140, pp. 157-164.
- GREENBERG, H. (1959): An Analysis of Traffic Flow, Operations Research, Volume 7, Issue 1, pp. 79-85.
- GREENSHIELDS, B. D. (1935): A study in traffic capacity. Proceedings of the Highway Research Board, Volume 14, pp. 448-477.
- GREIBE, P.; BUCH, T. S. (2016): Capacity and Behaviour on One-way Cycle Tracks of Different Widths. Transportation Research Procedia, Volume 15, pp. 122-136.
- GWIASDA, P.; ERLER, L. (2015): Gestaltung von Radschnellwegen in Deutschland – eine Herausforderung? Straßenverkehrstechnik, Heft 10/2015.
- HELBING, D.; MOLNÁR, P. (1995): Social force model for pedestrian dynamics. Phys. Rev. E 51 (5), pp. 4282-4286.
- HOOGENDOORN, S.P. (2005): Unified Approach to Estimating Free Speed Distributions. Transportation Research Part B, Volume 39, Issue 8, pp. 709-727.
- HOMBURGER, W.S. (1976): Capacity of Bus Routes, and of Pedestrian and Bicycle Facilities. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- JENSEN, S. U. (2007): Pedestrian and Bicyclist Level of Service on Roadway Segments. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2031, pp. 43-51
- JENSEN, S. U. (2012): Pedestrian and Bicycle Level of Service at Intersections, Roundabouts and other Crossings. Trafitec, Kongens Lyngby.
- JIN S.; QU, X.; ZHOU, D.; XU, C.; MA, D.; WANG, D. (2015): Estimating cycleway capacity and bicycle equivalent unit for electric bicycles. Transportation Research Part A, Volume 77, pp. 225-248.
- LCC (2013): Love London, go Dutch (LLGD). London Cycling Campaign, online verfügbar (Abrufdatum 08.10.2018): <https://lcc.org.uk/pages/love-london-go-dutch-matrix>, London.
- LI, M.; SHI, F.; CHEN, D. (2011): Analyzing Bicycle-Car Mixed Traffic Flow by Social Force Model for Collision Risk Evaluation. Paper presented at the 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis, Indiana.
- LIN, S.; HE, M.; TAN, Y.; HE, M. (2008): Comparison Study on Operating Speeds of Electric Bicycles and Bicycles: Experience from Field Investigation in Kunming, China. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2048, pp. 52-59.
- LIU, X.; SHEN, L.D.; REN, F. (1993): Operational Analysis of Bicycle Interchanges in Beijing, China. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1396, pp. 18-21.
- MOHURD (2012): Code for Design of Urban Road Engineering. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China, Peking.
- MACNICHOLAS, M. J. (2008): A Simple and Pragmatic Representation of Traffic Flow. Symposium on the Fundamental Diagram: 75 Years, Woods Hole, Massachusetts.
- MALIK, J.; LANGE, P.; ANDRIESSE, R.; GWIASDA, P.; ERLER, L.; STEIN, D.; THIEMANN-LINDEN, J.: Einsatzbereiche und Entwurfselemente von Radschnellverbindungen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 320, Bergisch Gladbach.
- NACTO (2014): Urban Bikeway Design Guide. National Association of City Transportation Officials (Hrsg.), New York.
- NEWELL, G. F. (1961): Nonlinear Effects in the Dynamics of Car Following. Operations Research, Volume 9, pp. 209-229.
- OHM, D.; FIEDLER, F.; ZIMMERMANN, F.; KRAXENBERGER, T.; MAIER, R.; HANTSCHHEL, S.; OTTO, M. (2015): Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 257, Bergisch Gladbach.

- PARKIN, J.; ROTHERAM, J. (2010): Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal. *Transport Policy*, Volume 17, Issue 5, pp. 335-341.
- PINKOFSKY, L. (2004): Ganglinientypen. In: *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2002 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 115, Bergisch Gladbach.
- PINKOFSKY, L. (2006): Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr und Stadtbauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Heft 54, Shaker Verlag.
- PIPES, L. A. (1967): Car following models and the fundamental diagram of road traffic. *Transportation Research*, Volume 1, pp. 21-29.
- SCHLEINITZ, K.; PETZOLDT, T.; FRANKE-BARTHOLD, L.; KREMS, J.; GEHLERT, T. (2017): The German Naturalistic Cycling Study – Comparing cycling speed of riders of different e-bikes and conventional bicycles. *Safety Science*, Volume 92, pp. 290-297.
- SCHÖNAUER, R.; STUBENSCHROTT, M.; HUANG, W.; RUDLOFF, C.; FELLENDORF, M. (2012): Modeling Concepts for Mixed Traffic. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2316, pp. 114-121.
- STADT FREIBURG (2018): Freiburger Radverkehrskonzept 2020, Freiburg.
- TBA (2018): Anlagen für den Veloverkehr. Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern (Hrsg.), Bern.
- THOMPSON, D. C.; REBOLLEDO, V.; THOMPSON, R. S.; KAUFMANN, A.; RIVARA, F. P. (1997): Bike speed measurements in a recreational population: validity of self reported speed. *Injury Prevention*, Volume 3, pp. 43-45.
- TRB (2000): Highway Capacity Manual (HCM). Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- TRB (2016): Highway Capacity Manual 6th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis (HCM). Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- TFL (2014): London Cycling Design Standards. Transport for London (Hrsg.), London.
- TWADDLE, H.; GRIGOROPOULOS, G. (2016a): Integration of an External Bicycle Model in SUMO.
- TWADDLE, H.; GRIGOROPOULOS, G. (2016b): Modeling the Speed, Acceleration, and Deceleration of Bicyclists for Microscopic Traffic Simulation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2587, pp. 8-16.
- TWADDLE, H.; SCHENDZIELORZ, T.; FAKLER, O. (2014): Bicycles in Urban Areas. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2434, pp. 140-146.
- UNDERWOOD, R.T. (1961): Speed, volume and density relationship. *Quality and Theory of Traffic Flow*, Yale University Bureau of Highway Traffic, pp. 141-187.
- VASIC, J.; RUSKIN, H. J. (2012): Agent-based Space-time Discrete Simulation of Urban Traffic Including Bicycles. *Procedia Computer Science*, Volume 10, pp. 860-865.
- VSS (2016): Grundlagen für die Dimensionierung von sicheren Veloverkehrsanlagen. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (Hrsg.), Bern.
- WANG, H.; LI, J.; CHEN, Q.Y.; NI, D. (2011): Logistic modeling of the equilibrium speed-density relationship. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 45, Issue 6, pp. 554-566.
- WU, N.; GEISTEFELDT, J. (2022): Ein neues Verkehrsflussmodell basierend auf der Warteschlangentheorie und seine Anwendung für Autobahnen. *Straßenverkehrstechnik*, Heft 3/2022.
- ZIV (2018): Zahlen – Daten – Fakten zum deutschen E-Bike-Markt 2017. Pressemitteilung des Zweirad-Industrie-Verbands vom 13.03.2018, Bad Soden am Taunus.

Bilder

Hinweis: Auszüge aus dem FGSV-Regelwerk sind mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

Bild 2-1: Belastungsbereiche zur Vorauswahl von Radverkehrsführungen nach den ERA (FGSV, 2010) für zweistreifige Straßen bezogen auf den Querschnitt und für vierstreifige Straßen bezogen auf die Fahrtrichtung

Bild 2-2: Führungsform des Radverkehrs in Abhängigkeit von der Wunschgeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs und der täglichen Kfz-Verkehrsstärke nach CED (2012)

Bild 2-3: Mittlere Wartezeit für Fußgänger- und Radverkehrsströme in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke der maßgebenden Hauptströme an Einmündungen und Kreuzungen mit Vorfahrtbeschilderung nach dem HBS (FGSV, 2015a)

Bild 2-4: LOS in Abhängigkeit von der mittleren Kfz-Geschwindigkeit und der Kfz-Verkehrsstärke für drei Radverkehrsanlagen mit unterschiedlichen baulichen und verkehrstechnischen Randbedingungen nach Jensen (2007): 3,75 m breiter angrenzender Kfz-Fahstreifen (links), städtische Anliegerstraße mit Gehweg und Kfz-Geschwindigkeiten bis 65 km/h (Mitte), Landstraße ohne Gehweg mit Grünflächen und Kfz-Geschwindigkeiten von 70 km/h bis 90 km/h (rechts)

Bild 3-1: Messstellen in Karlsruhe (Karte: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

Bild 3-2: Schematische Darstellung der Ermittlung der seitlichen Abstände bei Begegnungen und Überholungen

Bild 3-3: Geschwindigkeitsprofile von fünf GPS-gestützten Verfolgungsfahrten auf dem Netzabschnitt Lindwurmstraße in München

Bild 4-1: Prozentuale Anteile der einzelnen Fahrradtypen für die jeweilige Einzelanlage über den gesamten Messzeitraum

Bild 4-2: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit an den jeweiligen Einzelanlagen differenziert nach der Längsneigung (links) bzw. der Führungsform im Ein- und Zweirichtungsradverkehr ohne Längsneigung (rechts)

Bild 4-3: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit an den jeweiligen Einzelanlagen ohne Längsneigung differenziert nach dem Anteil der Rennräder mit Nutzung im Alltagsradverkehr (links) bzw. dem Anteil der Lastenräder und sonstigen Fahrräder (rechts)

Bild 4-4: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit in der Spitzenstunde sowie im Schwachlastintervall

Bild 4-5: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrradtypen an den jeweiligen Einzelanlagen

Bild 4-6: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normal-, Gamma- und logarithmischen Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Erhardtstraße in München in Fahrtrichtung Nord

Bild 4-7: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für die Promenade in Münster in Fahrtrichtung Süd

Bild 4-8: Verteilungsfunktionen der Wunschgeschwindigkeit sowie der Geschwindigkeit aller Radfahrer (beeinflusst oder unbeeinflusst) und der Geschwindigkeit für die unbeeinflusst fahrenden Radfahrer (ohne Berücksichtigung zensierter Werte) für die Promenade in Münster in Fahrtrichtung Nord

Bild 4-9: q-v-Diagramme in 1- und 5-Minuten-Intervallen auf der Promenade in Münster

Bild 4-10: Fahrtrichtungsgetrennte zeitliche Verteilung der Verkehrsstärke als prozentualer Anteil der maximalen Verkehrsstärke für den eRadschnellweg in Göttingen sowie die Nordbahntrasse in Wuppertal in 15-Minuten-Intervallen

Bild 4-11: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit auf der Wolbecker Straße in Münster sowie der Berliner Straße in Berlin an den Messquerschnitten im Einflussbereich einer punktuellen Störung sowie auf der freien Strecke

Bild 4-12: Anteile von Gruppen am Radverkehrsaufkommen auf allen Messstellen

Bild 4-13: Gefahrene Geschwindigkeiten des Gesamtkollektivs und der in Gruppen fahrenden Radfahrer

Bild 4-14: Histogramme des seitlichen Radabstands bei Überholungen auf Radfahrstreifen (links) und Einrichtungsradwegen (rechts) für die untersuchten Einzelanlagen im Einrichtungsradverkehr

Bild 4-15: Histogramme des seitlichen Radabstands bei Überholungen auf den untersuchten Zweirichtungsradwegen mit einer Breite von mindestens 3,00 m (links) und einer Breite unterhalb von 3,00 m (rechts)

Bild 4-16: Mittlerer seitlicher Radabstand bei Überholungen (links) oder Begegnungen (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt und der Breite der Radverkehrsanlage im Zweirichtungsradverkehr

Bild 4-17: 0,1-Quantil des seitlichen Radabstands bei Überholungen (links) oder Begegnungen (rechts) für die maximal beobachtete Anzahl an Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage im Zweirichtungsradverkehr

Bild 4-18: Mittlerer seitlicher Radabstand bei Überholungen (links) oder beim Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit (rechts) bei zwei Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage und der Führungsform im Einrichtungsradverkehr

Bild 4-19: 0,1-Quantil des seitlichen Radabstands bei Überholungen (links) oder beim Nebeneinanderfahren mit gleicher Geschwindigkeit (rechts) bei zwei Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage und der Führungsform im Einrichtungsradverkehr..65

Bild 4-20: Mittlerer seitlicher Abstand zu Grünstreifen (links) oder zu Gehwegen (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt und der Breite der Radverkehrsanlage im Zweirichtungsradverkehr

Bild 4-21: 0,1-Quantil des seitlichen Abstands zu Grünstreifen (links) oder zu Gehwegen (rechts) für die maximal beobachtete Anzahl an Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage im Zweirichtungsradverkehr

Bild 4-22: Mittlerer seitlicher Abstand bei zwei Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Art der Begrenzung und der Breite der Radverkehrsanlage getrennt nach Radfahrstreifen (links) und Radweg (rechts) im Einrichtungsradverkehr

Bild 4-23: 0,1-Quantil des seitlichen Abstands bei zwei Radfahrern im Querschnitt in Abhängigkeit von der Art der Begrenzung und der Breite der Radverkehrsanlage getrennt nach Radfahrstreifen (links) und Radweg (rechts) im Einrichtungsradverkehr

Bild 4-24: Mittlerer seitlicher Abstand zum Rand der Radverkehrsanlage in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage (links) beim Ausweichen auf den Gehweg bzw. die Kfz-Fahrbahn im Einrichtungsradverkehr und (rechts) beim Ausweichen auf den Gehweg in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt im Zweirichtungsradverkehr

Bild 4-25: Erhöhung der gefahrenen Geschwindigkeit bei einer aktiven Überholung auf den untersuchten Netzabschnitten (Verfolgungsfahrten)

Bild 4-26: Geschwindigkeitsprofil basierend auf Verfolgungsfahrten für die Bessemerstraße in Bochum für alle Fahrradtypen

Bild 4-27: Normiertes Geschwindigkeitsprofil basierend auf Verfolgungsfahrten für die Bessemerstraße in Bochum für alle Fahrradtypen

Bild 4-28: Normierte Geschwindigkeitsprofile basierend auf Verfolgungsfahrten aller untersuchten Steigungsstrecken für alle Fahrradtypen

Bild 5-1: Mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf den untersuchten Netzabschnitten anhand von Verfolgungsfahrten (V) und Bluetooth-Messungen (BT)

Bild 5-2: Zusammenhang zwischen der mittleren Fahrtgeschwindigkeit und dem prozentualen Anteil der Durchfahrten ohne Halt an Knotenpunkten mit LSA für die Verfolgungsfahrten auf den Netzabschnitten Lindwurmstraße in München und eRadschnellweg in Göttingen

Bild 5-3: Zusammenhang zwischen der mittleren Fahrtgeschwindigkeit und der mittleren Verlustzeit an Knotenpunkten (links) sowie zwischen der mittleren Verlustzeit an Knotenpunkten und dem prozentualen Anteil der Durchfahrten ohne Halt an Knotenpunkten mit LSA (rechts) für die Verfolgungsfahrten auf den Netzabschnitten Lindwurmstraße in München und eRadschnellweg in Göttingen

Bild 5-4: Zusammenhang zwischen der mittleren Fahrtgeschwindigkeit und der Störungsrate für die Verfolgungsfahrten auf den analysierten Netzabschnitten

Bild 5-5: Zusammenhang zwischen der mittleren Fahrtgeschwindigkeit und der passiven Überholungsrate für die Verfolgungsfahrten auf den analysierten Netzabschnitten

Bild 6-1: Prinzipskizze des Modellaufbaus für Steigungsstrecken (Karte: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

Bild 6-2: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung aus der Simulation mit den empirischen Daten am zweiten Messpunkt am Beispiel der Erhardtstraße in München

Bild 6-3: Vergleich der Zeitlückenverteilung aus der Simulation mit den empirischen Daten am zweiten Messpunkt am Beispiel der Erhardtstraße in München

Bild 6-4: Modellierungsmöglichkeiten von Zweirichtungsradwegen mithilfe von Überholen ausschließlich innerhalb des eigenen Fahrstreifens, Überholen im Gegenverkehr auf der ganzen Breite und Überholen im Gegenverkehr auf einer Teilfläche der Radverkehrsanlage

Bild 6-5: Vergleich der gemessenen Geschwindigkeiten am zweiten (links) und dritten (rechts) Messpunkt in der Bessemerstraße in Bochum mit Simulationsergebnissen

Bild 6-6: Mittels Simulation ermittelte Qualitätsmaße für die Bewertung des Verkehrsablaufs auf der Lindwurmstraße

Bild 6-7: a) Relative Verlustzeit, b) mittlere Geschwindigkeit, c) streckenbezogene Verkehrsdichte und d) flächenbezogene Verkehrsdichte in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage im Basisfall im Einrichtungsradverkehr

Bild 6-8: a) Verlustzeit, b) mittlere Geschwindigkeit, c) streckenbezogene Verkehrsdichte und d) flächenbezogene Verkehrsdichte in Abhängigkeit vom Pedelec-Anteil auf einer 2,00 m breiten Strecke im Einrichtungsradverkehr

Bild 6-9: a) Verlustzeit, b) mittlere Geschwindigkeit, c) streckenbezogene Verkehrsdichte und d) flächenbezogene Verkehrsdichte in Abhängigkeit vom Lastenrad-Anteil auf einer 2,00 m breiten Strecke im Einrichtungsradverkehr

Bild 6-10: a) Verlustzeit und b) mittlere Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Lastenrad-Anteil auf einer 2,50 m breiten Strecke im Einrichtungsradverkehr

Bild 6-11: a) Verlustzeit, b) mittlere Geschwindigkeit, c) streckenbezogene Verkehrsdichte und d) flächenbezogene Verkehrsdichte in Abhängigkeit von der Gegenverkehrsstärke auf einer 2,00 m breiten Strecke im Einrichtungsradverkehr

Bild 6-12: In der Simulation ermittelte Fahrtzeiten auf dem Netzabschnitt in Göttingen

Bild 6-13: In der Simulation ermittelte Fahrtzeiten auf dem Netzabschnitt in Mülheim

Bild 6-14: In der Simulation ermittelte Fahrtzeiten auf dem Netzabschnitt in München

Bild 7-1: Mittlere Fahrtgeschwindigkeit V_F in Abhängigkeit von der richtungsbezogenen Radverkehrsstärke q für Teilstrecken von Einrichtungsradwegen und Radfahrstreifen mit unterschiedlicher Breite: Ergebnisse der Reihensimulationen und angepasste Modellfunktionen

Tabellen

Hinweis: Auszüge aus dem FGSV-Regelwerk sind mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

Tab. 2-1: Einsatzbereiche zur Führung des Radverkehrs auf der Fahrbahn nach den RAS (FGSV, 2006b) und den ERA (FGSV, 2010)

Tab. 2-2: Zielgrößen für Gestaltung und Ausstattung von Verkehrswegen des Alltagsradverkehrs nach den ERA (FGSV, 2010)

Tab. 2-3: Empfohlene Führungsform in Abhängigkeit von der durchschnittlichen täglichen Kfz-Verkehrsstärke und der Kfz-Geschwindigkeit gemäß internationalen Normen und Regelwerken

Tab. 2-4: Breitenbedarf von Radverkehrsanlagen nach Führungsform gemäß CED (2012)

Tab. 2-5: Führungsform des Radverkehrs in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für den Kfz-Verkehr, der täglichen Kfz-Verkehrsstärke, der Verbindungskategorie des Radwegenetzes, der Straßenkategorie sowie der Lage innerhalb oder außerhalb bebauter Gebiete nach CROW (2016)

Tab. 2-6: Breitenbedarf von Radwegen mit und ohne Zulassung von Mopeds nach CROW (2016)

Tab. 2-7: Breitenbedarf von Radschnellwegen nach CROW (2016)

Tab. 2-8: Empfohlene Führungsform des Radverkehrs in Abhängigkeit von der Kfz-Verkehrsstärke, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der Radverkehrsstärke gemäß VSS (2016)

Tab. 2-9: Breitenbedarf von Radverkehrsanlagen gemäß TBA (2018) und ASTRA (2015)

Tab. 2-10: Breitenbedarf von Radverkehrsanlagen gemäß NACTO (2014) und AASHTO (2012)

Tab. 2-11: Kapazitätswerte von Radverkehrsanlagen

Tab. 2-12: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs auf Strecken im Zuge von Radwegen und Radfahrstreifen in Abhängigkeit von der Störungsrate nach dem HBS (FGSV, 2015a)

Tab. 2-13: Grenzwerte für die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der verschiedenen Verkehrsarten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage nach dem HBS (FGSV, 2015a)

Tab. 2-14: Grenzwerte für die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs der verschiedenen Verkehrsarten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage nach dem HBS (FGSV, 2015a)

Tab. 2-15: Kategorien von Verkehrswegen des Radverkehrs und angestrebte Fahrtgeschwindigkeiten für den Alltagsradverkehr nach den RIN (FGSV, 2008)

Tab. 2-16: Fahrtgeschwindigkeiten des Radverkehrs auf Strecken (ohne Knotenpunkte mit Wartepflicht (Hinweise zur Anwendung der RIN, FGSV, 2018)

Tab. 2-17: Qualitätskriterien und Bewertungsindikatoren für Radverkehrsnetze gemäß CROW (2016)

Tab. 2-18: Qualitätskriterien und Bewertungsindikatoren für Velorouten gemäß ASTRA (2008)

Tab. 2-19: LOS und Bicycle LOS Score $l_{b,F}$ für einen Netzabschnitt bzw. $l_{b,link}$ für einen Streckenabschnitt im Radverkehr mit Einfluss des motorisierten Verkehrs gemäß HCM (TRB, 2016)

Tab. 2-20: LOS und mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf Radfahrstreifen gemäß HCM (TRB, 2000)

Tab. 2-21: LOS und Bicycle LOS Score für Radverkehrsanlagen ohne Einfluss des motorisierten Verkehrs gemäß HCM (TRB, 2016)

Tab. 2-22: Anzahl effektiver Fahrstreifen in Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsführung gemäß HCM (TRB, 2016)

Tab. 3-1: Untersuchungskollektiv für Einzelanlagen im Einrichtungsradverkehr

Tab. 3-2: Untersuchungskollektiv für Einzelanlagen im Zweirichtungsradverkehr

Tab. 3-3: Untersuchungskollektiv für Netzabschnitte

Tab. 3-4: Untersuchungskollektiv für Steigungsstrecken

Tab. 3-5: Einteilung von Fahrradtypen in Oberkategorien sowie optische Merkmale der einzelnen Fahrradtypen

Tab. 4-1: Vergleich der Verteilungsmaße zwischen einzeln und in Gruppen fahrenden Radfahrern. Messstelle 1 = Knielinger Allee, Messstelle 2 = Karl-Wilhelm-Straße, Messstelle 3 = Zirkel

Tab. 4-2: Bemessungsverkehrsstärke und Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs für die Einzelanlagen im Einrichtungsradverkehr

Tab. 4-3: Bemessungsverkehrsstärke und Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs für die Einzelanlagen im Zweirichtungsradverkehr

Tab. 4-4: Bemessungsverkehrsstärke nach dem HBS (FGSV, 2015a), Breite der Radverkehrsführung sowie prozentualer Anteil der Überholungen, die außerhalb der Radverkehrsführungen beobachtet wurden, für die Einzelanlagen im Einrichtungsradverkehr

Tab. 4-5: Bemessungsverkehrsstärke nach dem HBS (FGSV, 2015a), Breite der Radverkehrsführung sowie prozentualer Anteil der Überholungen und Begegnungen, die außerhalb der Radverkehrsführungen beobachtet wurden, für die Einzelanlagen im Zweirichtungsradverkehr

Tab. 6-1: Variation der Fahrzeugzuflüsse in der Reihensimulation

Tab. 7-1: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs in Abhängigkeit von der auf 1 m Breite bezogenen Verkehrsdichte je Richtung

Tab. 7-2: Parameter der q-V_F-Beziehungen in Bild 7-1

Tab. 7-3: Geschwindigkeitskorrektur bei Steigungs- und Gefällestrecken

Tab. 7-4: Stufen der Angebotsqualität eines Netzabschnitts in Abhängigkeit vom Fahrtgeschwindigkeitsindex (Quelle: In Anlehnung an Tabelle S6-1, HBS, FGSV, 2015)

Anhang

Anhang A: Beschreibung des Untersuchungskollektivs

Anhang B: Ergebnisse der Analyse des Verkehrsablaufs an Einzelanlagen

Anhang C: Überblick über die Fahrverhaltensparameter

Anhang D: Auswertung des Überholverhaltens auf Einzelanlagen

Anhang E: Sensitivitätsanalyse

Anhang F: Kalibrierung der Steigungsstrecken

Anhang G: Einstellungen für die Reihensimulationen

Anhang H: Ergebnisse der Reihensimulation

Anhang A: Beschreibung des Untersuchungskollektivs

Durchgeführte Messungen und Erhebungszeiträume

Einzelanlagen

Stadt	Radverkehrsanlage	Art der Messung	Datum	Messzeitraum
Berlin	Oberbaumbrücke	Querschnittsmessung	30.04.2019	6:00 - 14:15 Uhr
Freiburg	Eschholzstr.	Querschnittsmessung	17.07.2019	6:00 - 16:30 Uhr
München	Lindwurmstr.	Querschnittsmessung	19.07.2018	6:30 - 17:45 Uhr
Münster	Wollbecker Str.	Querschnittsmessung	24.05.2019	6:30 - 15:45 Uhr
Münster	Warendorfer Str.	Querschnittsmessung	25.06.2019	6:30 - 15:45 Uhr
Berlin	Berliner Str.	Querschnittsmessung	21.05.2019	6:30 - 16:30 Uhr
Mülheim	Radschnellweg Ruhr	Querschnittsmessung	07.05.2018 08.05.2018	6:45 - 18:00 Uhr 6:30 - 18:00 Uhr
Münster	Promenade	Querschnittsmessung	23.05.2019	6:45 - 16:00 Uhr
Wuppertal	Nordbahntrasse	Querschnittsmessung	14.07.2019	7:00 - 18:00 Uhr
Göttingen	eRadschnellweg	Querschnittsmessung	04.06.2018	7:45 - 18:00 Uhr
München	Erhardtstr.	Querschnittsmessung	18.07.2018	6:30 - 17:30 Uhr
Hamburg	An der Alster	Querschnittsmessung	03.07.2019	5:45 - 15:00 Uhr

Tab. A-1: Durchgeführte Messungen und Erhebungszeiträume an Einzelanlagen

Netzabschnitte

Stadt	Radverkehrsanlage	Art der Messung	Datum	Messzeitraum
Göttingen	eRadschnellweg	Verfolgungsfahrten	04.06.2018	8:00 - 17:00 Uhr
			06.06.2018	8:00 - 17:30 Uhr
			14.06.2018	8:00 - 12:30 Uhr
			21.06.2018	8:30 - 12:00 Uhr
			08.08.2018	7:30 - 16:00 Uhr
		Bluetooth-Messung	14.06. - 21.06.2018	ganztägig
Mülheim / Essen	Radschnellweg Ruhr	Verfolgungsfahrten	05.07.2018	7:30 - 14:00 Uhr
			10.07.2018	9:30 - 14:30 Uhr
			12.07.2018	9:30 - 15:30 Uhr
			09.08.2018	7:00 - 12:00 Uhr
			13.09.2018	9:00 - 15:00 Uhr
		19.09.2018	8:45 - 13:00 Uhr	
Bluetooth-Messung	02.05. - 09.05.2018	ganztägig		
München	Lindwurmstr.	Verfolgungsfahrten	18.07.2018	8:45 - 17:45 Uhr
			19.07.2018	7:45 - 20:45 Uhr

Tab. A-2: Durchgeführte Messungen und Erhebungszeiträume an Netzabschnitten

Steigungsstrecken

Stadt	Radverkehrsanlage	Art der Messung	Datum	Messzeitraum
Bochum	Universitätsstr.	Querschnittsmessung	04.07.2017 25.09.2017	9:00 - 18:00 Uhr 7:00 - 15:00 Uhr
		Verfolgungsfahrten	17.05.2018	9:00 - 12:00 Uhr
Bochum	Bessemerstr.	Querschnittsmessung	26.09.2017	6:45 - 17:00 Uhr
		Verfolgungsfahrten	22.05.2018	9:00 - 12:00 Uhr
Essen	Lerchenstr.	Querschnittsmessung	17.07.2017	9:00 - 17:00 Uhr
		Verfolgungsfahrten	14.09.2018 20.09.2018	9:30 - 14:30 Uhr 9:30 - 14:30 Uhr
Unna	Morgenstr.	Verfolgungsfahrten	25.05.2018	9:30 - 12:00 Uhr
Unna	Kamener Str.	Verfolgungsfahrten	05.06.2018	9:00 - 11:15 Uhr
Unna	Wasserstr.	Verfolgungsfahrten	07.06.2018	8:45 - 12:00 Uhr
München	Lindwurmstr.	Verfolgungsfahrten	18.07.2018	8:45 - 17:45 Uhr
			19.07.2018	7:45 - 20:45 Uhr

Tab. A-3: Durchgeführte Messungen und Erhebungszeiträume an Steigungsstrecken

Erhebungen zur Analyse des Fahrverhaltens in Gruppen

Stadt	Radverkehrsanlage	Art der Messung	Datum	Messzeitraum
Karlsruhe	Knielinger Allee	Videomessung	15.09.2019	8:00 - 20:00 Uhr
Karlsruhe	Zirkel	Videomessung	15.09.2019	8:00 - 20:00 Uhr
Karlsruhe	Karl-Wilhelm-Str.	Videomessung	15.09.2019	8:00 - 20:00 Uhr

Tab. A-4: Durchgeführte Messungen und Erhebungszeiträume an Radverkehrsanlagen zur Analyse des Fahrverhaltens in Gruppen

Bilder der untersuchten Einzelanlagen



Bild A-1: eRadschnellweg in Göttingen



Bild A-2: Radschellweg Ruhr in Mülheim



Bild A-3: Erhardtstraße in München



Bild A-4: Promenade in Münster



Bild A-5: Nordbahntrasse in Wuppertal



Bild A-6: An der Alster in Hamburg



Bild A-7: Oberbaumbrücke in Berlin



Bild A-8: Berliner Straße in Berlin



Bild A-9: Warendorfer Straße in Münster



Bild A-10: Wollbecker Straße in Münster



Bild A-11: Lindwurmstraße in München (Radfahrstreifen)



Bild A-12: Lindwurmstraße in München (Radweg)

Schematische Darstellung der Netzabschnitte

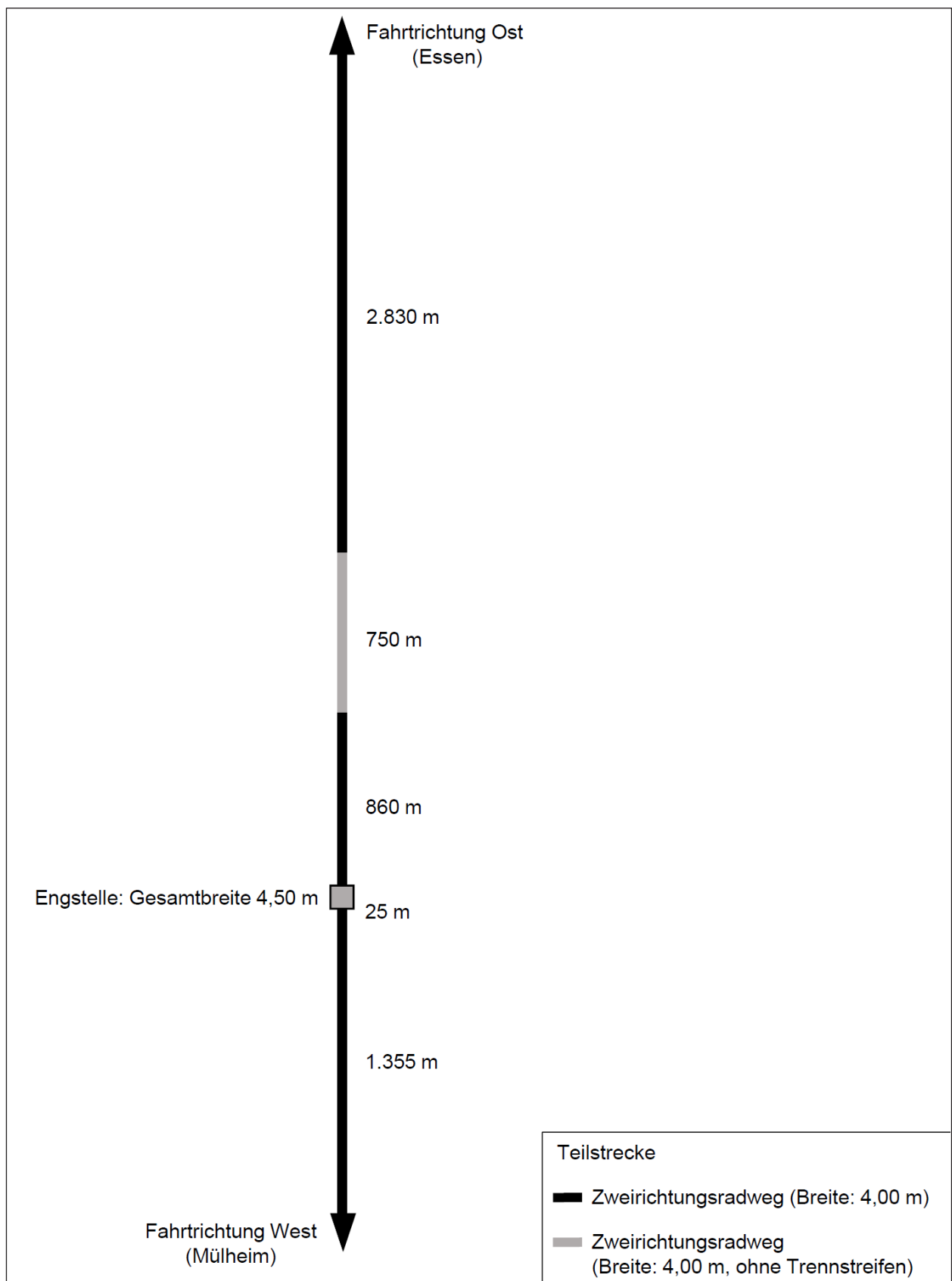


Bild A-13: Schematische Darstellung des Netzabschnitts Radschnellweg Ruhr in Mülheim

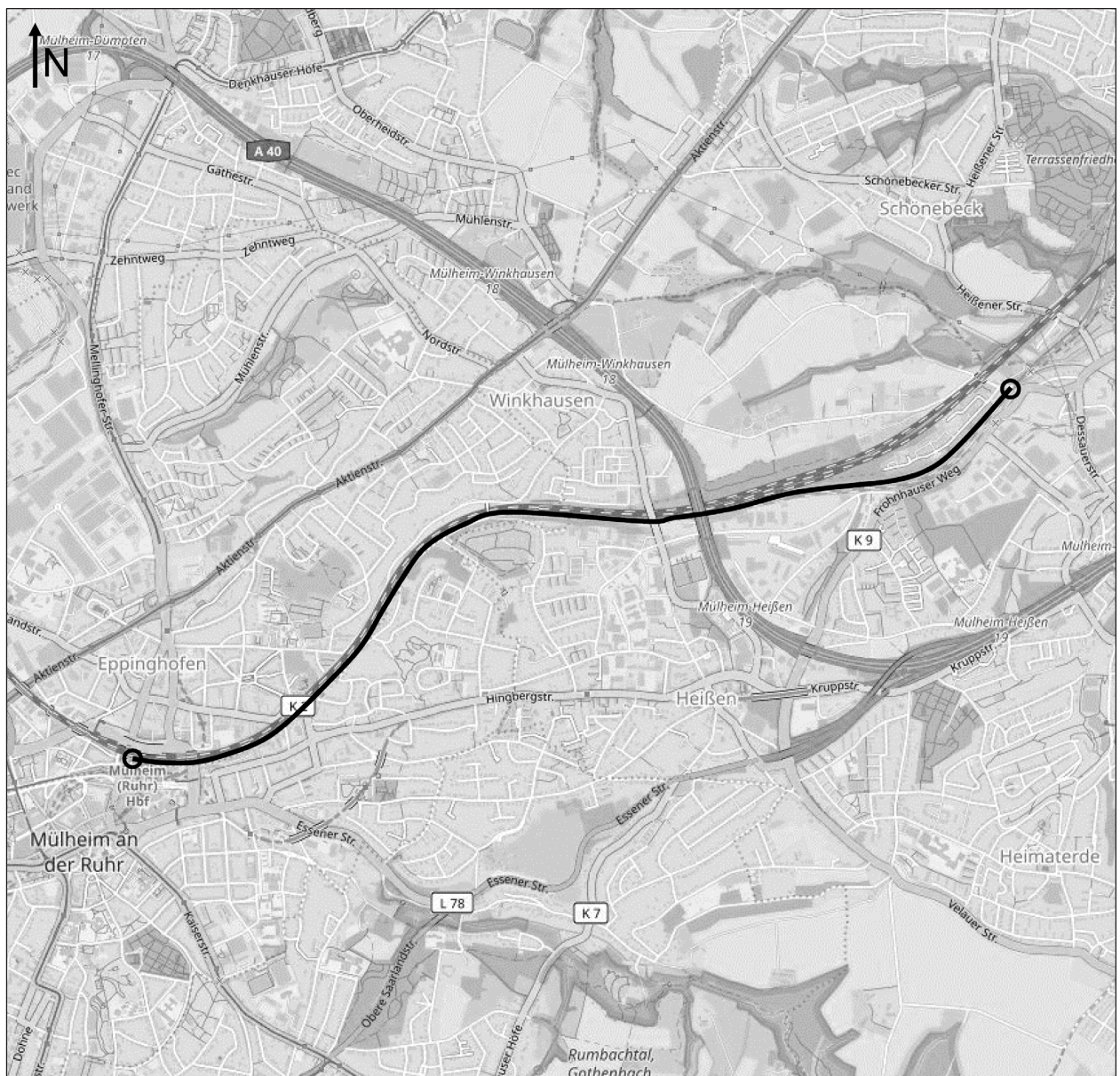


Bild A-14: Lageplan des Netzabschnitts Radschnellweg Ruhr in Mülheim (Karte: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

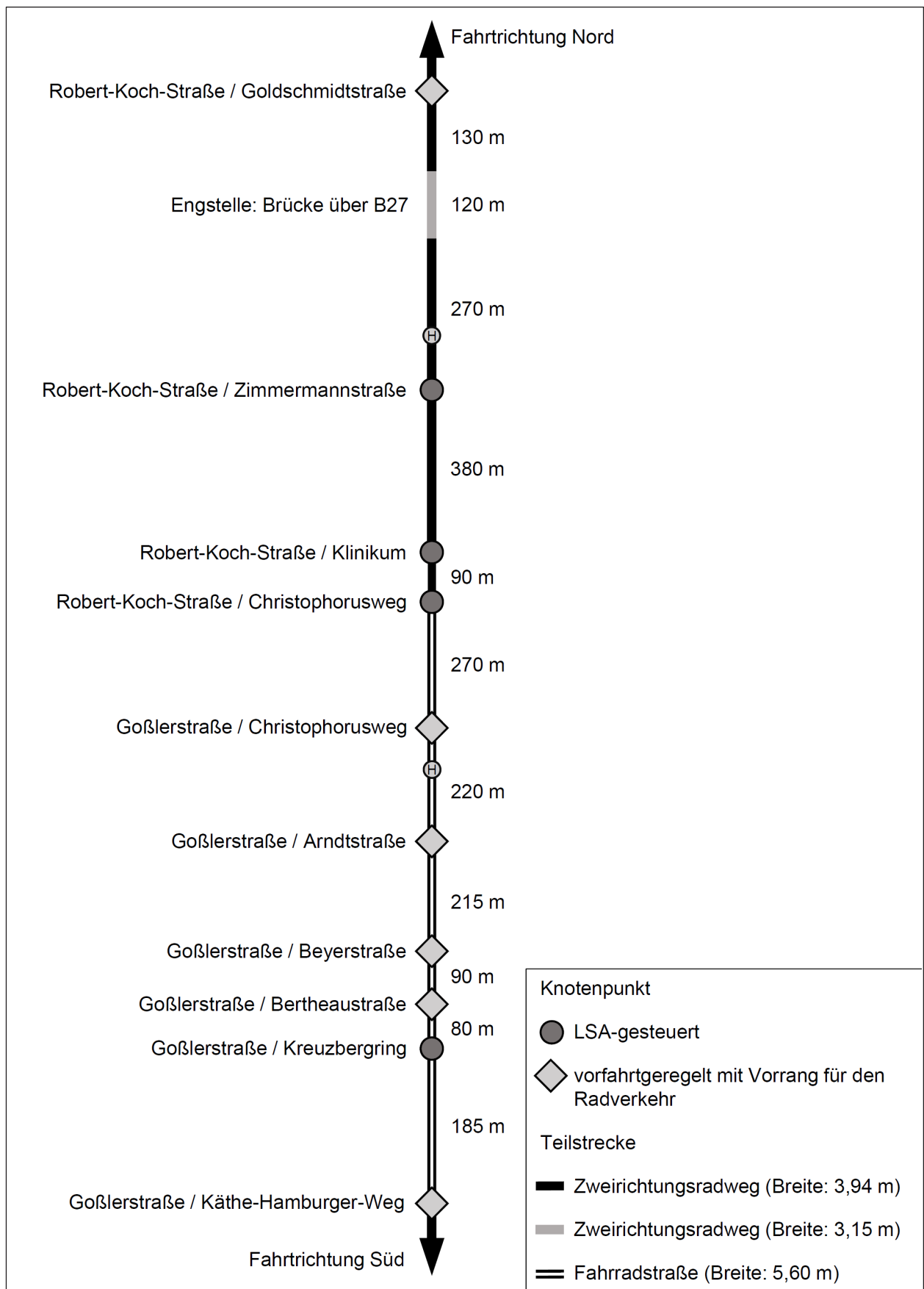


Bild A-15: Schematische Darstellung des Netzabschnitts eRadschnellweg in Göttingen

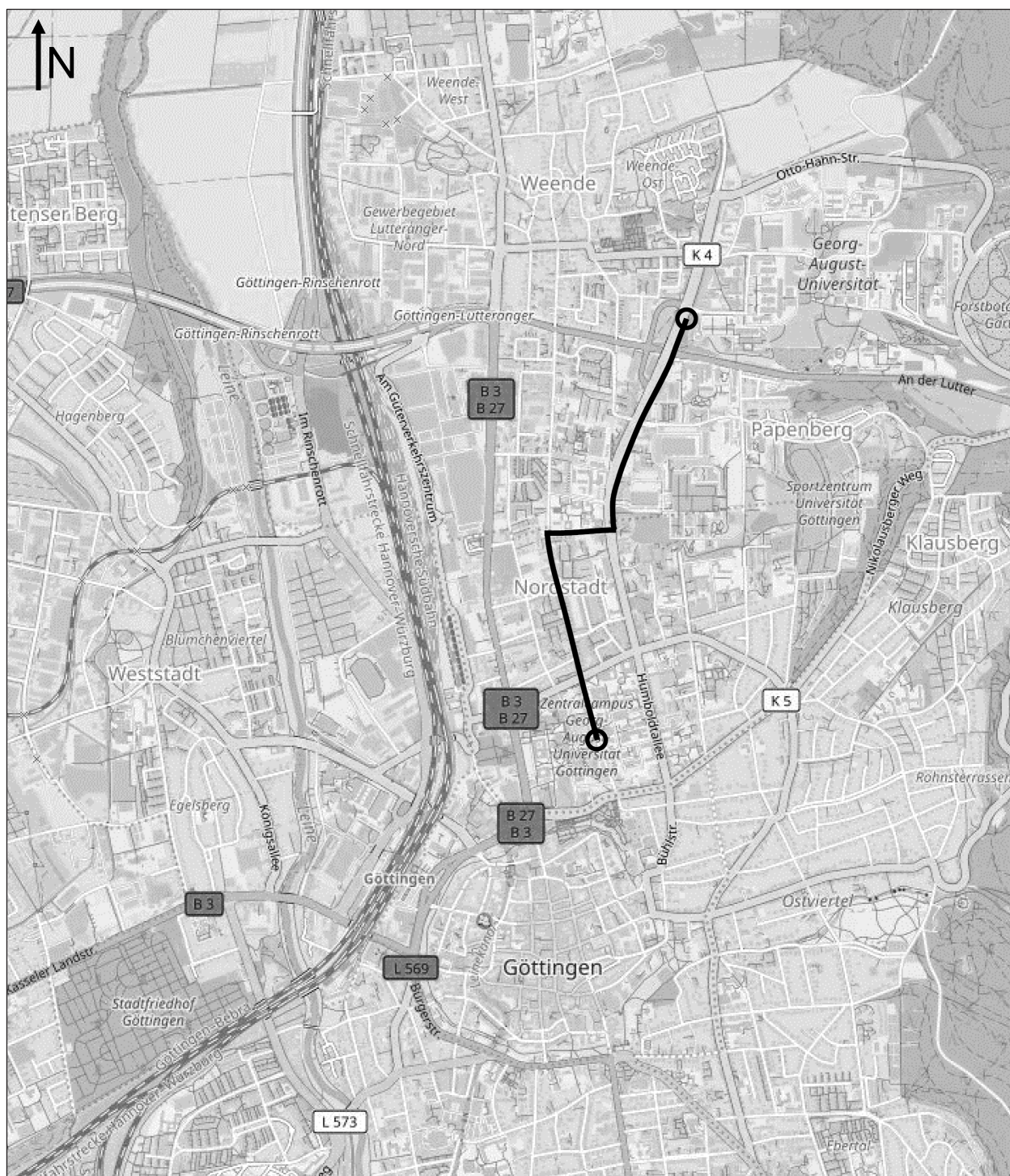


Bild A-16: Lageplan des Netzabschnitts eRadschnellweg in Göttingen (Karte: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

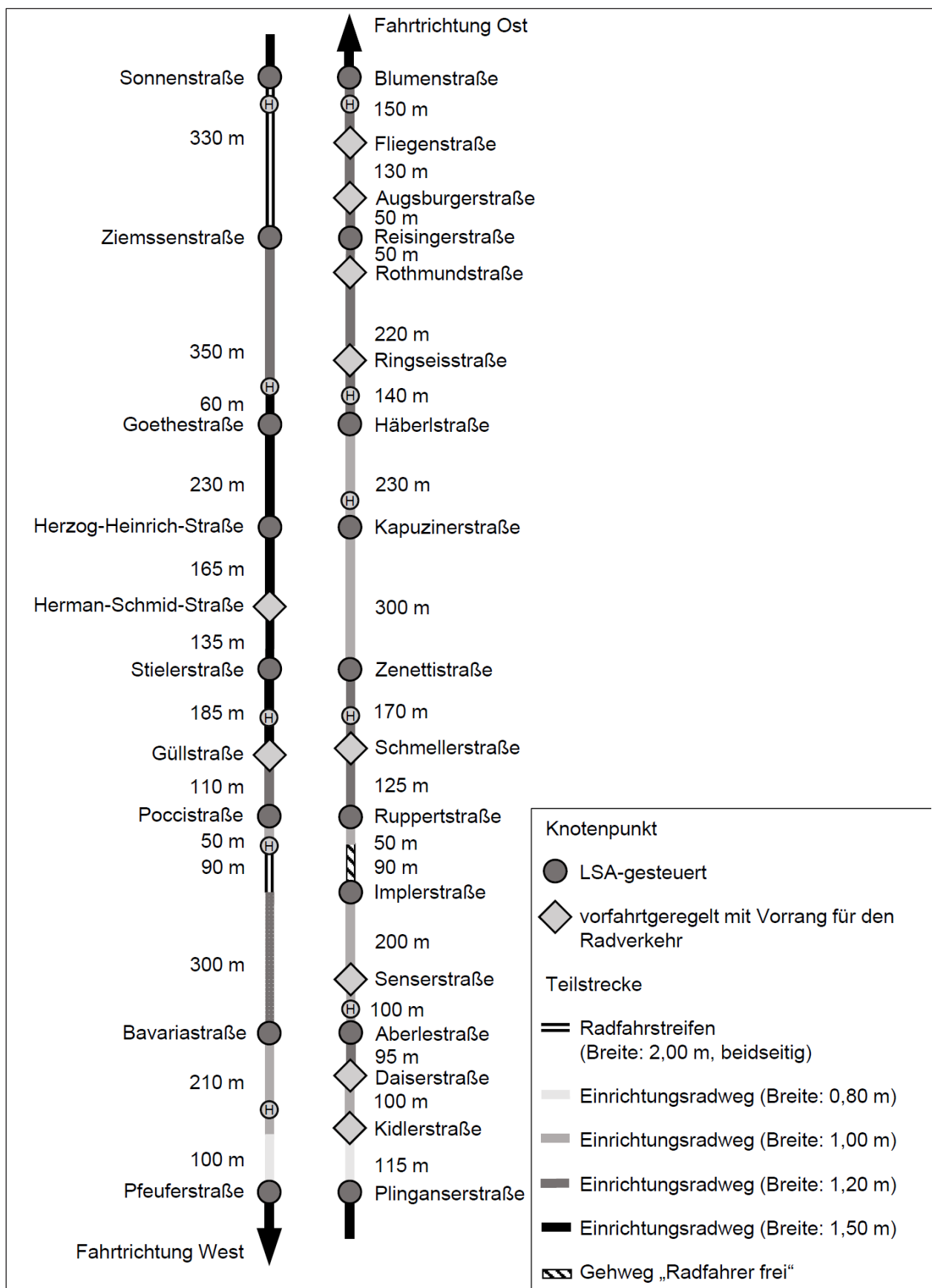


Bild A-17: Schematische Darstellung des Netzabschnitts Lindwurmstraße in München

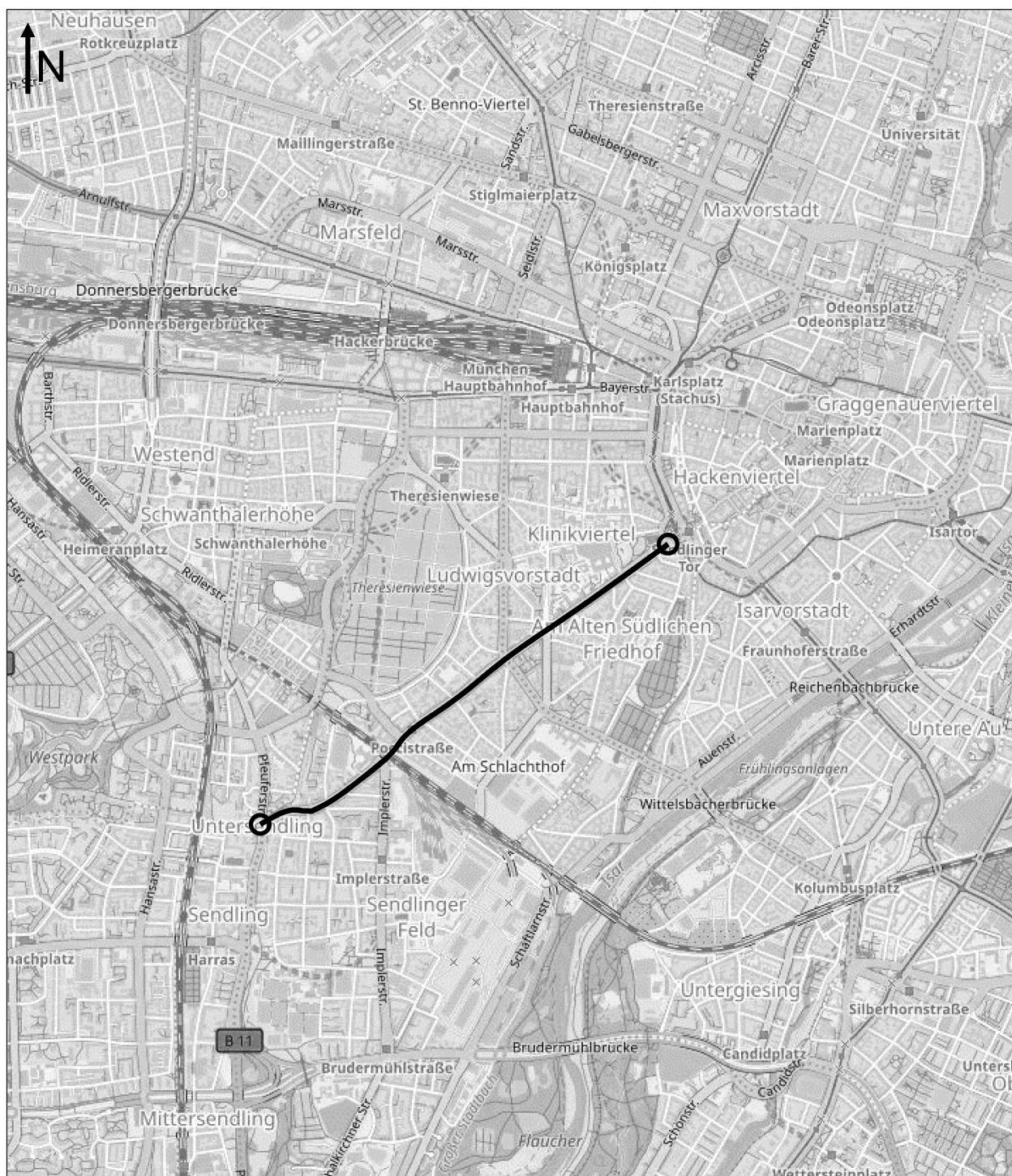


Bild A-18: Lageplan des Netzabschnitts Lindwormstraße in München (Karte: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

Anhang B: Ergebnisse der Analyse des Verkehrsablaufs an Einzelanlagen

Lindwurmstraße in München

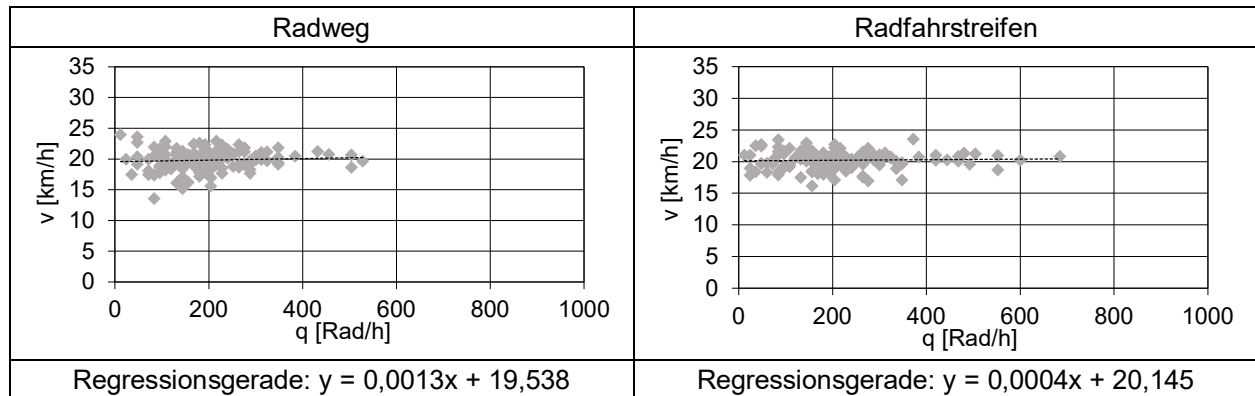


Bild B-1: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für den Radweg (links) und den Radfahrstreifen (rechts) der Lindwurmstraße in München

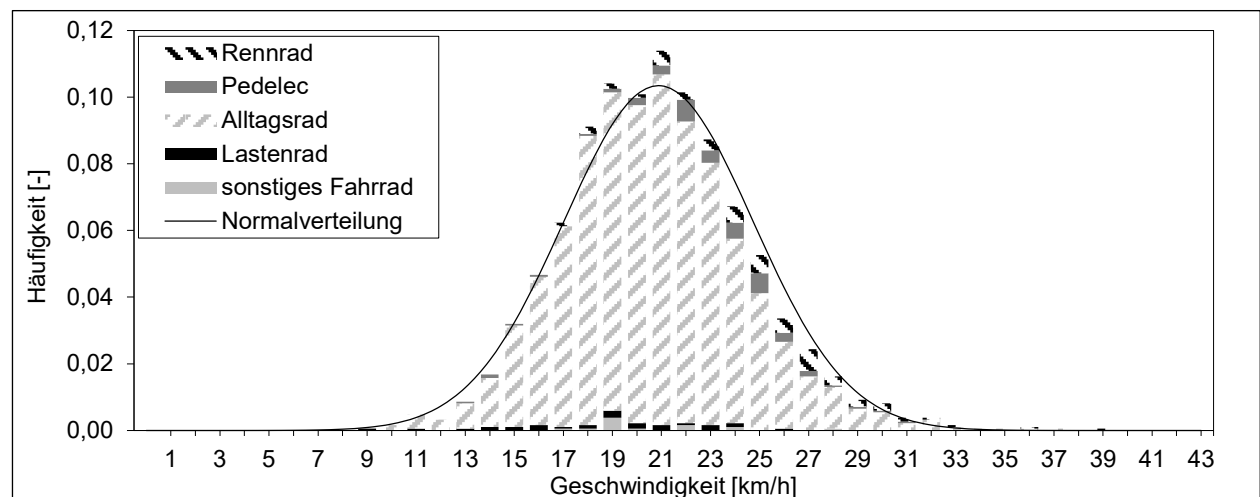


Bild B-2: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Lindwurmstraße in München (Radfahrstreifen)

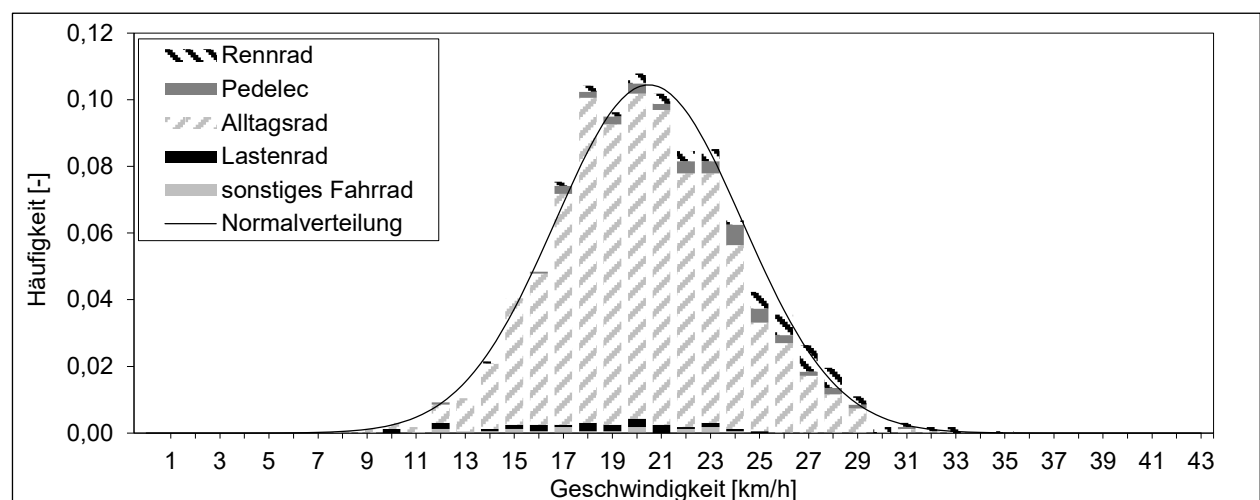


Bild B-3: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Lindwurmstraße in München (Radweg)

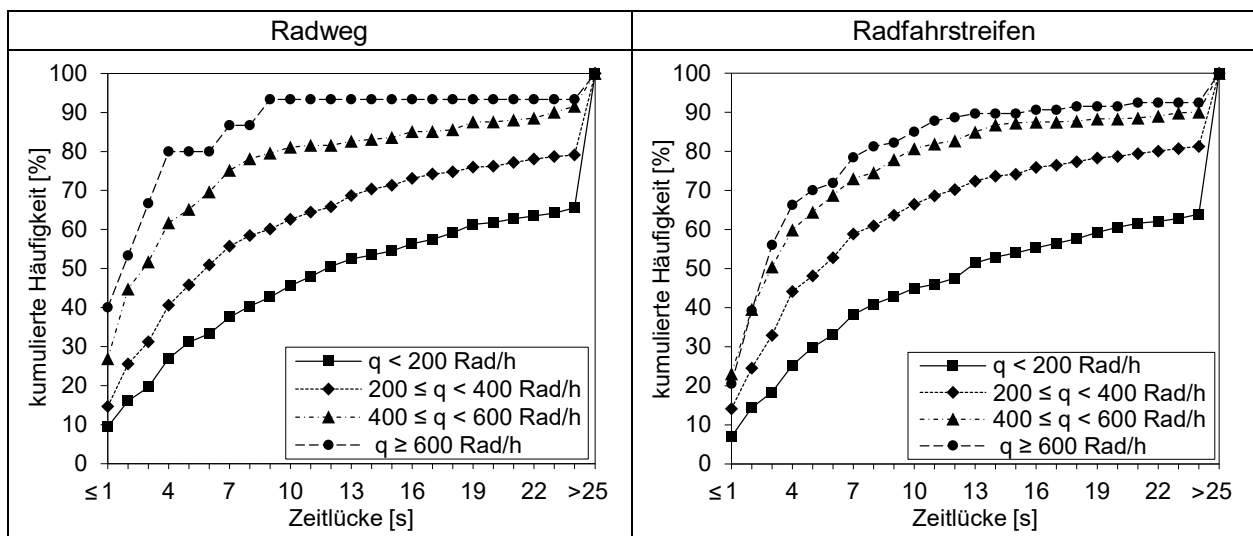


Bild B-4: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für den Radweg (links) und den Radfahrstreifen (rechts) der Lindwurmstraße in München

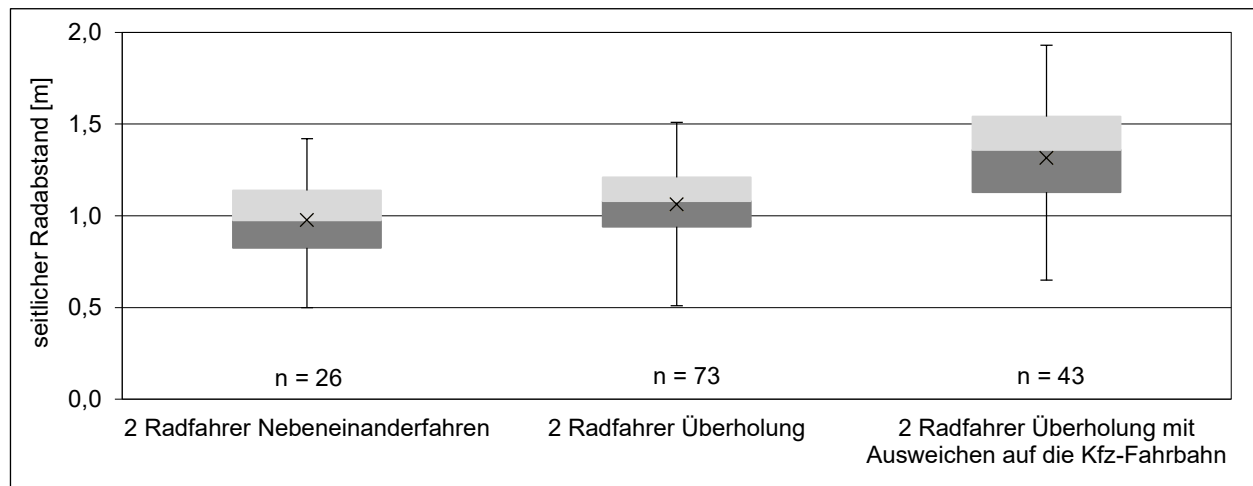


Bild B-5: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Nebeneinanderfahren für die Lindwurmstraße in München (Radfahrstreifen)

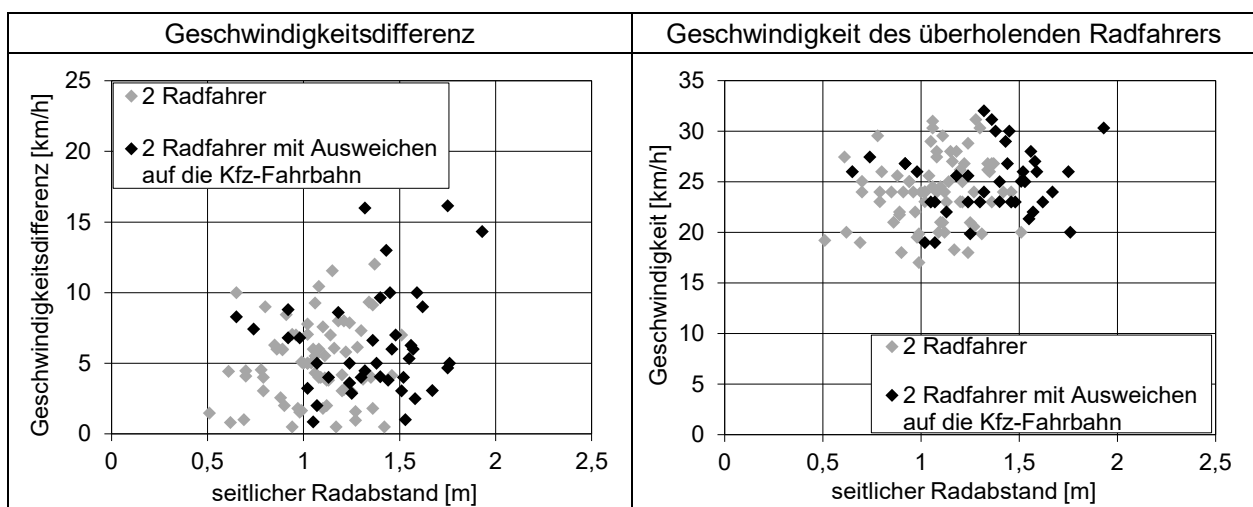


Bild B-6: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) für die Lindwurmstraße in München (Radfahrstreifen)

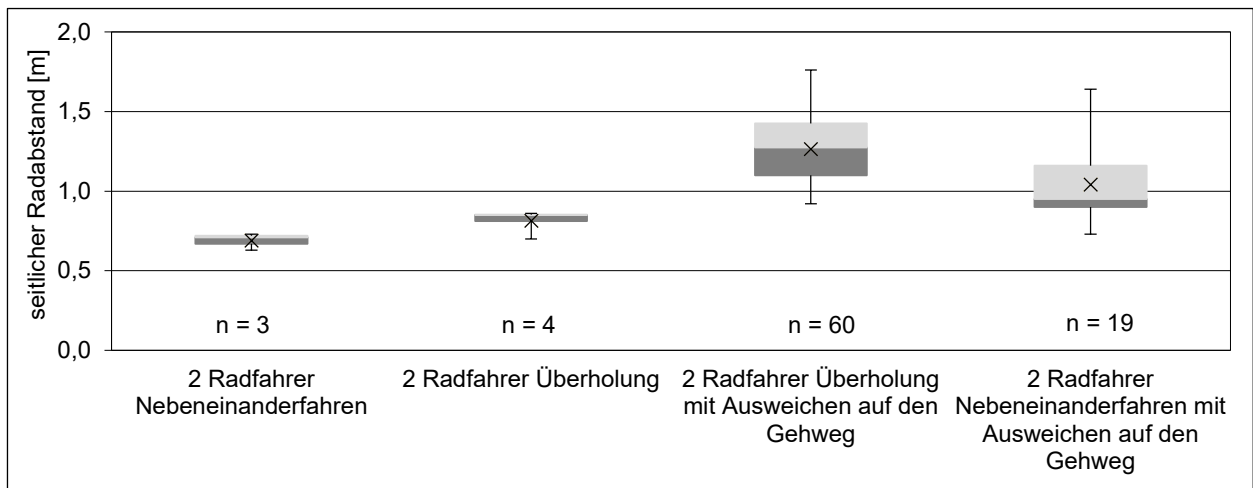


Bild B-7: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Nebeneinanderfahren für die Lindwurmstraße in München (Radweg)

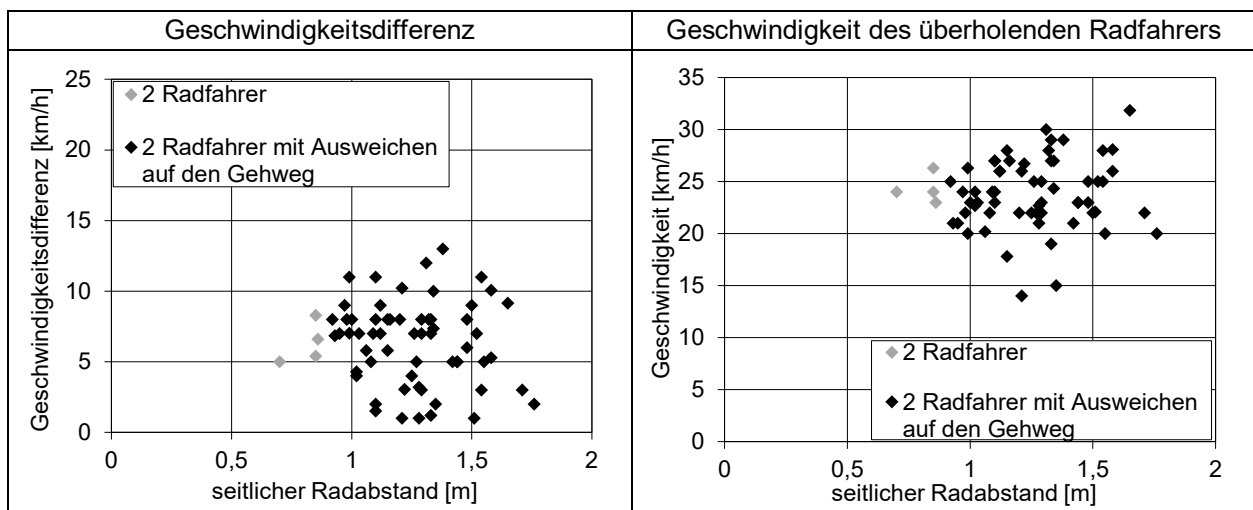


Bild B-8: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) für die Lindwurmstraße in München (Radweg)

Oberbaumbrücke in Berlin

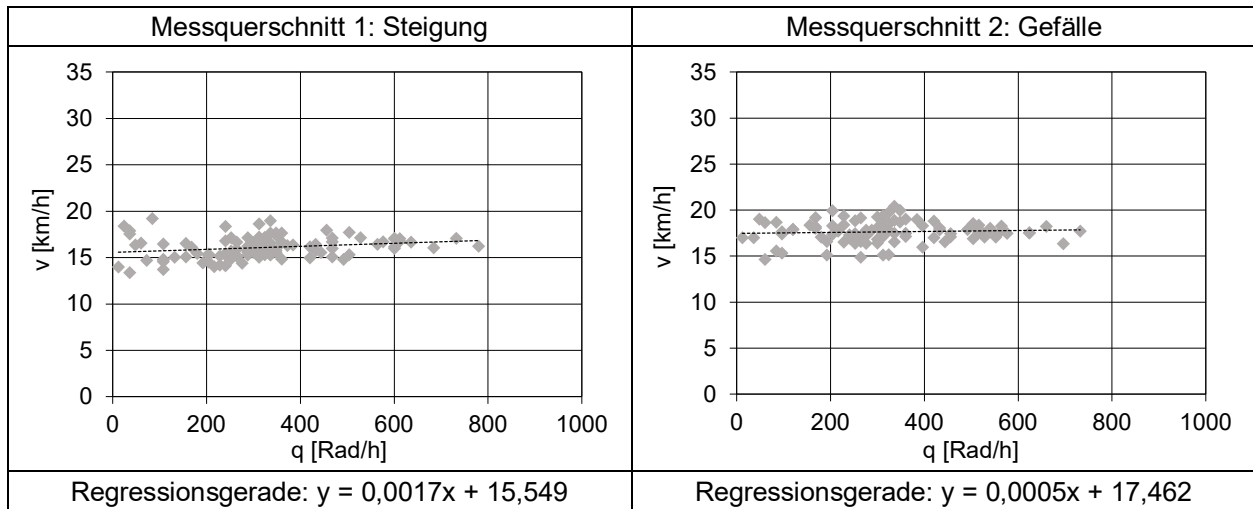


Bild B-9: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für den Messquerschnitt 1 (links) und den Messquerschnitt 2 (rechts) der Oberbaumbrücke in Berlin

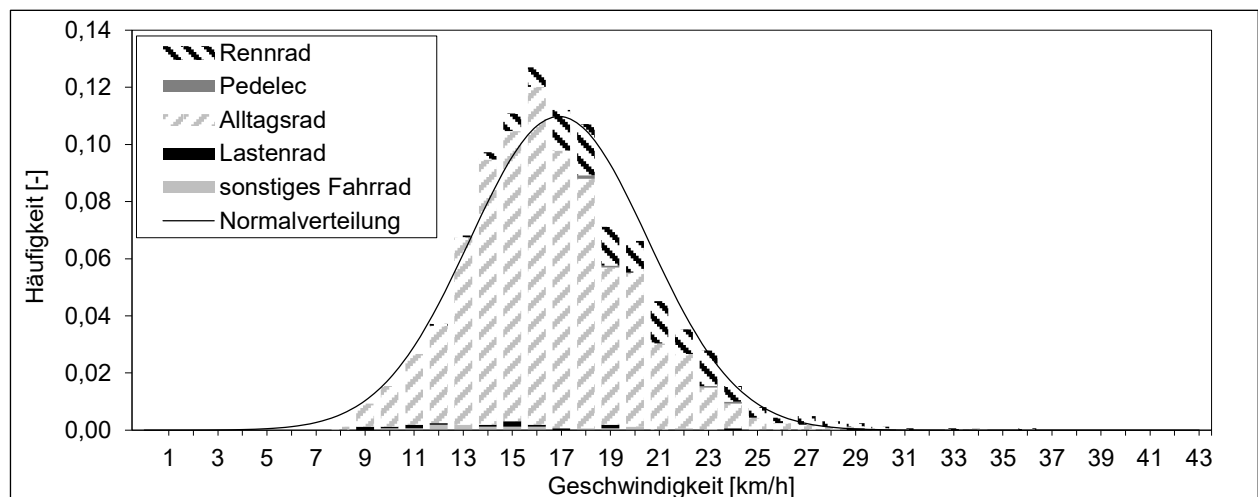


Bild B-10: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Oberbaumbrücke in Berlin (Messquerschnitt 1: Steigung)

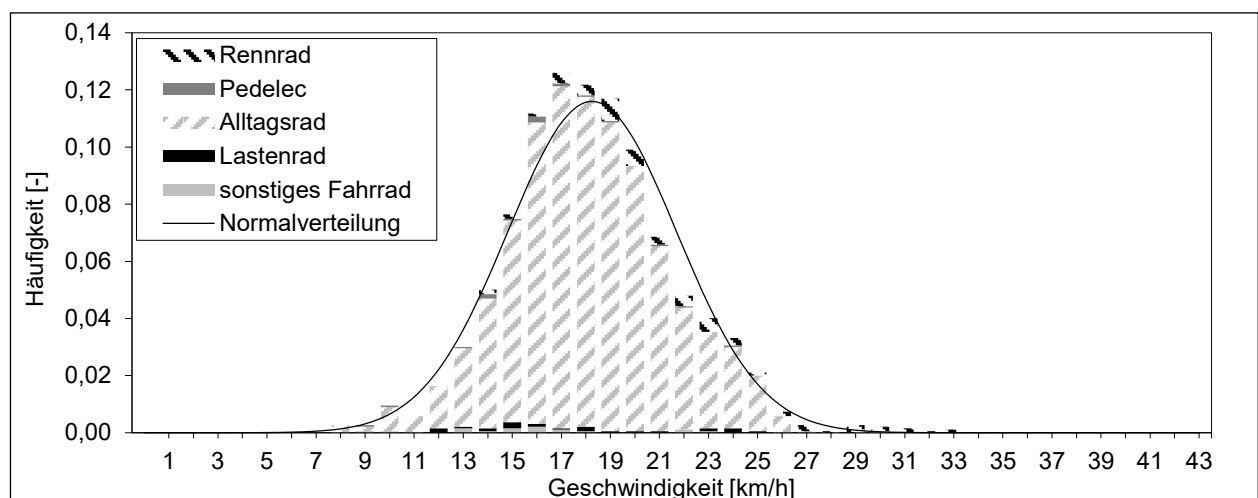


Bild B-11: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Oberbaumbrücke in Berlin (Messquerschnitt 2: Gefälle)

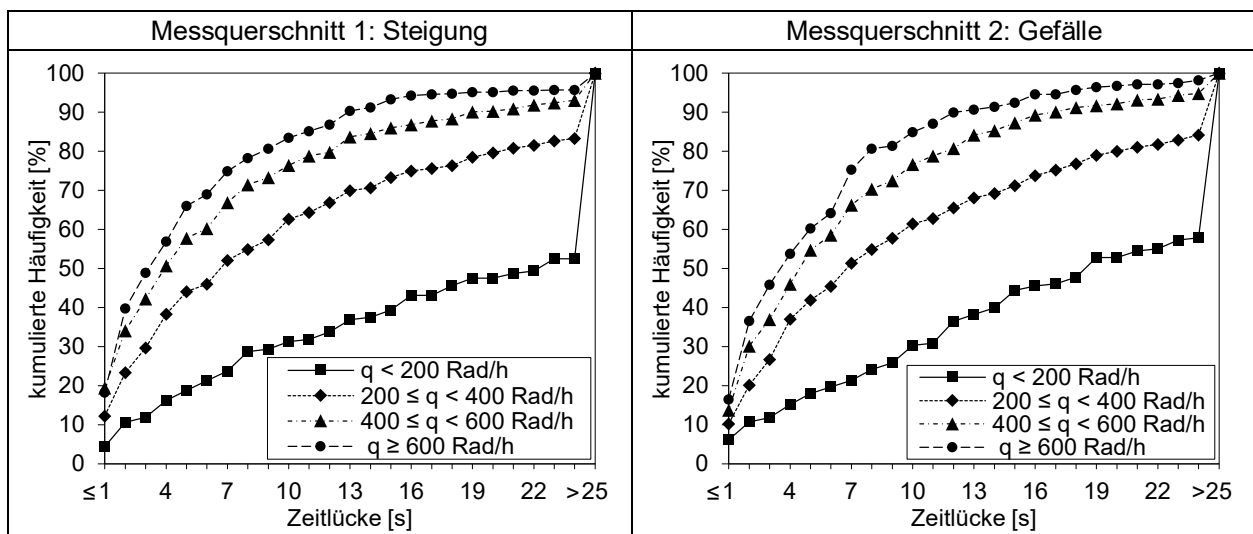


Bild B-12: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für den Messquerschnitt 1 (links) und den Messquerschnitt 2 (rechts) der Oberbaumbrücke in Berlin

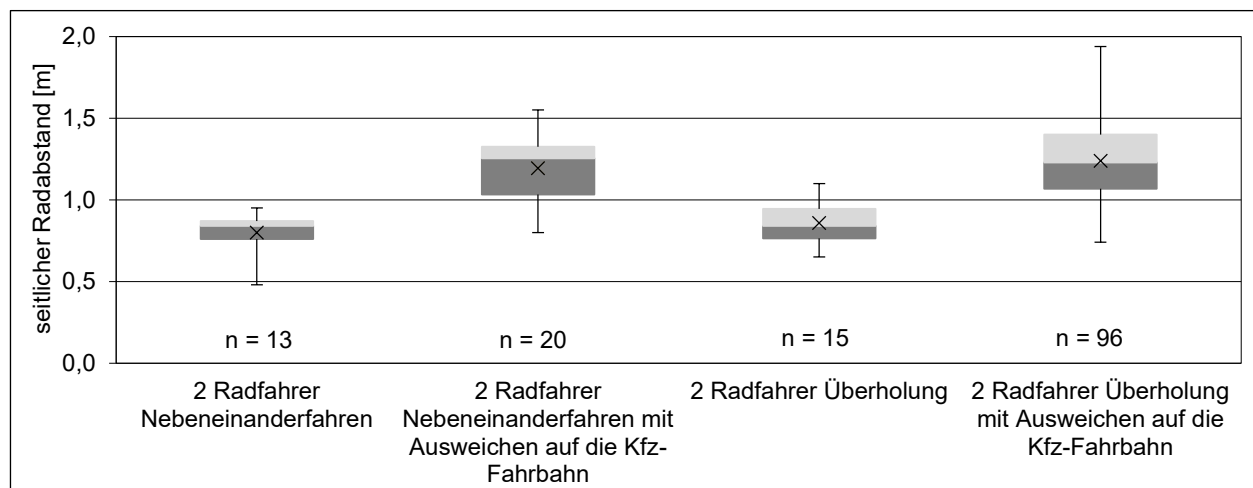


Bild B-13: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Nebeneinanderfahren für die Oberbaumbrücke in Berlin

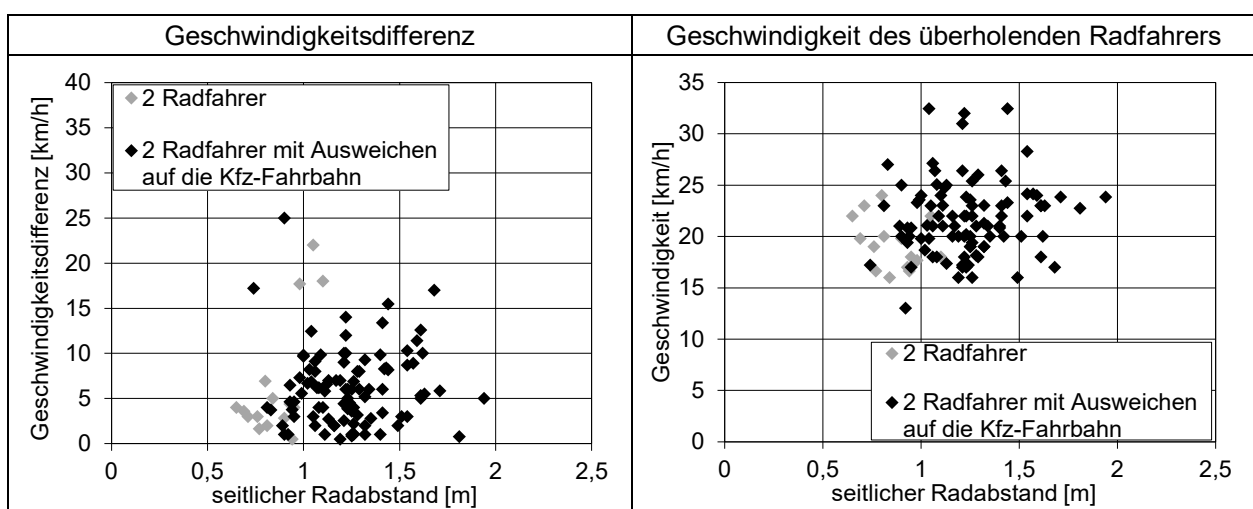


Bild B-14: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) für die Oberbaumbrücke in Berlin

Berliner Straße in Berlin

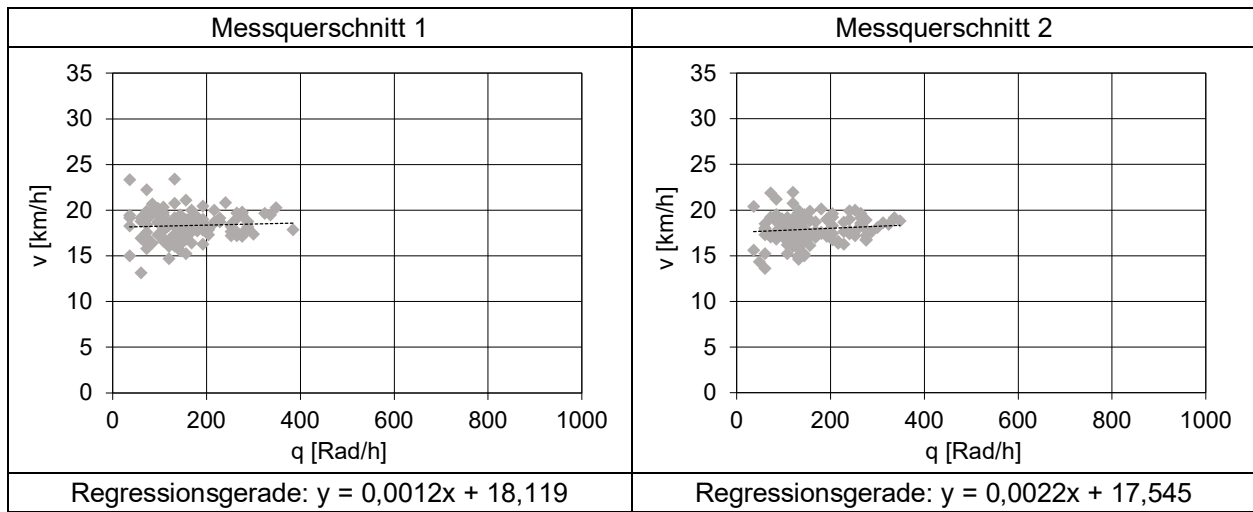


Bild B-15: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für den Messquerschnitt 1 (links) und den Messquerschnitt 2 (rechts) der Berliner Straße in Berlin

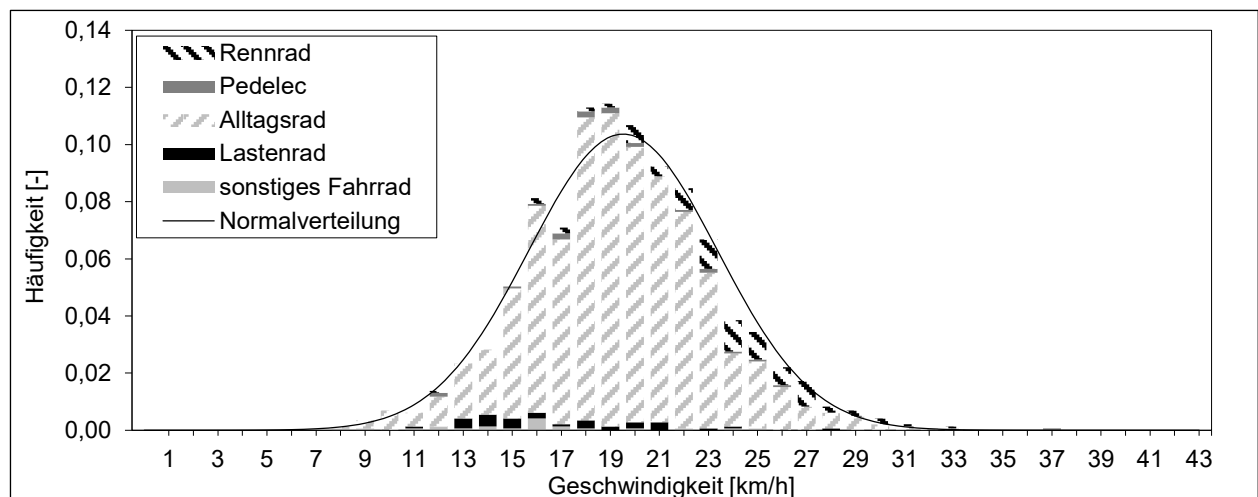


Bild B-16: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Berliner Straße in Berlin (Messquerschnitt 1)

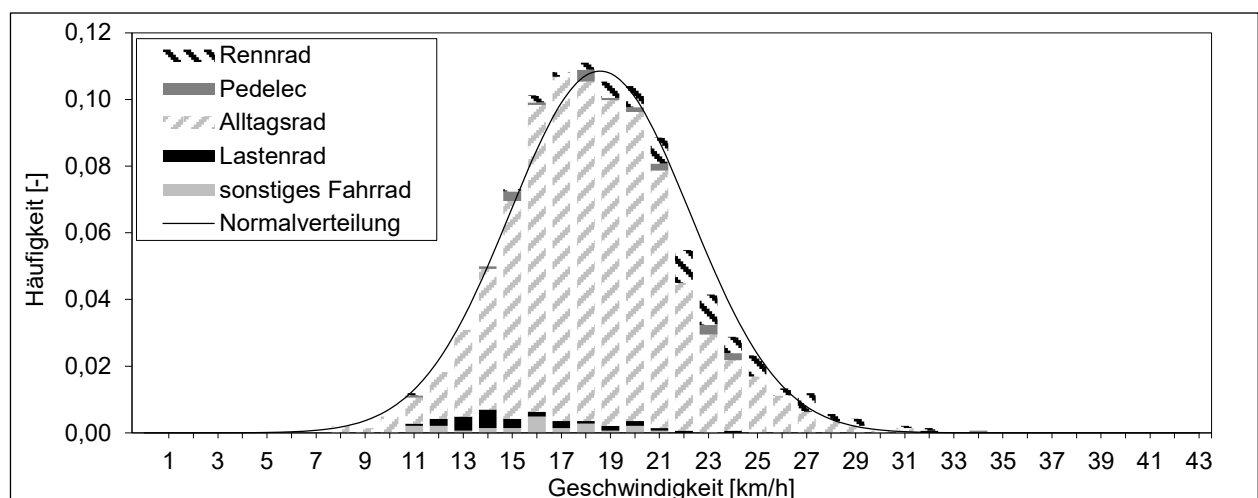


Bild B-17: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Berliner Straße in Berlin (Messquerschnitt 2)

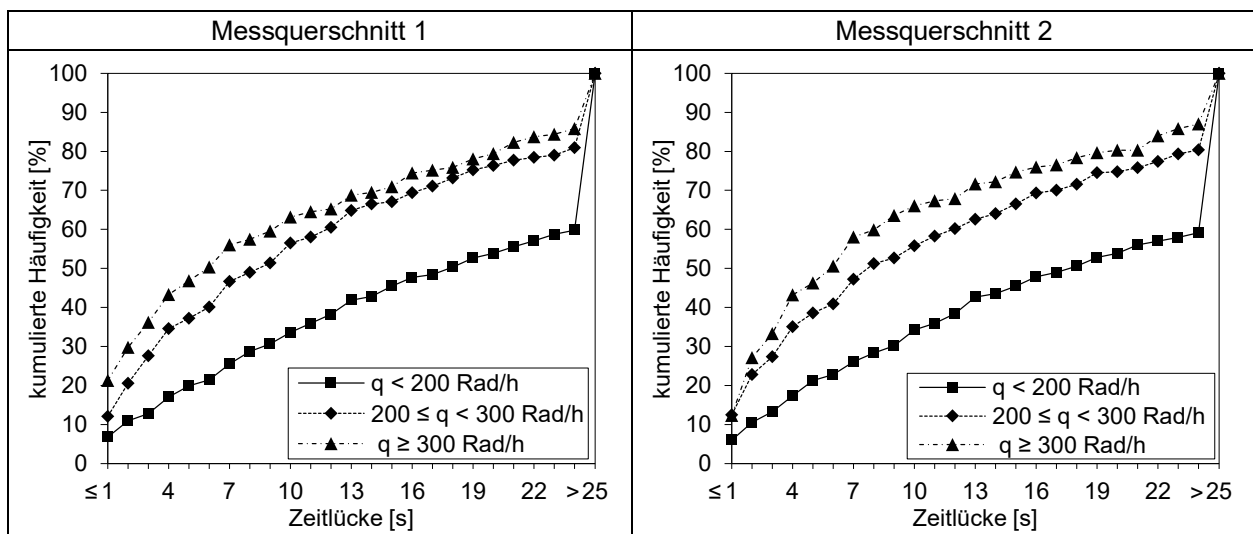


Bild B-18: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für den Messquerschnitt 1 (links) und den Messquerschnitt 2 (rechts) der Berliner Straße in Berlin

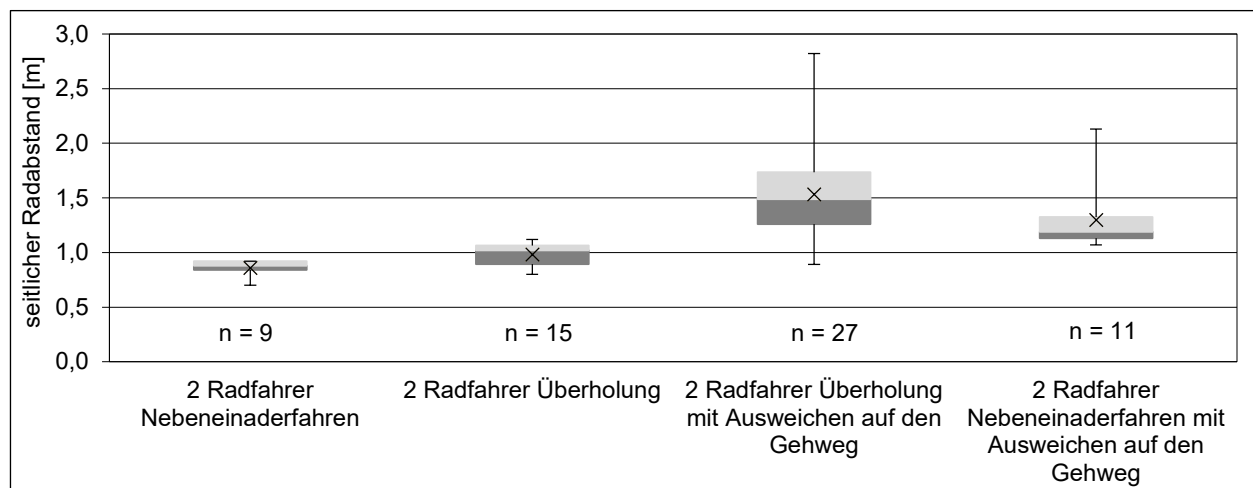


Bild B-19: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Nebeneinanderfahren für die Berliner Straße in Berlin

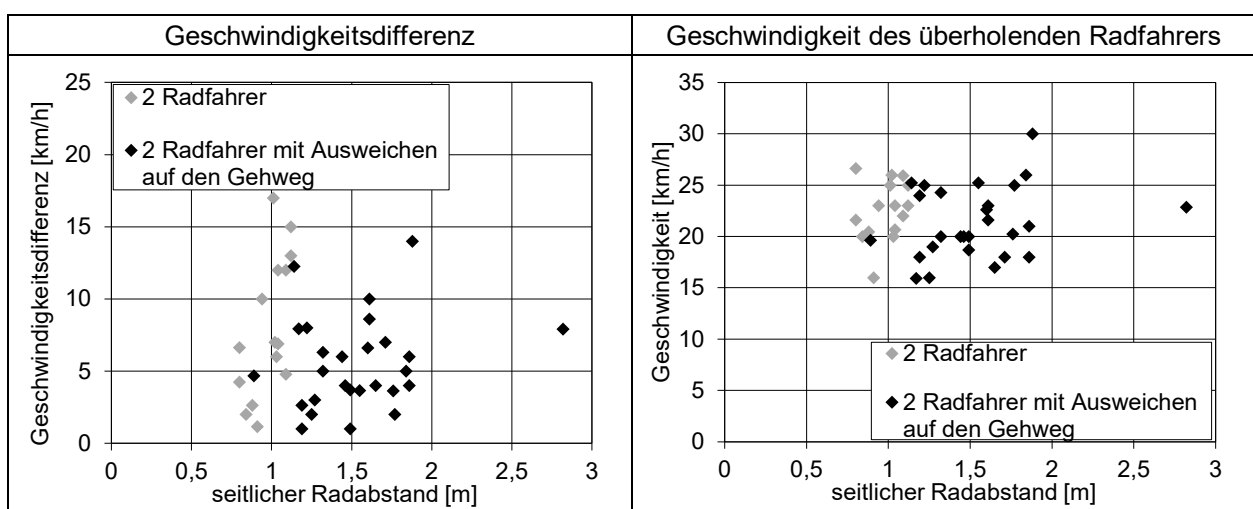


Bild B-20: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) für die Berliner Straße in Berlin

Warendorfer Straße in Münster

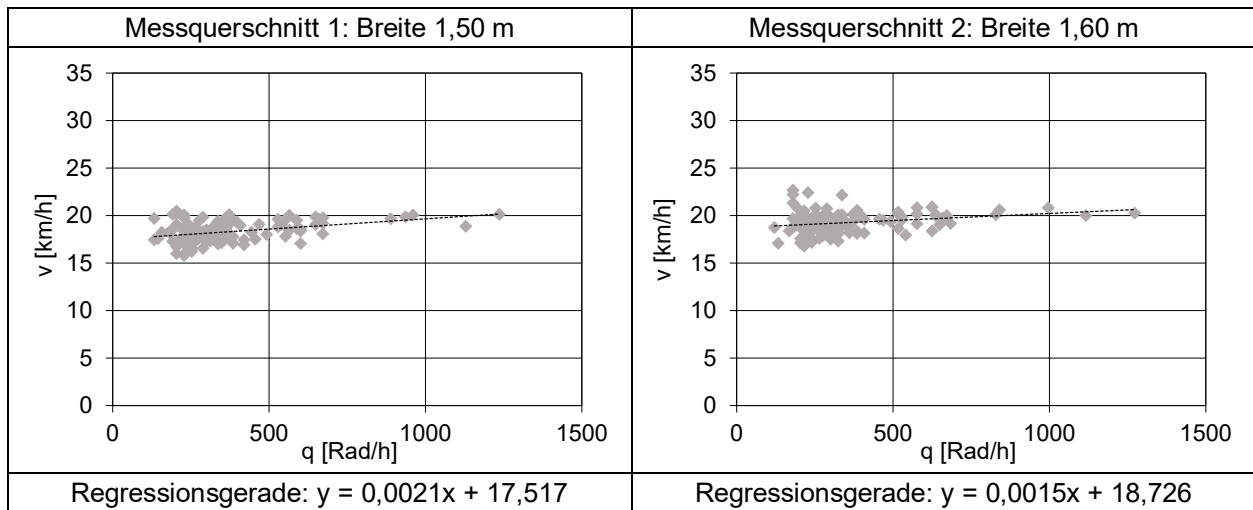


Bild B-21: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für den Messquerschnitt 1 (links) und den Messquerschnitt 2 (rechts) der Warendorfer Straße in Münster

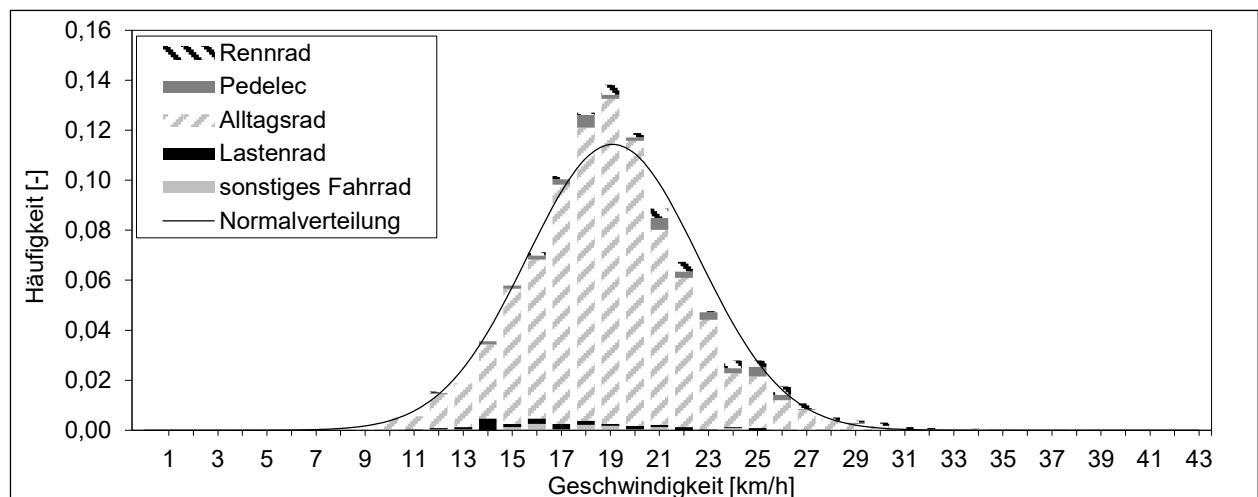


Bild B-22: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Warendorfer Straße in Münster (Messquerschnitt 1: Breite 1,50 m)

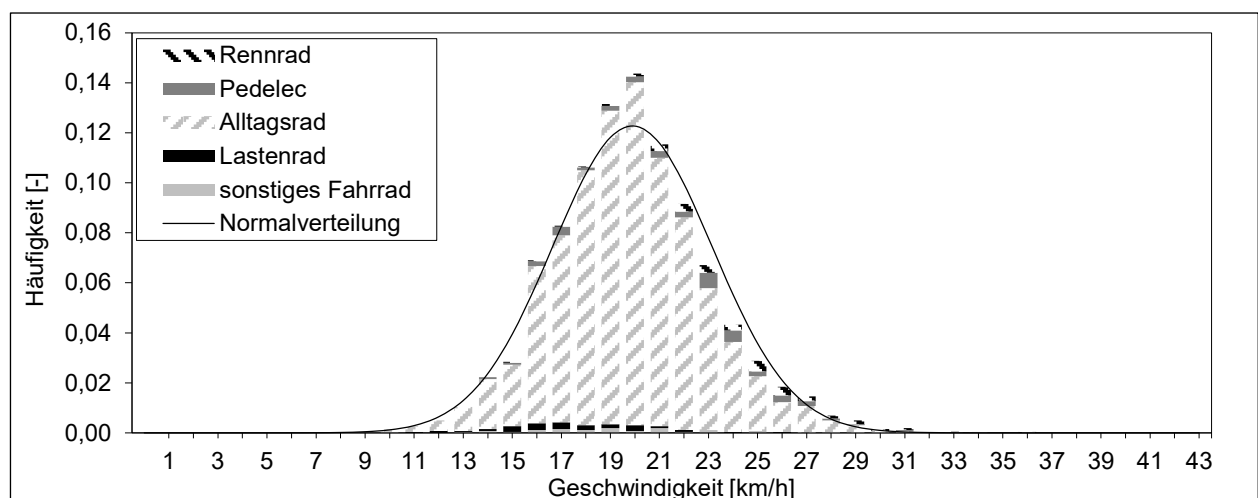


Bild B-23: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Warendorfer Straße in Münster (Messquerschnitt 2: Breite 1,60 m)

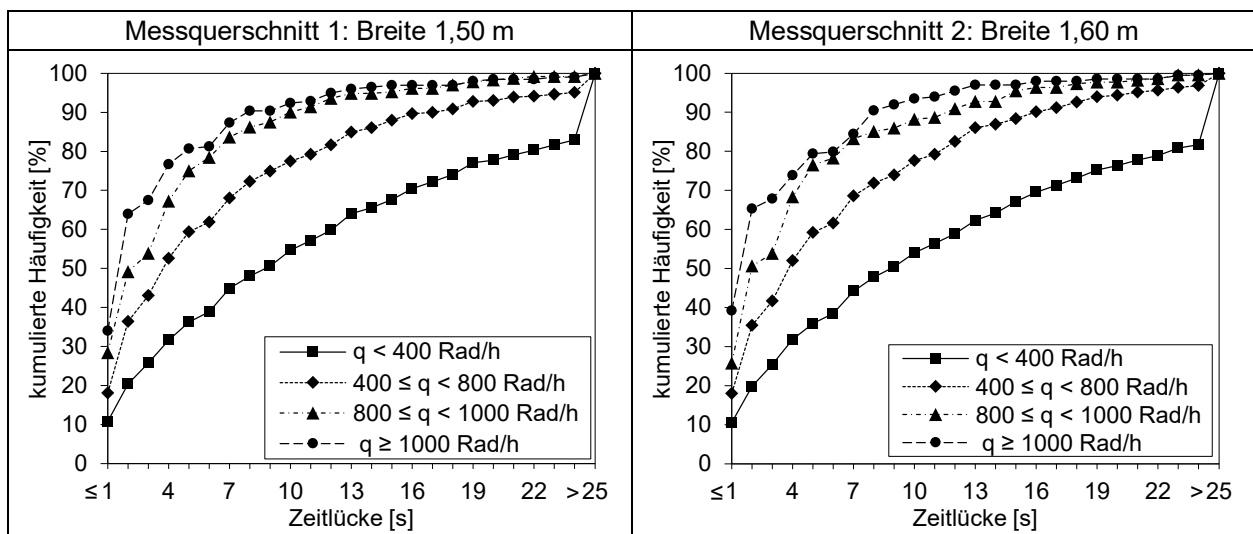


Bild B-24: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für den Messquerschnitt 1 (links) und den Messquerschnitt 2 (rechts) der Warendorfer Straße in Münster

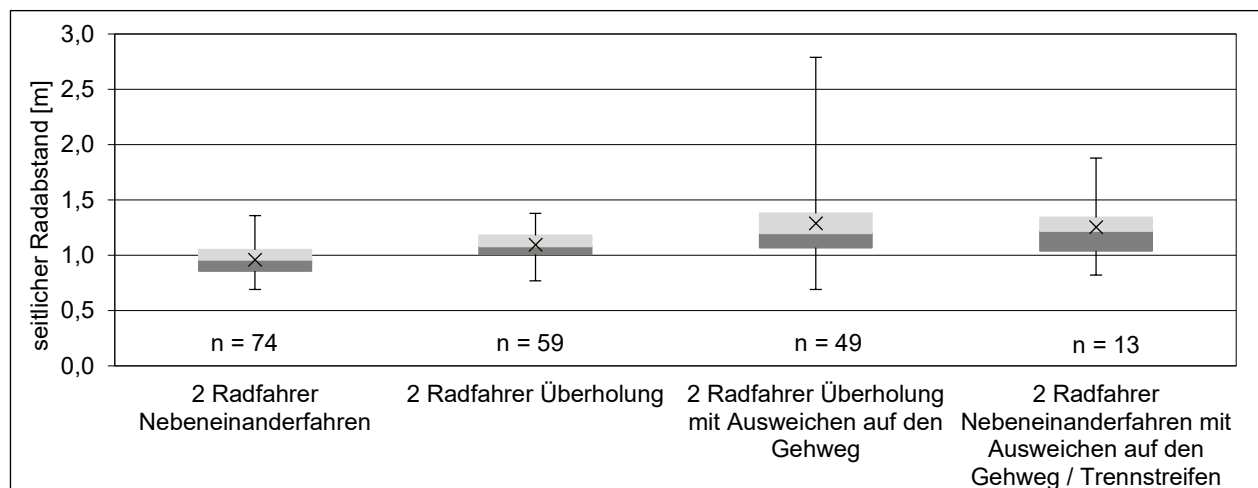


Bild B-25: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Nebeneinanderfahren für die Warendorfer Straße in Münster

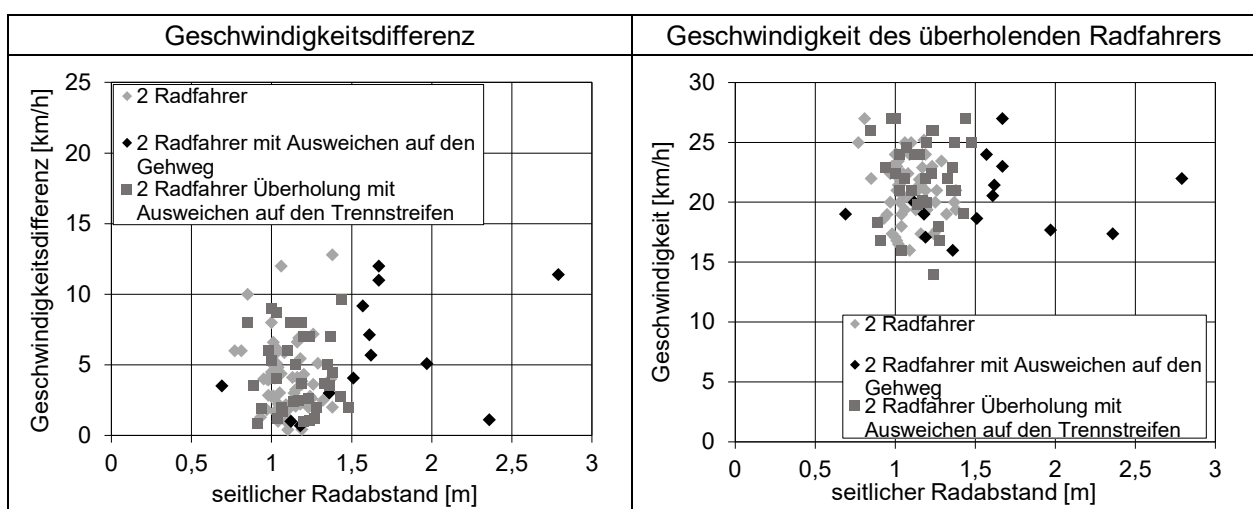


Bild B-26: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) für die Warendorfer Straße in Münster

Wolbecker Straße in Münster

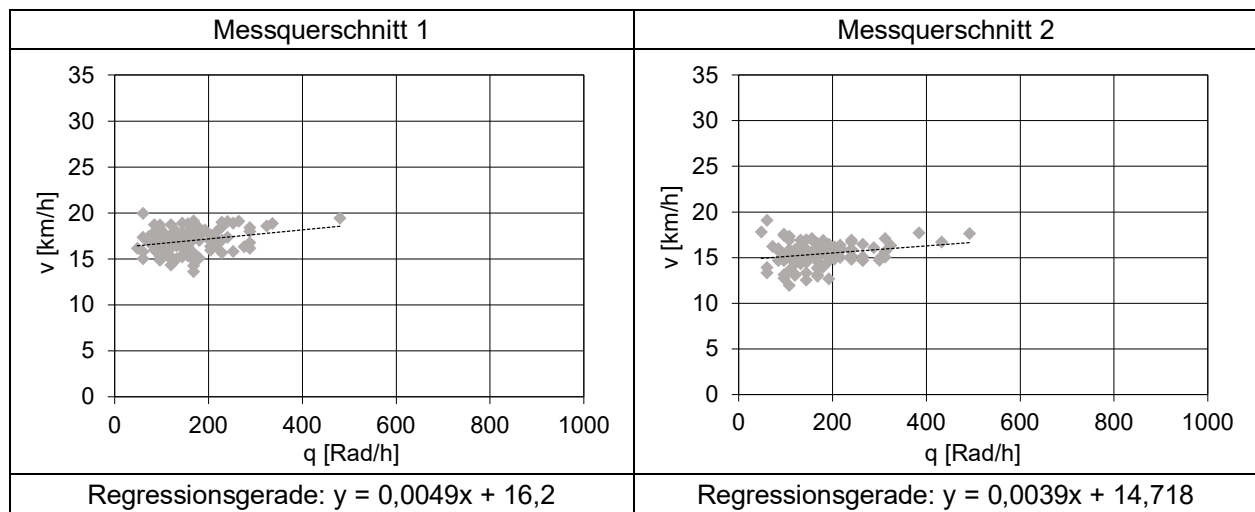


Bild B-27: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für den Radweg (links) und den Radfahrstreifen (rechts) der Wolbecker Straße in Münster

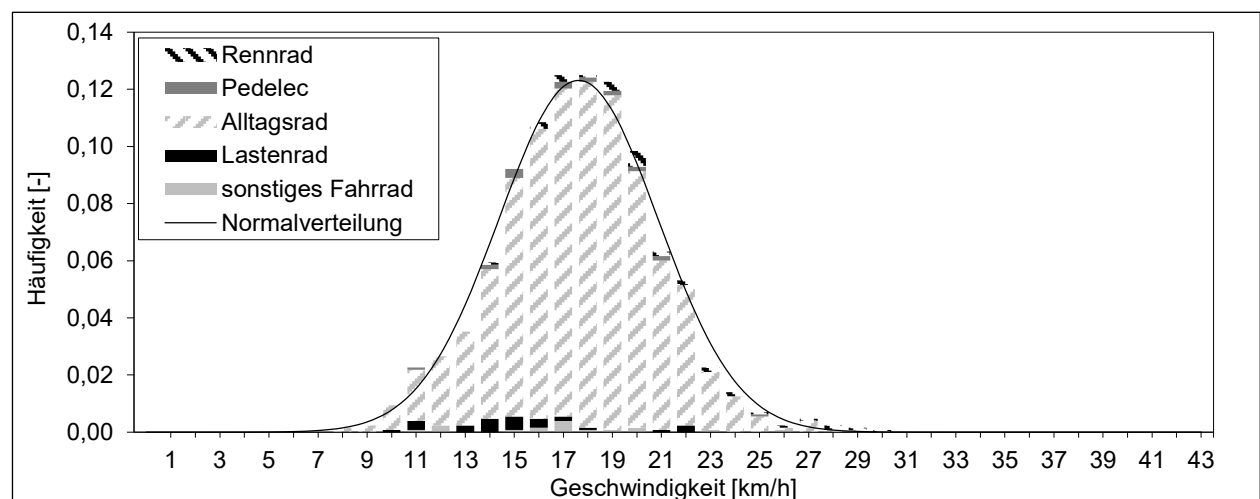


Bild B-28: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Wolbecker Straße in Münster (Messquerschnitt 1)

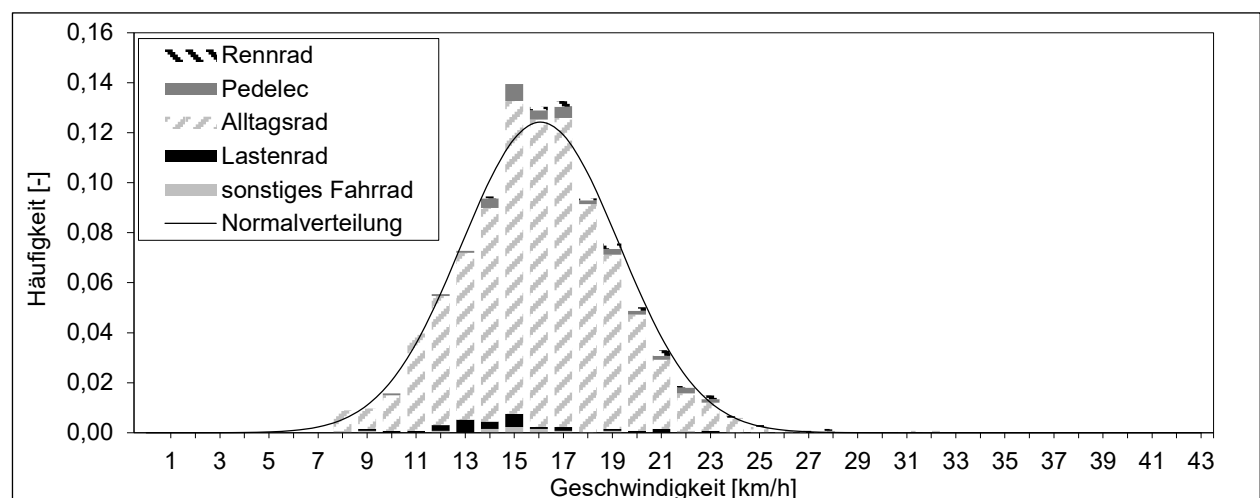


Bild B-29: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Wolbecker Straße in Münster (Messquerschnitt 2)

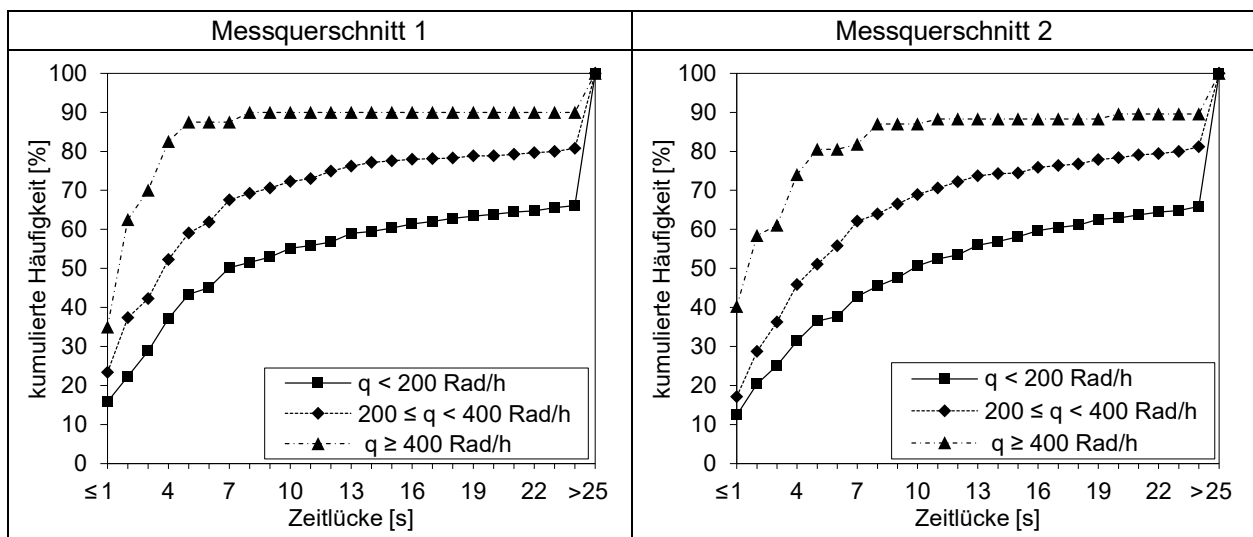


Bild B-30: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für den Messquerschnitt 1 (links) und den Messquerschnitt 2 (rechts) der Wolbecker Straße in Münster

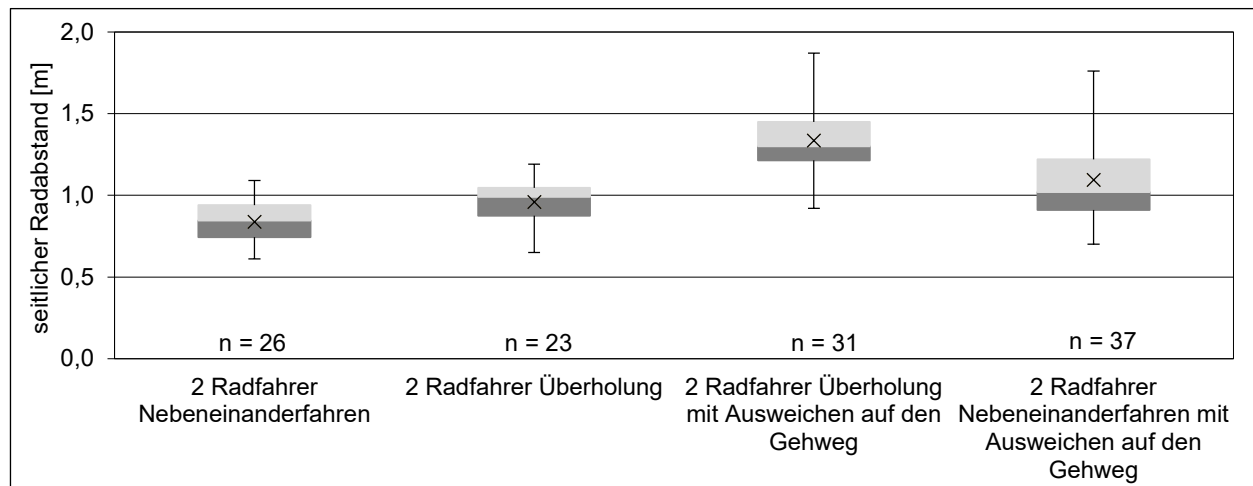


Bild B-31: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Nebeneinanderfahren für die Wolbecker Straße in Münster

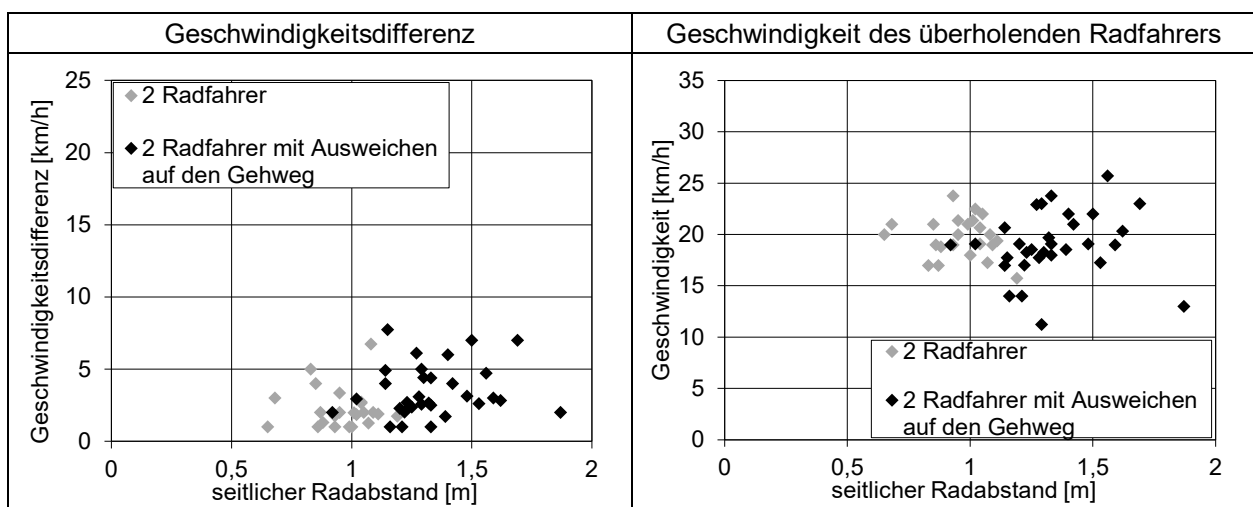


Bild B-32: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) für die Wolbecker Straße in Münster

Eschholzstraße in Freiburg

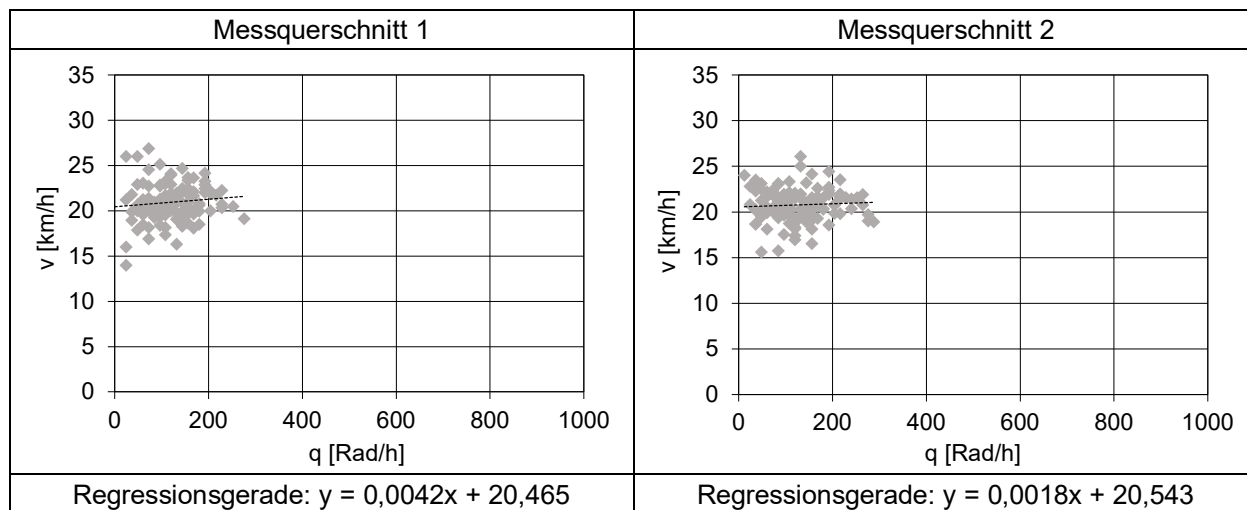


Bild B-33: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für den Messquerschnitt 1 (links) und den Messquerschnitt 2 (rechts) der Eschholzstraße in Freiburg

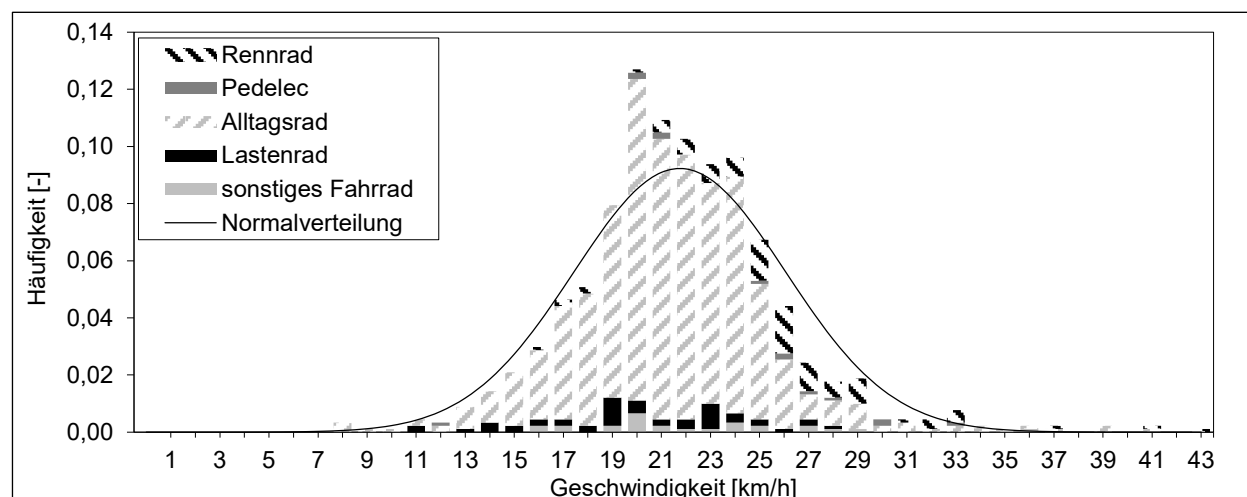


Bild B-34: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Eschholzstraße in Freiburg (Messquerschnitt 1)

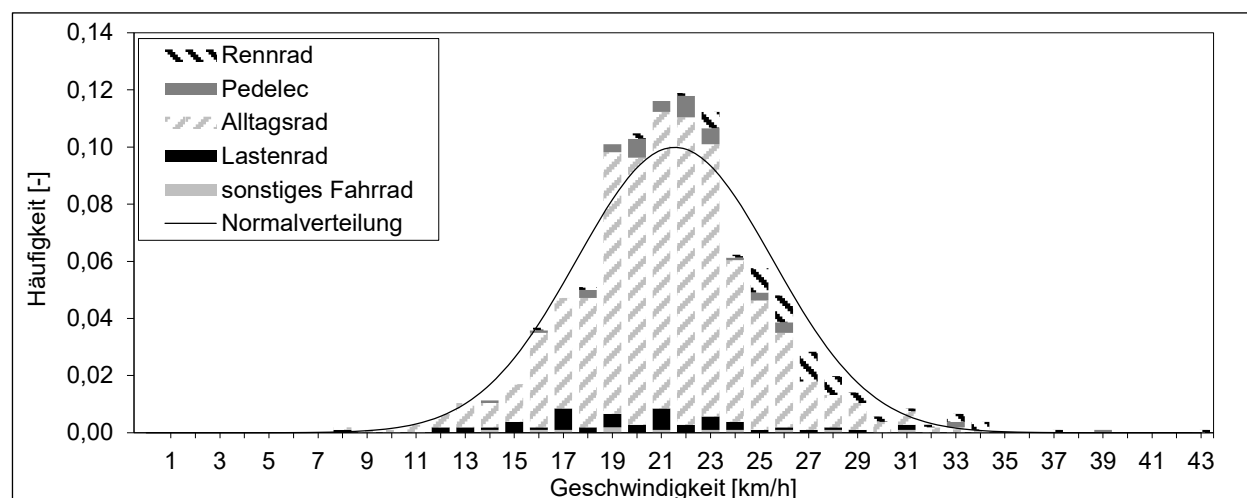


Bild B-35: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Eschholzstraße in Freiburg (Messquerschnitt 2)

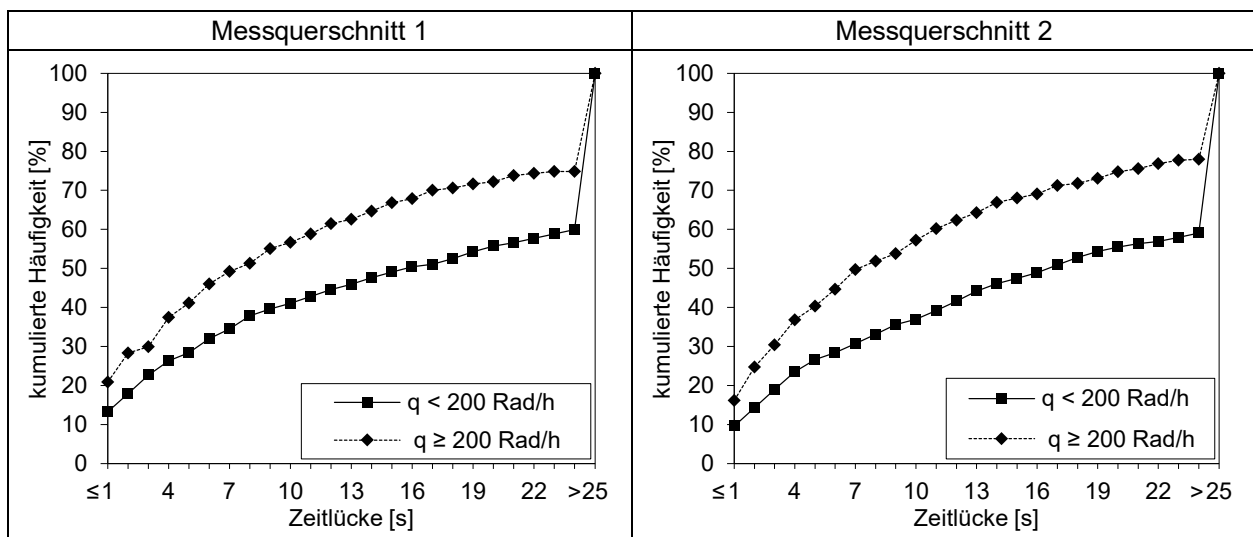


Bild B-36: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für den Messquerschnitt 1 (links) und den Messquerschnitt 2 (rechts) der Eschholzstraße in Freiburg

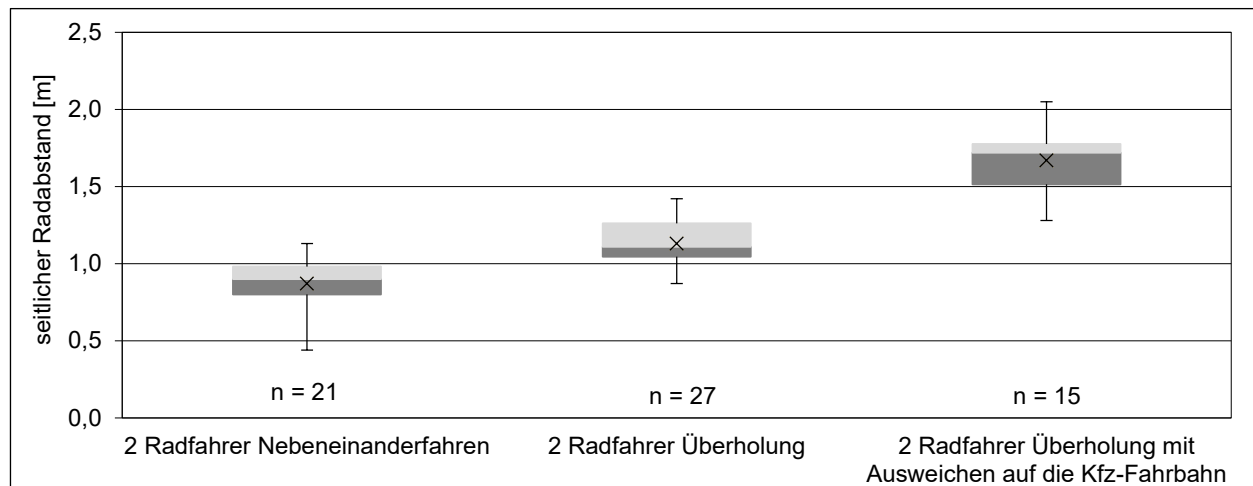


Bild B-37: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Nebeneinanderfahren für die Eschholzstraße in Freiburg

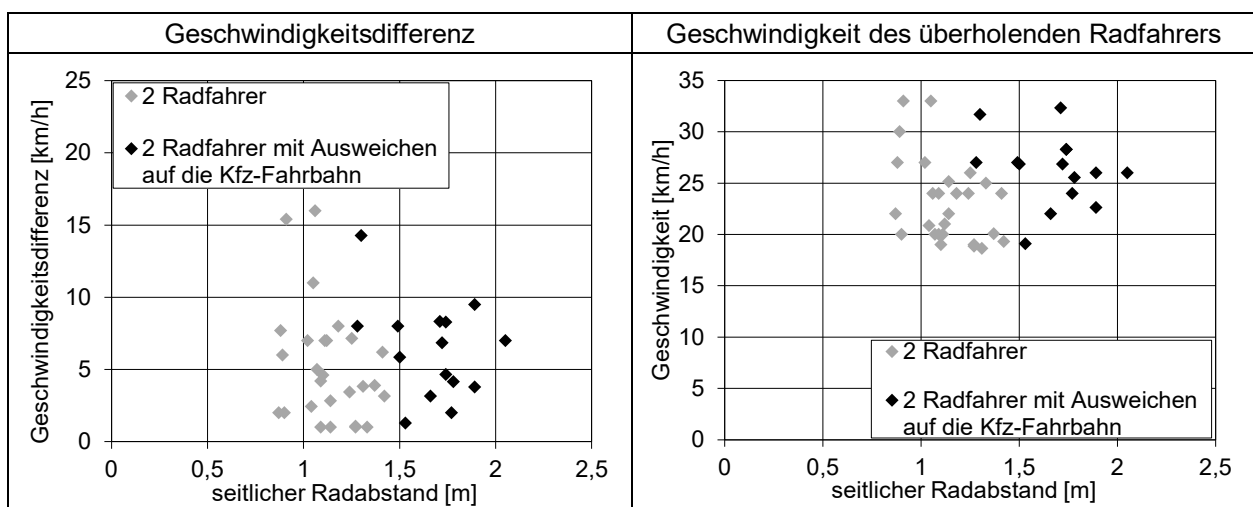


Bild B-38: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) für die Eschholzstraße in Freiburg

Promenade in Münster

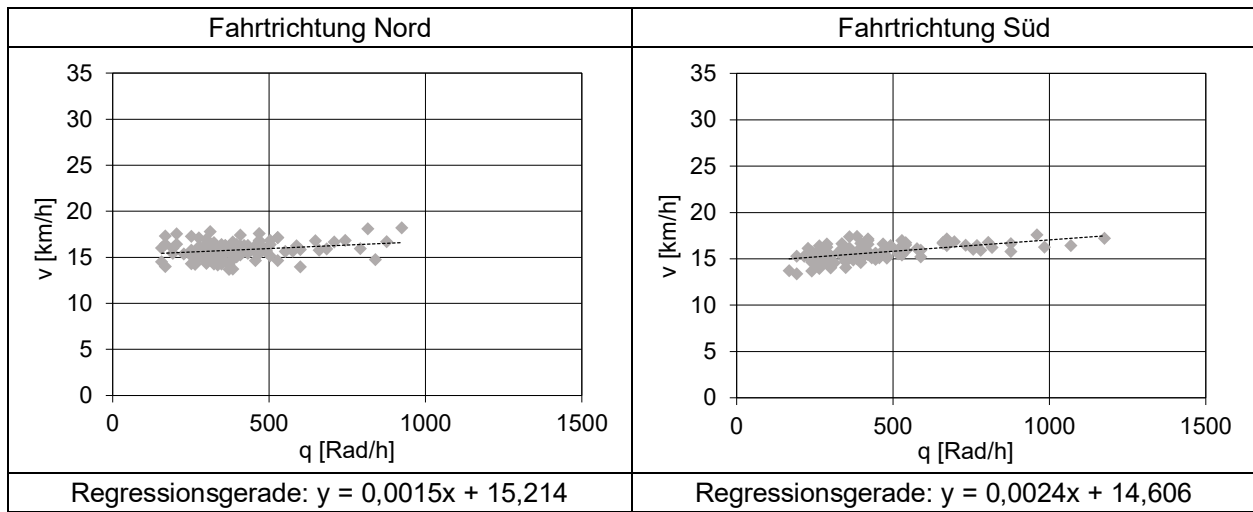


Bild B-39: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung Nord (links) und die Fahrtrichtung Süd (rechts) der Promenade in Münster

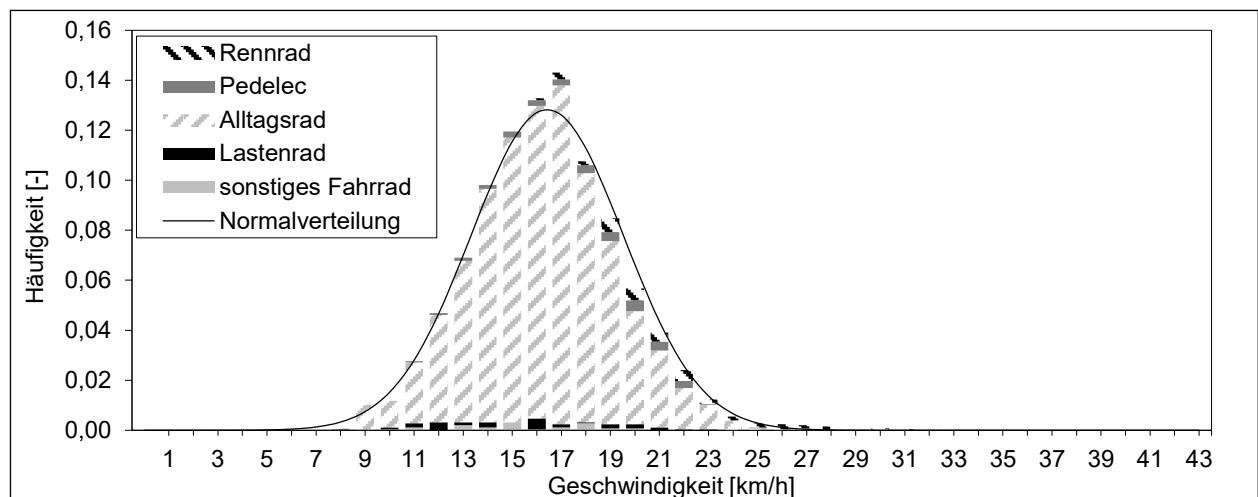


Bild B-40: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Promenade in Münster (Fahrtrichtung Nord)

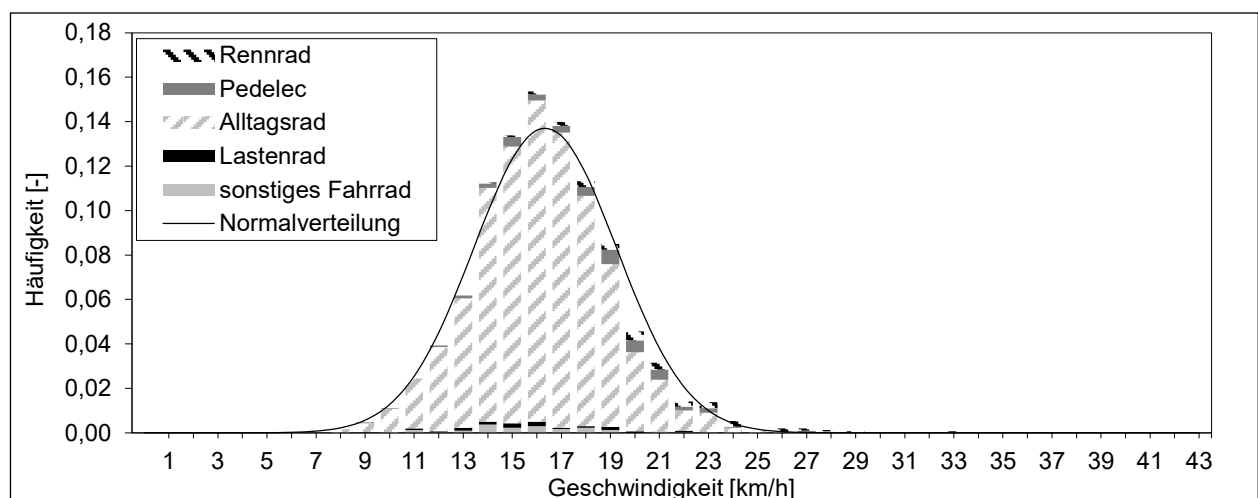


Bild B-41: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Promenade in Münster (Fahrtrichtung Süd)

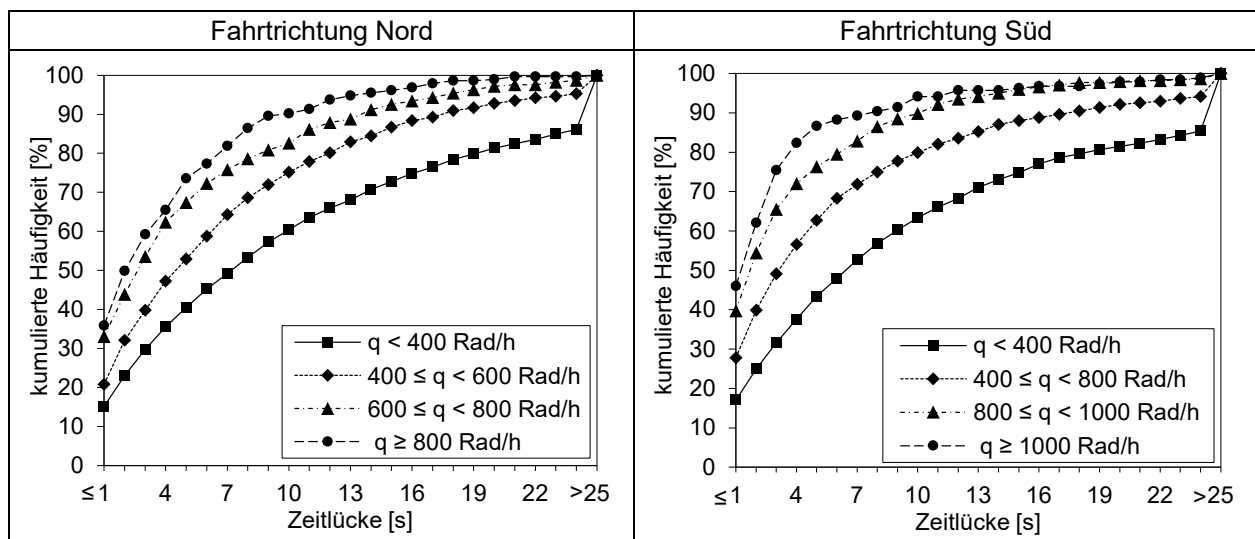


Bild B-42: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung Nord (links) und die Fahrtrichtung Süd (rechts) der Promenade in Münster

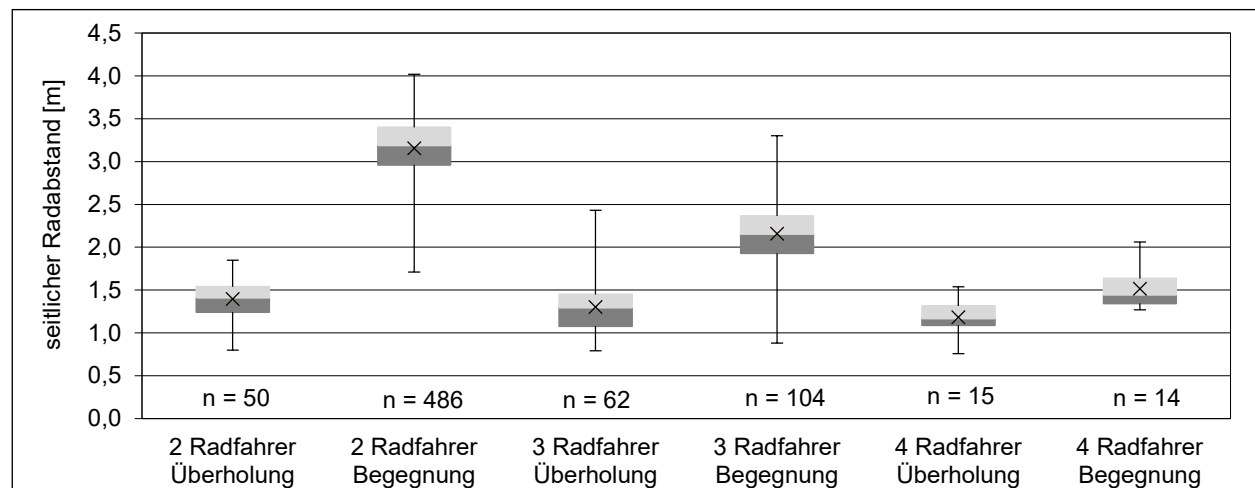


Bild B-43: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Begegnungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für die Promenade in Münster

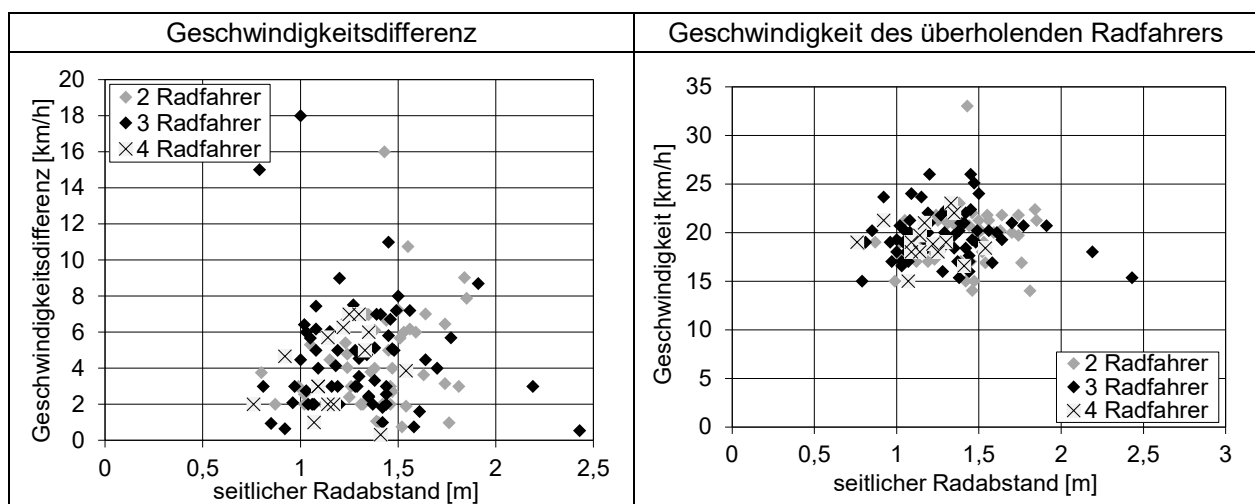


Bild B-44: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für die Promenade in Münster

An der Alster in Hamburg

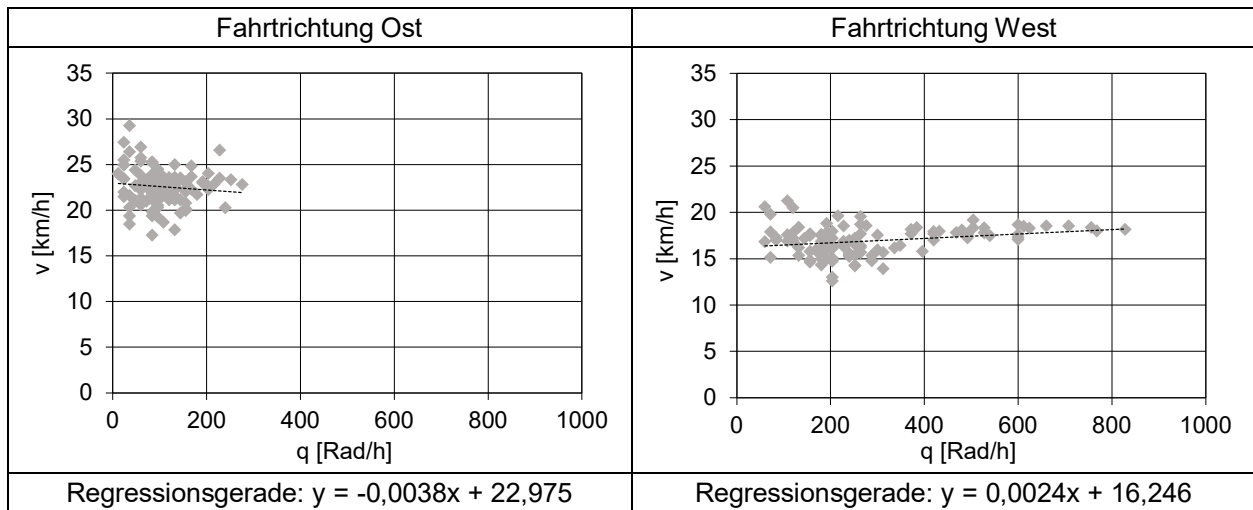


Bild B-45: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung Ost (links) und die Fahrtrichtung West (rechts) der Radverkehrsanlage „An der Alster“ in Hamburg

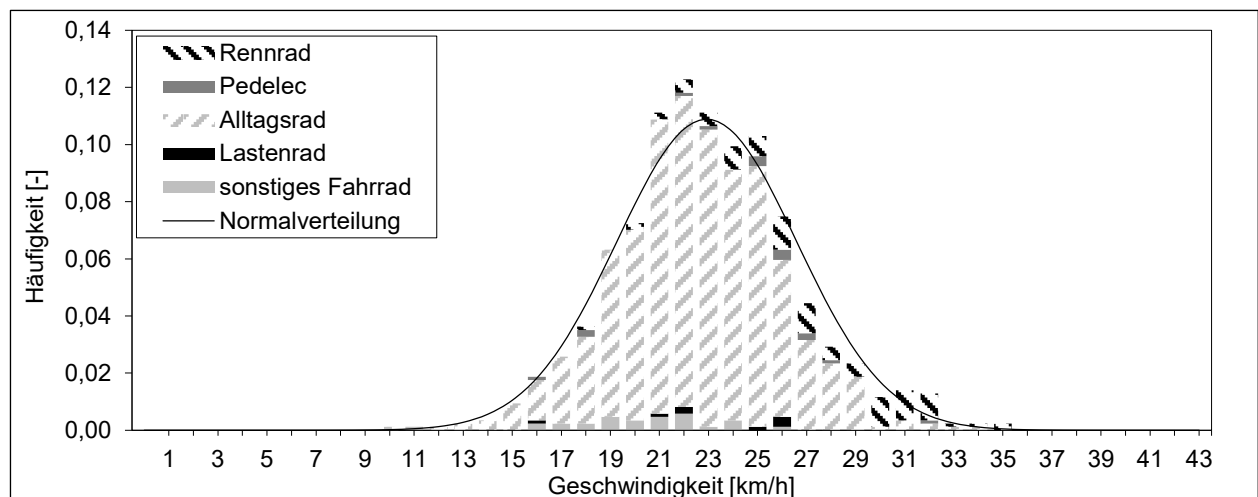


Bild B-46: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Radverkehrsanlage „An der Alster“ in Hamburg (Fahrtrichtung Ost)

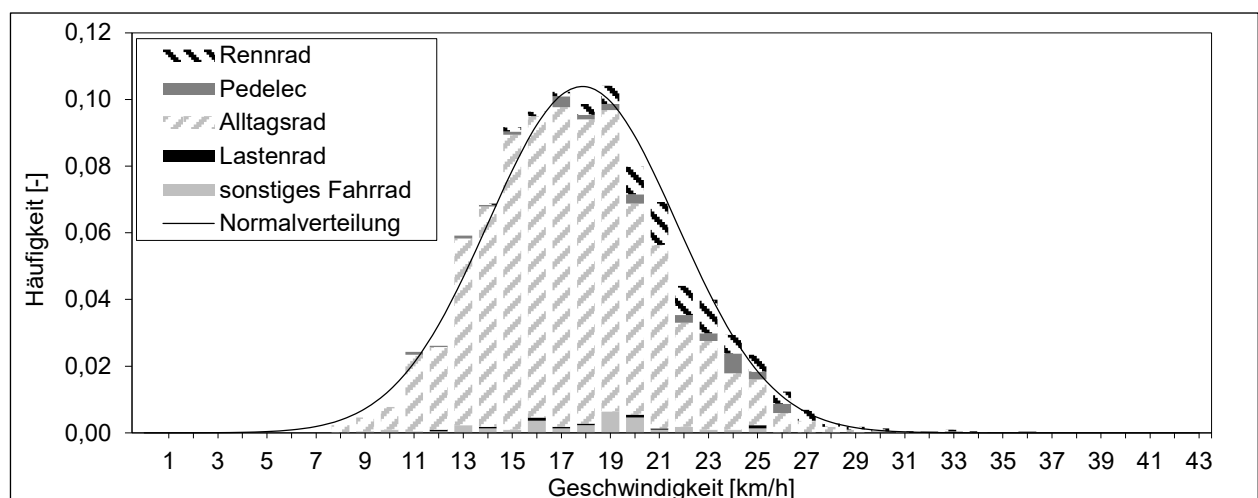


Bild B-47: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Radverkehrsanlage „An der Alster“ in Hamburg (Fahrtrichtung West)

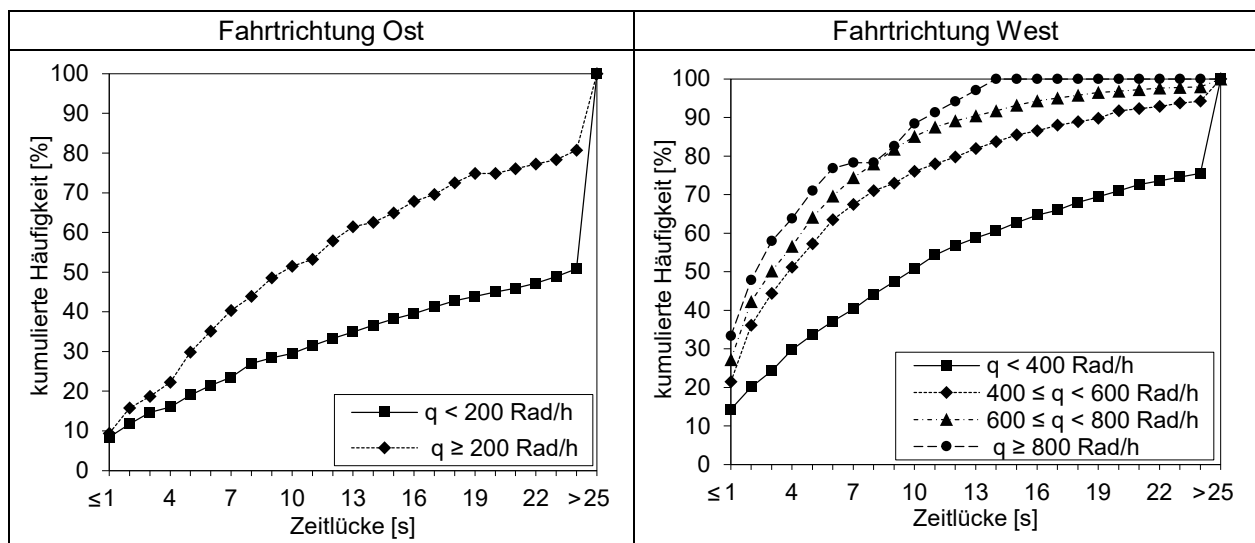


Bild B-48: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung Ost (links) und die Fahrtrichtung West (rechts) der Radverkehrsanlage „An der Alster“ in Hamburg

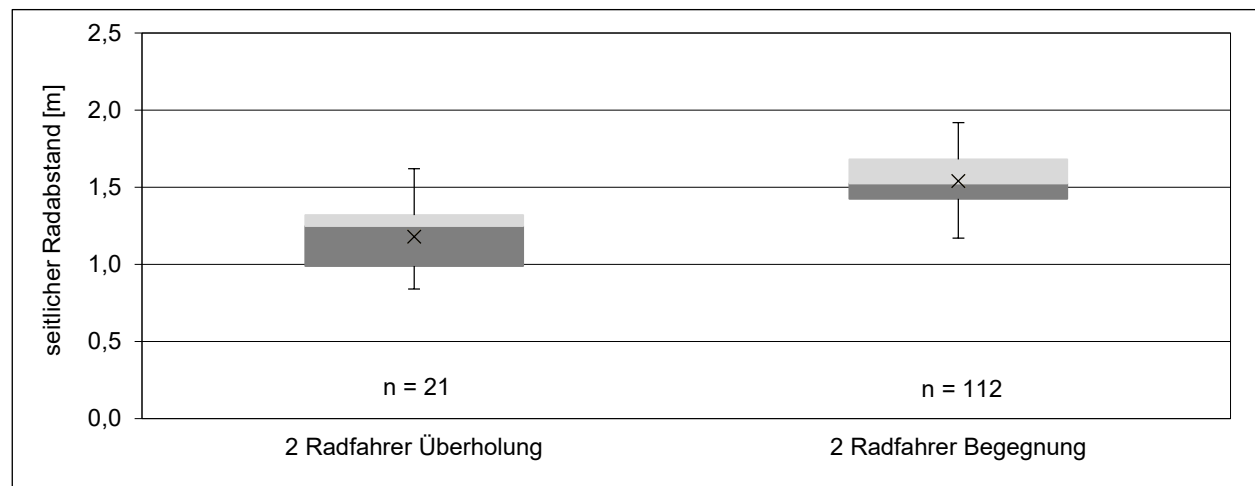


Bild B-49: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Begegnungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für die Radverkehrsanlage „An der Alster“ in Hamburg

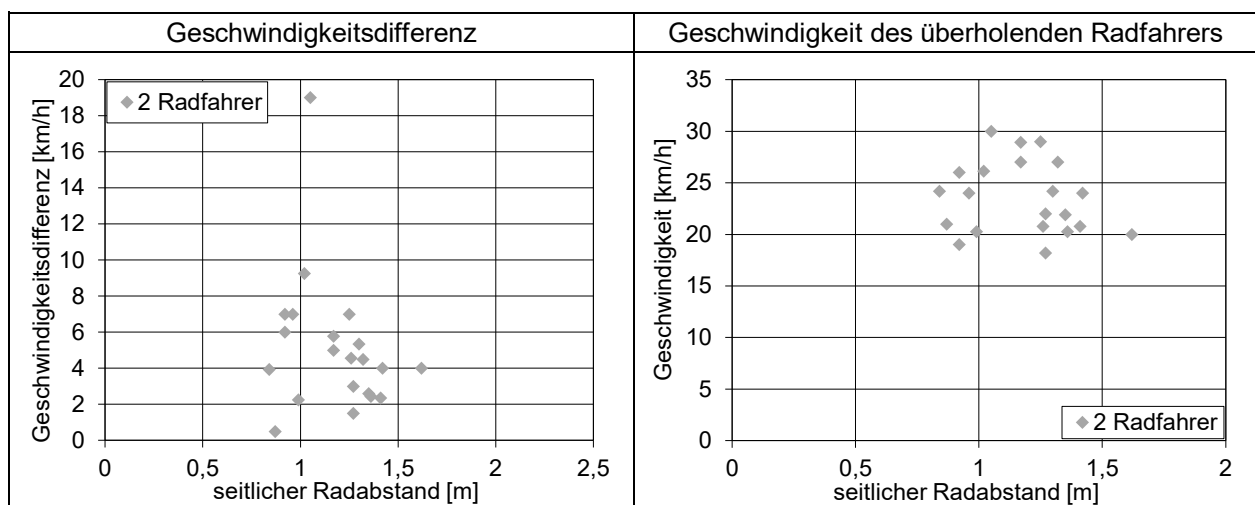


Bild B-50: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für die Radverkehrsanlage „An der Alster“ in Hamburg

Radschnellweg Ruhr in Mülheim

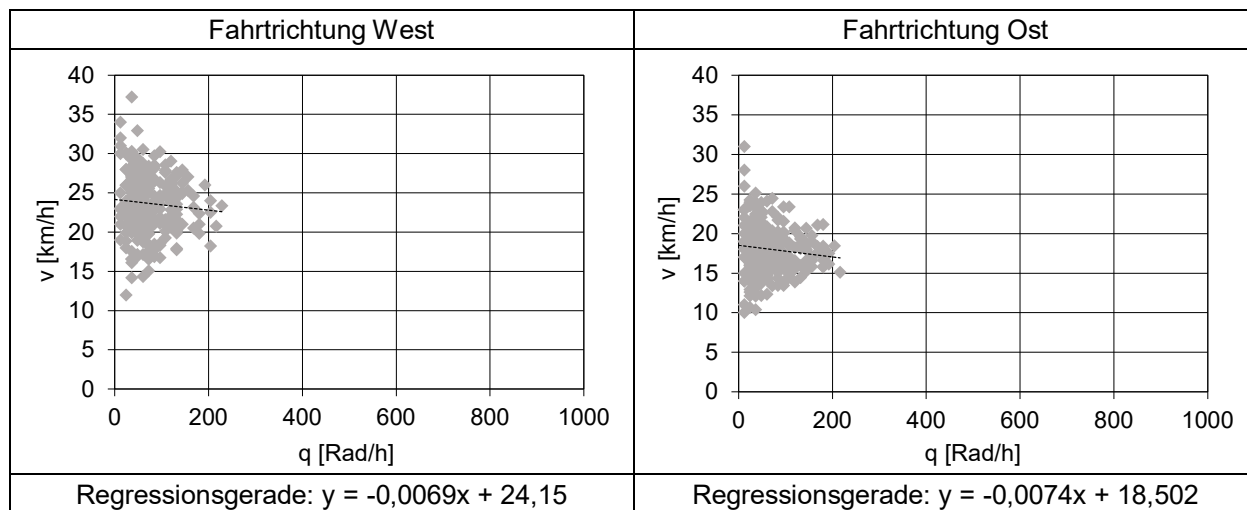


Bild B-51: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung West (links) und die Fahrtrichtung Ost (rechts) des Radschnellwegs Ruhr in Mülheim

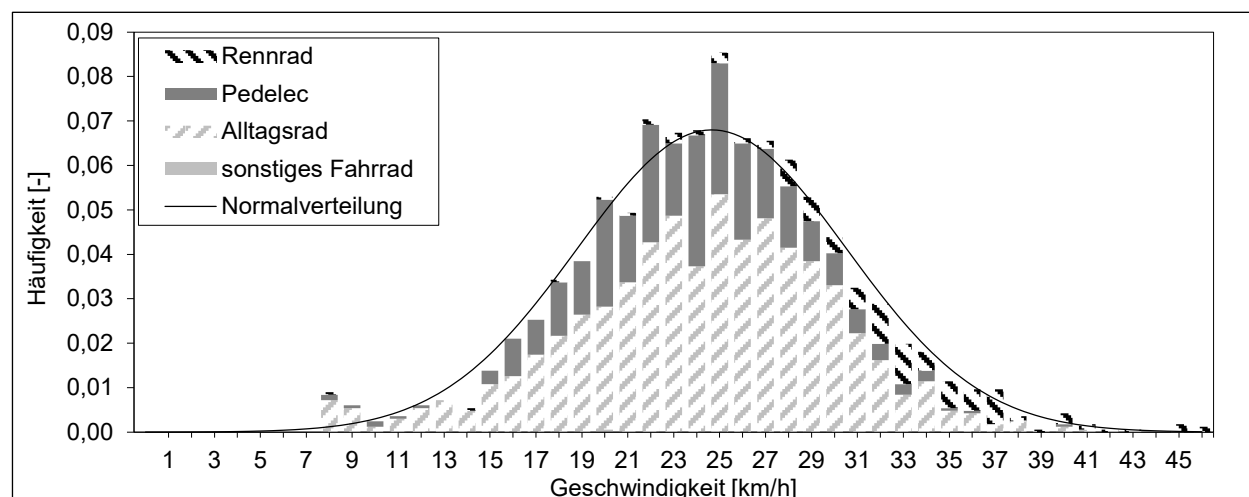


Bild B-52: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für den Radschnellweg Ruhr in Mülheim (Fahrtrichtung West)

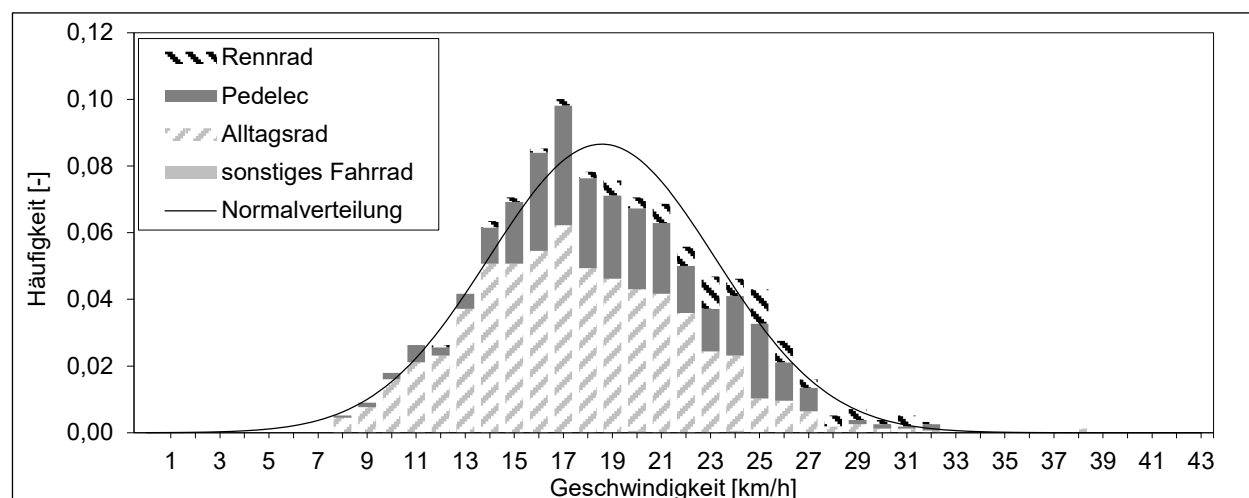


Bild B-53: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für den Radschnellweg Ruhr in Mülheim (Fahrtrichtung Ost)

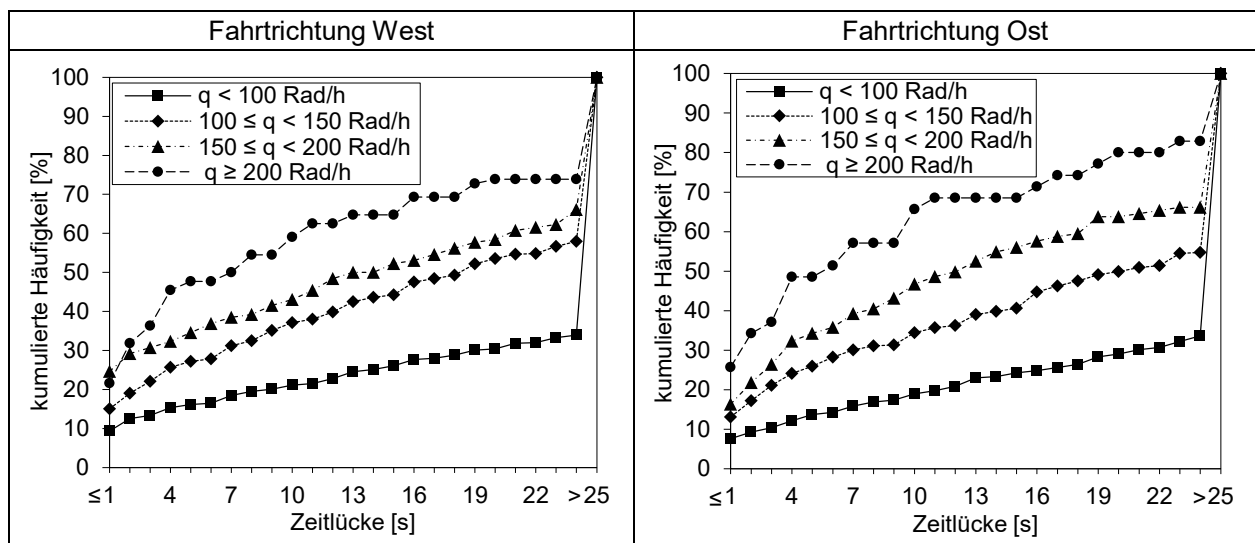


Bild B-54: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung West (links) und die Fahrtrichtung Ost (rechts) des Radschnellwegs Ruhr in Mülheim

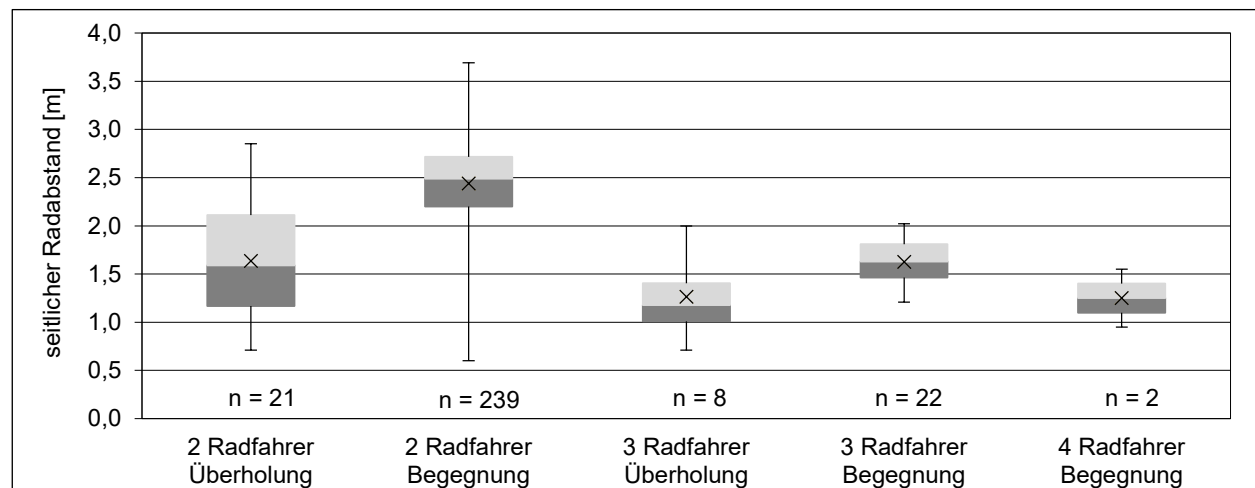


Bild B-55: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Begegnungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für den Radschnellweg Ruhr in Mülheim

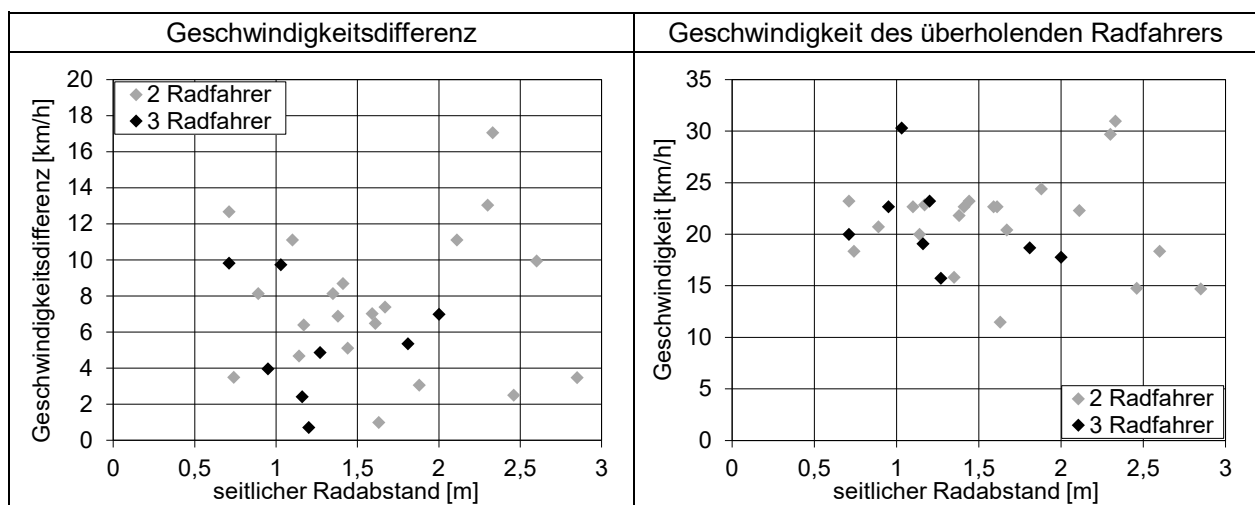


Bild B-56: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für den Radschnellweg Ruhr in Mülheim

eRadschnellweg in Göttingen

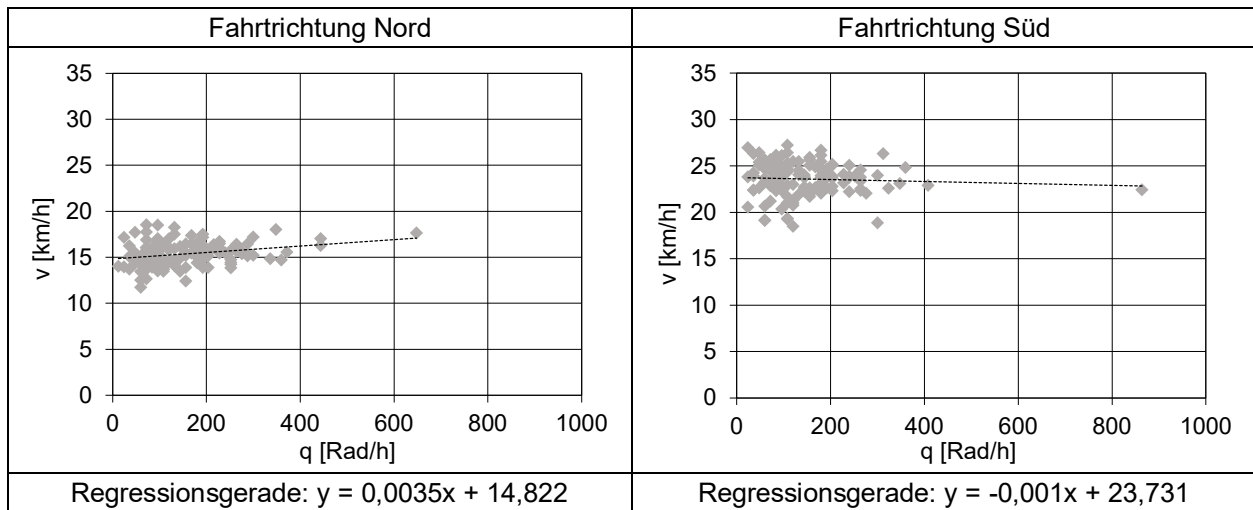


Bild B-57: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung Nord (links) und die Fahrtrichtung Süd (rechts) des eRadschnellwegs in Göttingen

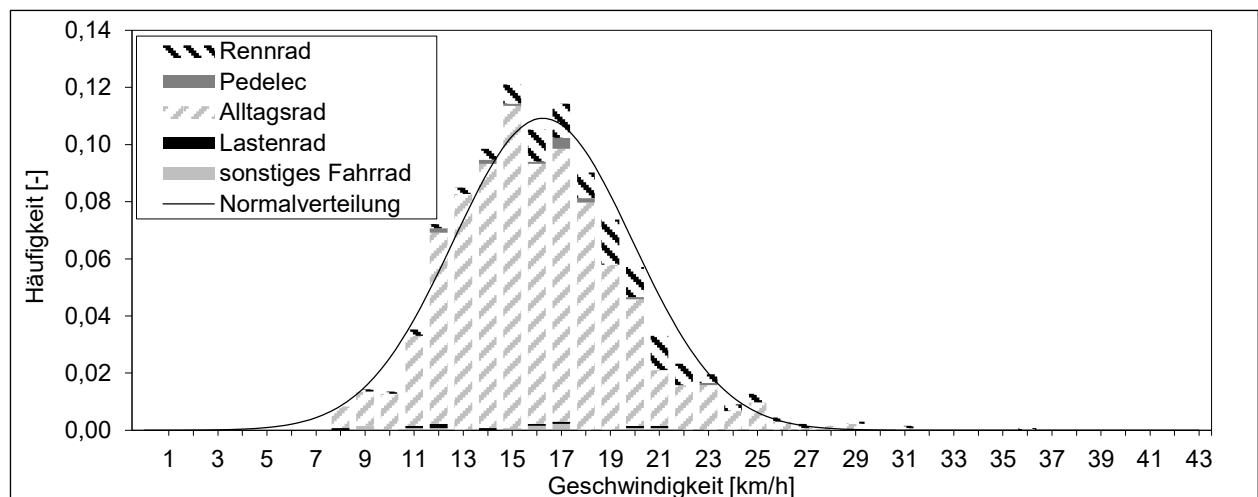


Bild B-58: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für den eRadschnellweg in Göttingen (Fahrtrichtung Nord)

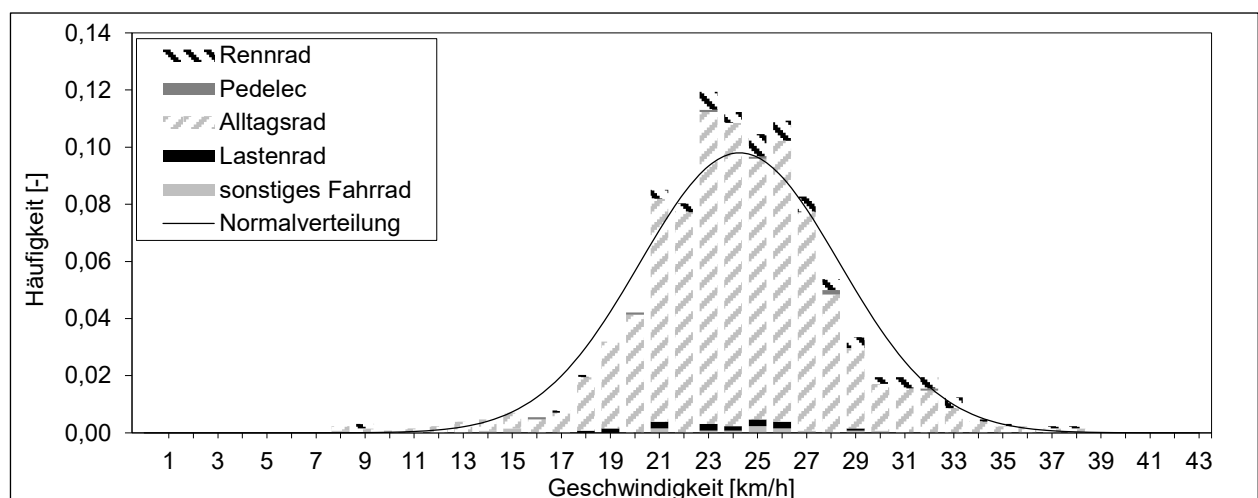


Bild B-59: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für den eRadschnellweg in Göttingen (Fahrtrichtung Süd)

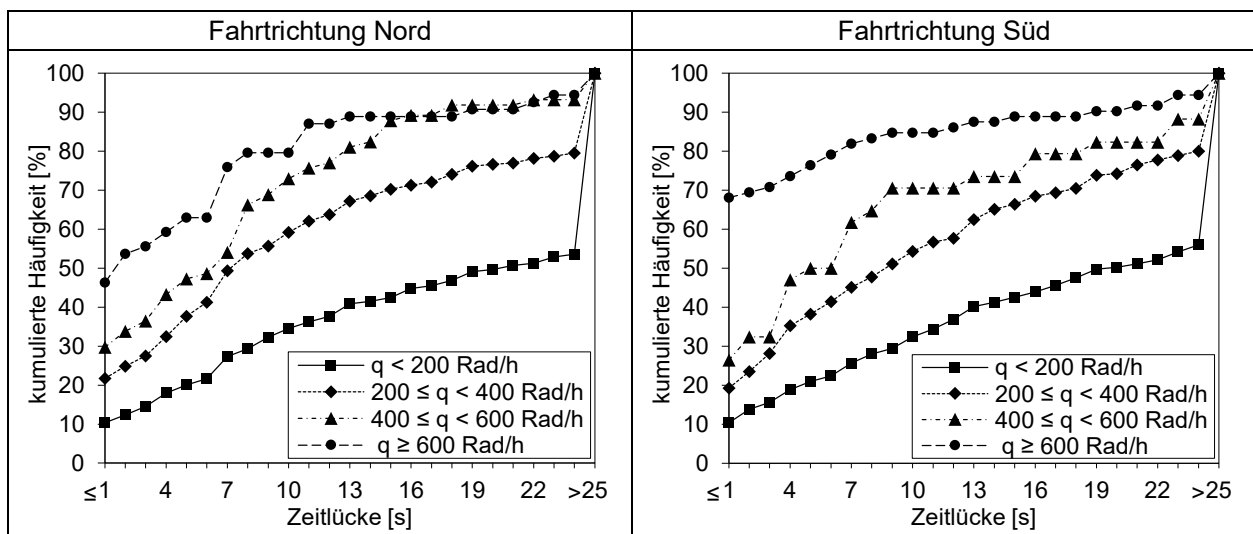


Bild B-60: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung Nord (links) und die Fahrtrichtung Süd (rechts) des eRadschnellwegs in Göttingen

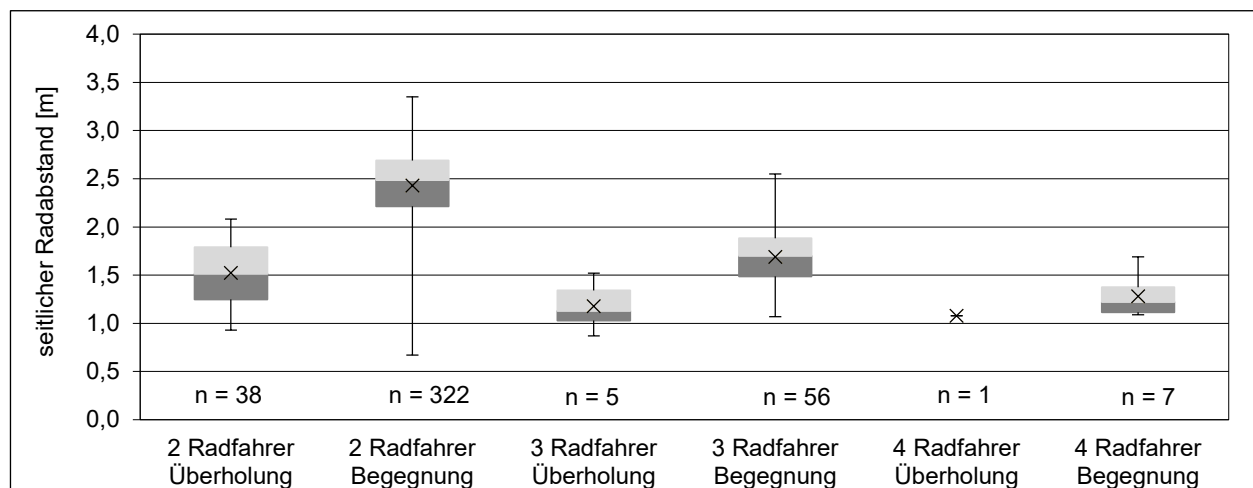


Bild B-61: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Begegnungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für den eRadschnellweg in Göttingen

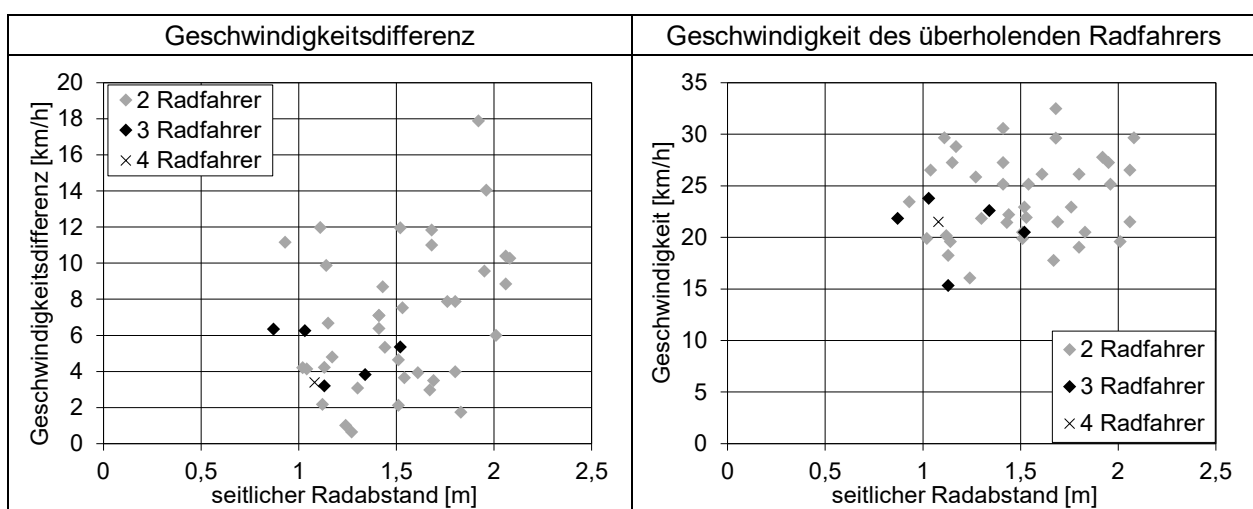


Bild B-62: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für den eRadschnellweg in Göttingen

Erhardtstraße in München

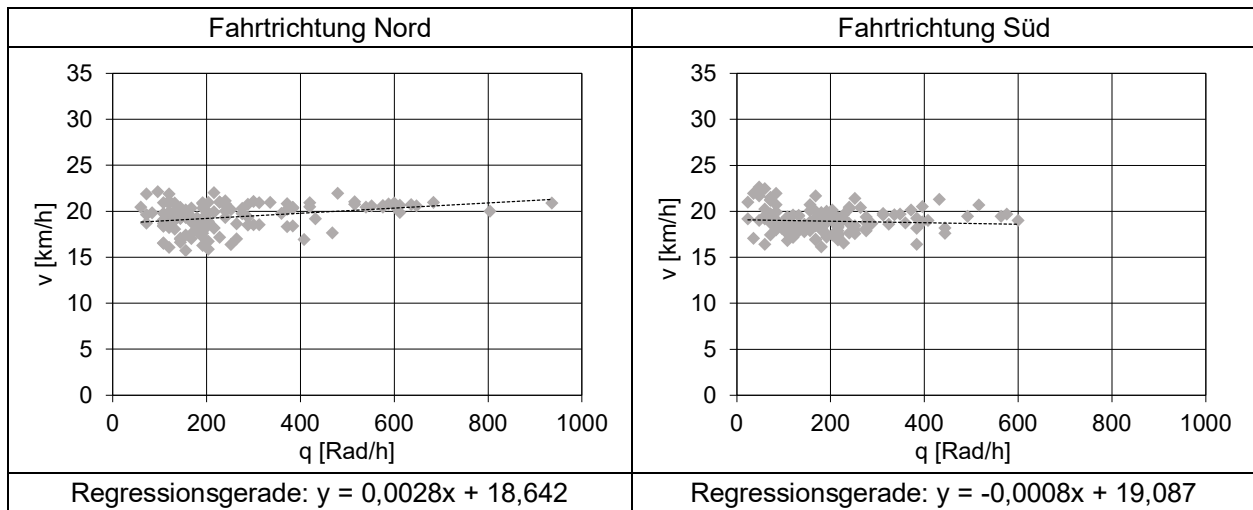


Bild B-63: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung Nord (links) und die Fahrtrichtung Süd (rechts) der Erhardtstraße in München

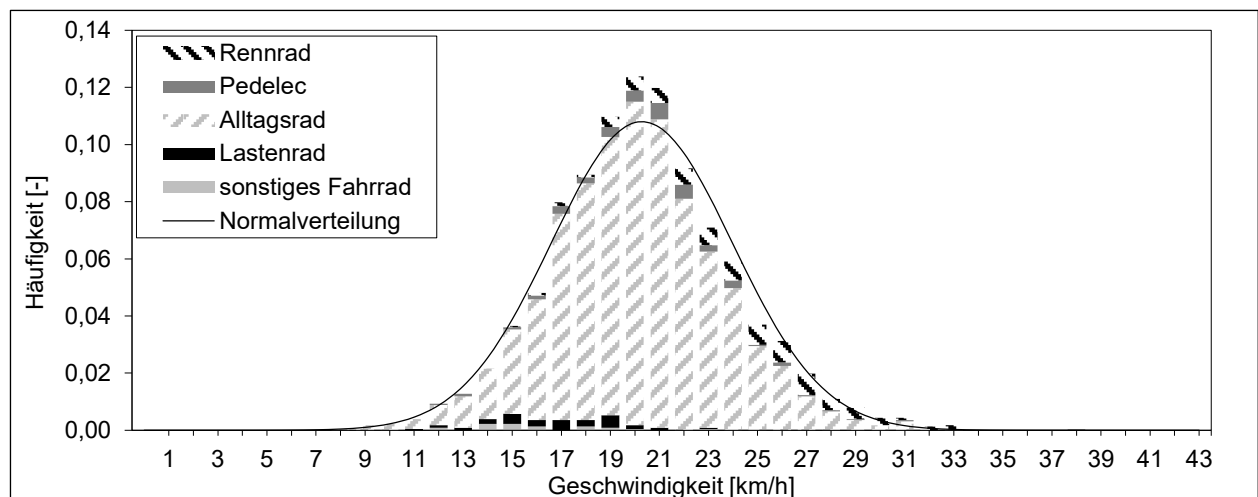


Bild B-64: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Erhardtstraße in München (Fahrtrichtung Nord)

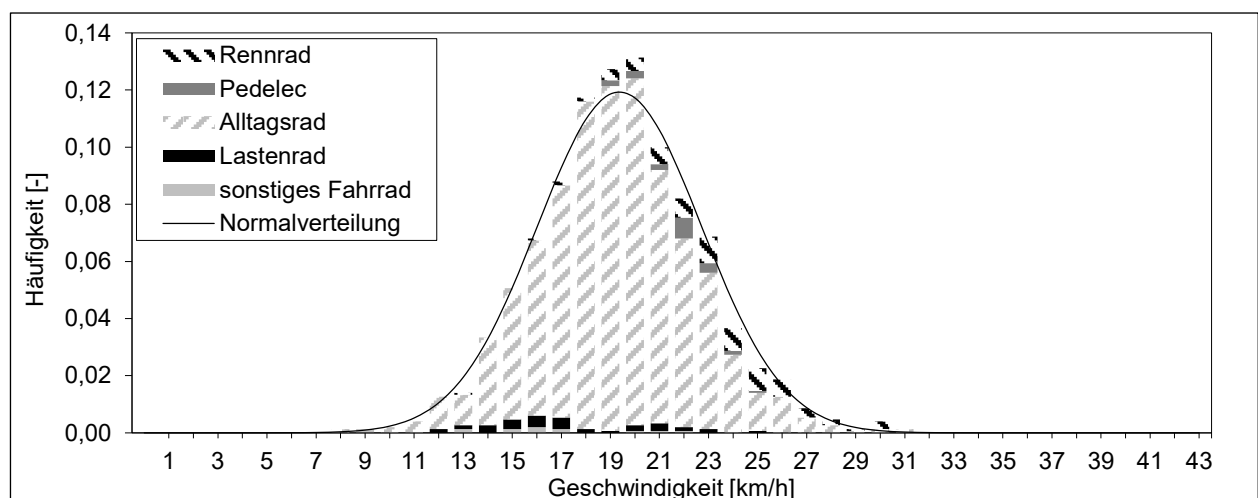


Bild B-65: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Erhardtstraße in München (Fahrtrichtung Süd)

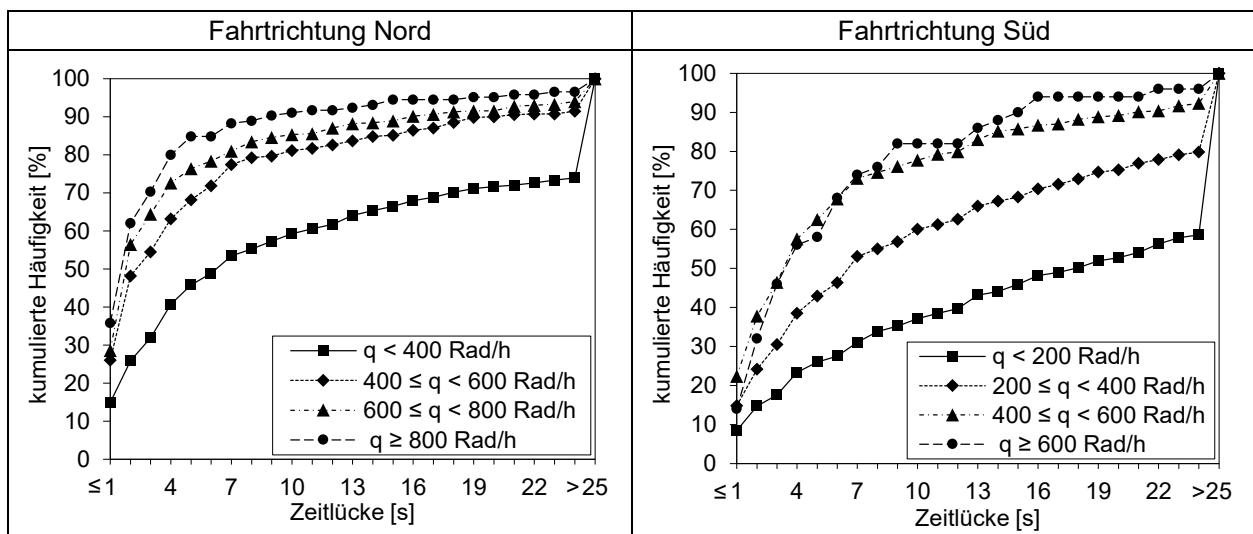


Bild B-66: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung Nord (links) und die Fahrtrichtung Süd (rechts) der Erhardtstraße in München

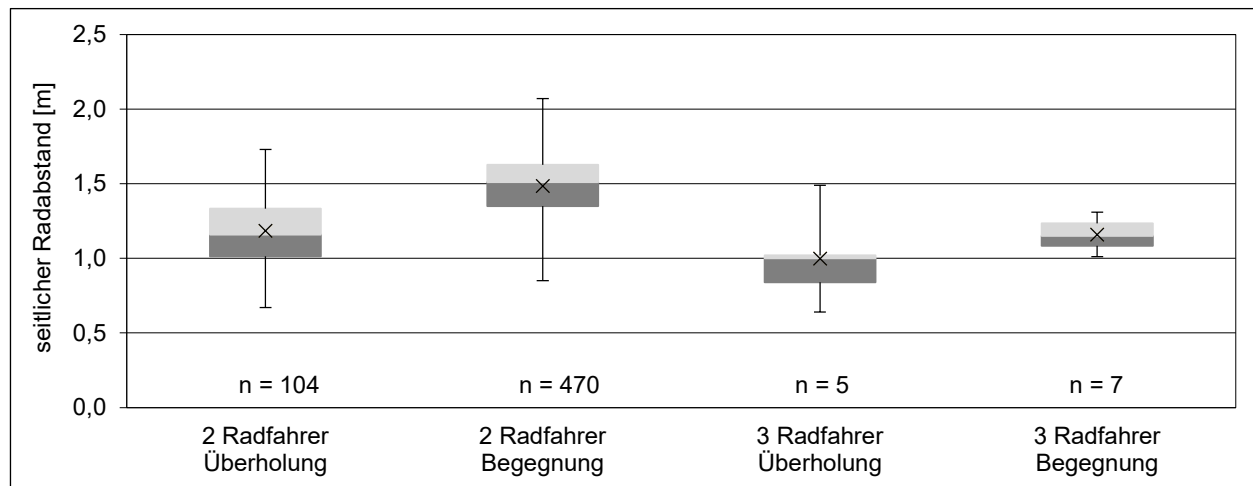


Bild B-67: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Begegnungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für die Erhardtstraße in München

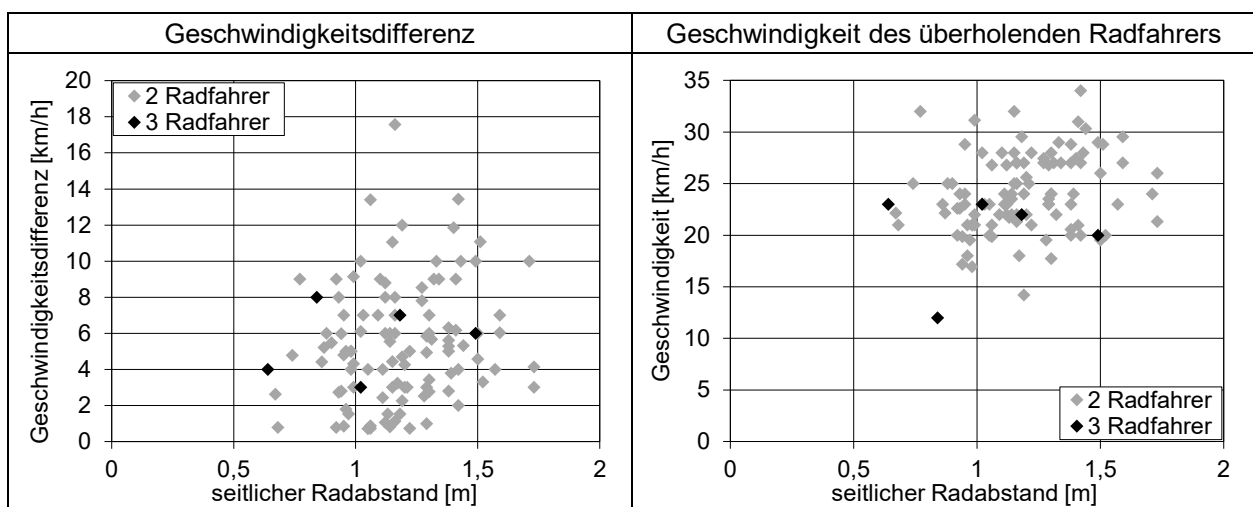


Bild B-68: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für die Erhardtstraße in München

Nordbahntrasse in Wuppertal

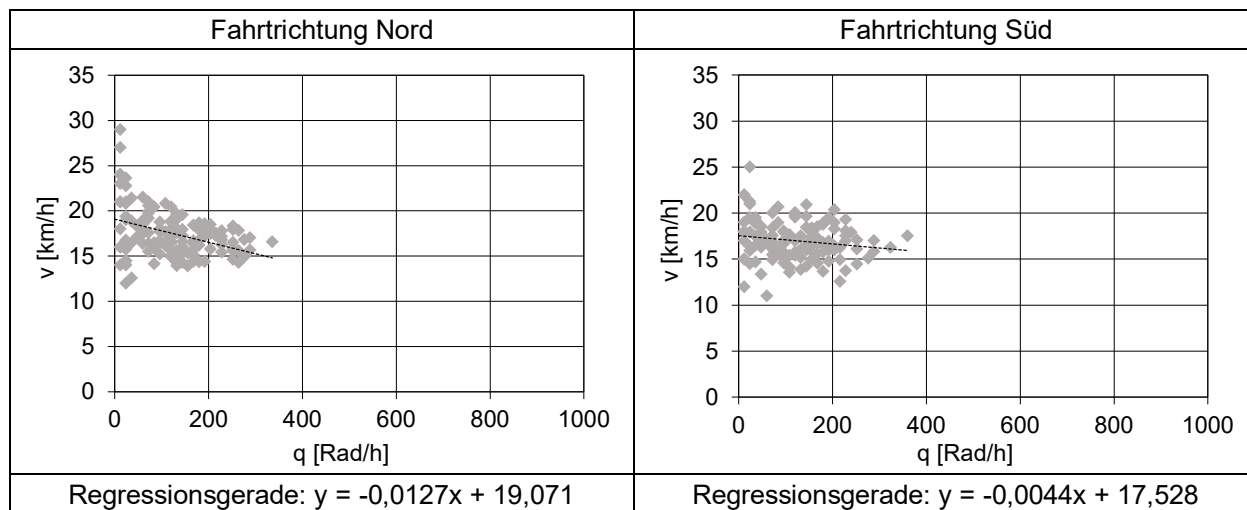


Bild B-69: q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung Nord (links) und die Fahrtrichtung Süd (rechts) der Nordbahntrasse in Wuppertal

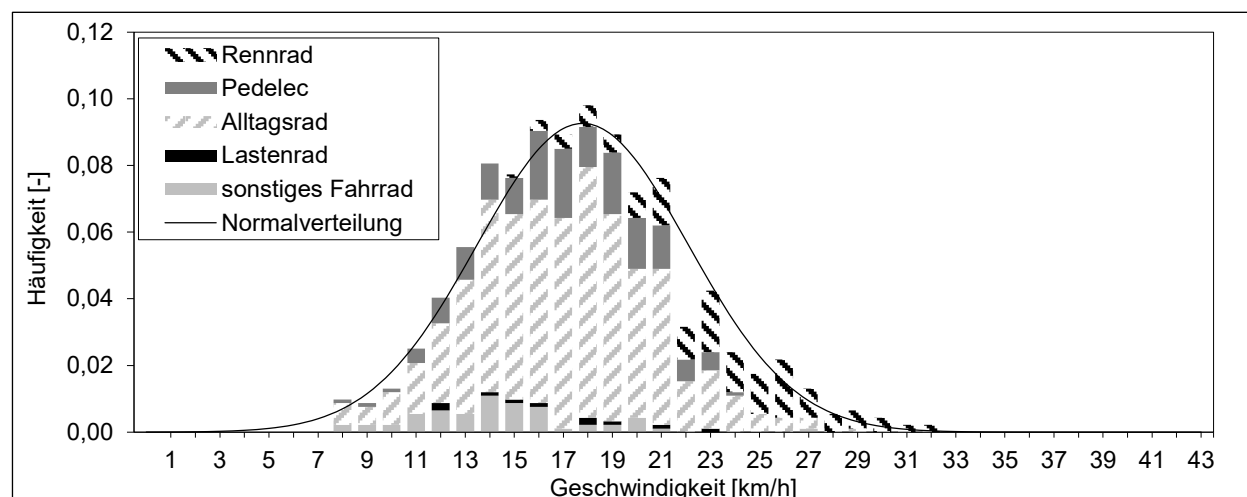


Bild B-70: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Nordbahntrasse in Wuppertal (Fahrtrichtung Nord)

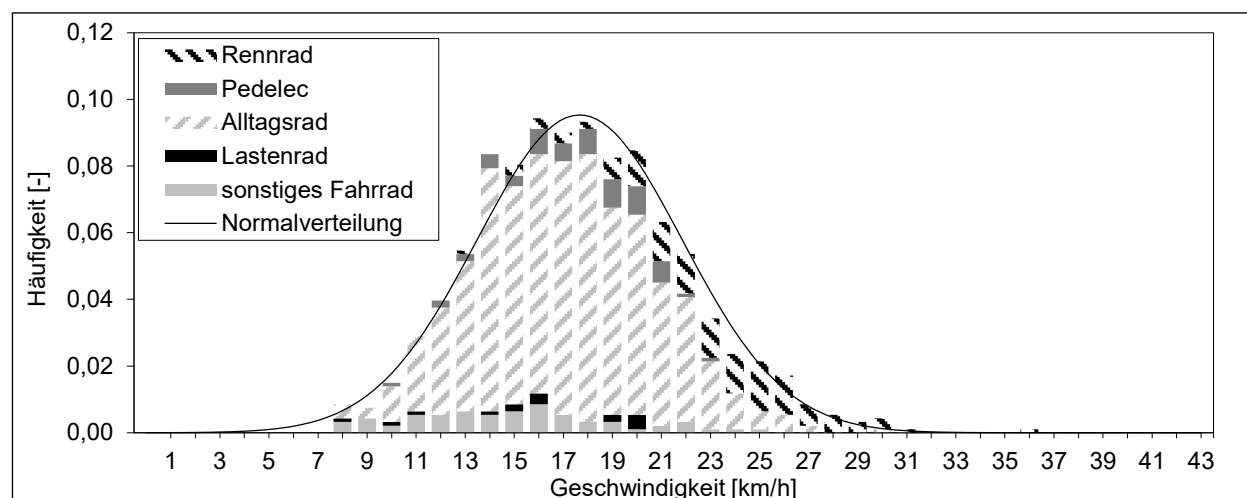


Bild B-71: Histogramm der Geschwindigkeiten getrennt nach Fahrradtyp sowie Anpassung einer Normalverteilung für das gesamte Fahrradkollektiv für die Nordbahntrasse in Wuppertal (Fahrtrichtung Süd)

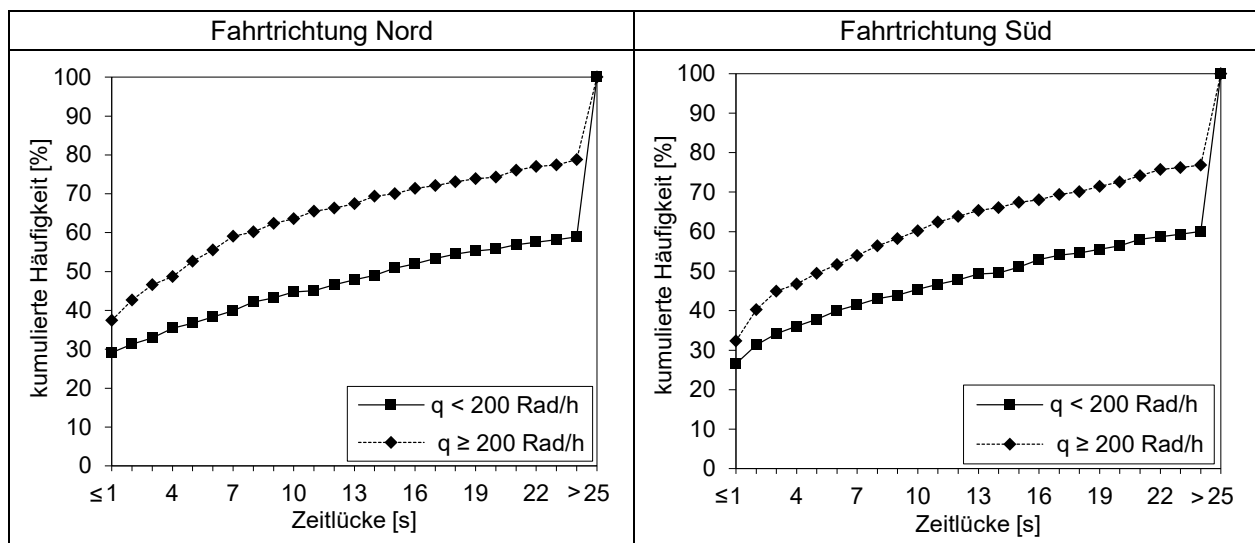


Bild B-72: Verteilung der Brutto-Zeitlücken in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in 5-Minuten-Intervallen für die Fahrtrichtung Nord (links) und die Fahrtrichtung Süd (rechts) der Nordbahntrasse in Wuppertal

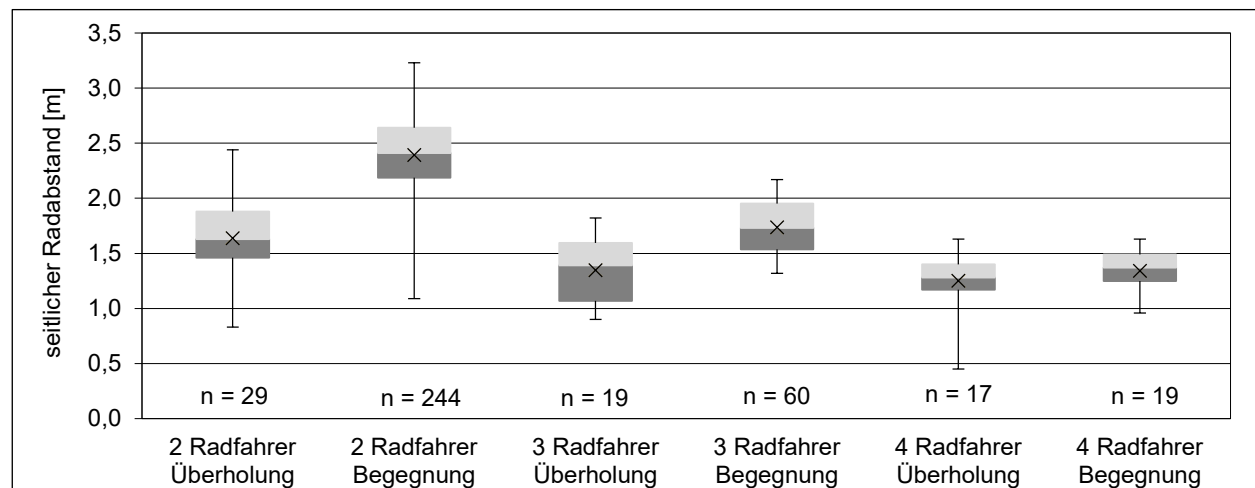


Bild B-73: Seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei Überholungen und Begegnungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für die Nordbahntrasse in Wuppertal

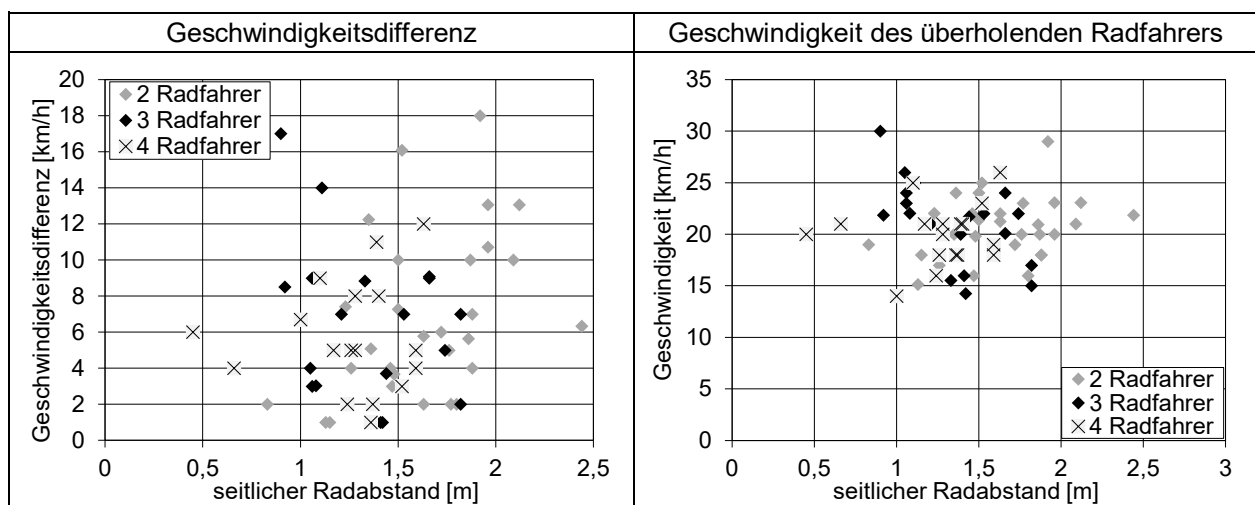


Bild B-74: Geschwindigkeitsdifferenz und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern beim Überholen (links) und Geschwindigkeit des überholenden Radfahrers und seitlicher Radabstand zwischen zwei Radfahrern bei einer Überholung (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der Radfahrer im Querschnitt für die Nordbahntrasse in Wuppertal

Anhang C: Überblick über die Fahrverhaltensparameter

Parameter	Interaktionsart	Bike Default	COWI
	FAHRVERHALTEN		
Vorausschauweite - Minimum	Folgeverhalten	10	20
Vorausschauweite - Maximum	Folgeverhalten	250	250
Vorausschauweite - Anzahl Interaktionsobjekte	Folgeverhalten	2	10
Vorausschauweite - Anzahl Interaktionsfahrzeuge	Folgeverhalten	99	99
Zurückschauweite - Minimum	Folgeverhalten	0	20
Zurückschauweite - Maximum	Folgeverhalten	150	150
Vorübergehende Unaufmerksamkeit - Dauer	Folgeverhalten	0	0
Vorübergehende Unaufmerksamkeit - Wahrscheinlichkeit	Folgeverhalten	0	0
Stillstand für statische Hindernisse	Folgeverhalten	nein	nein
Absoluten Bremswegabstand einhalten	Folgeverhalten	nein	nein
Implizite Stochastik verwenden	Folgeverhalten	ja	ja
Modell	Fahrzeugfolgemodell	Wiedemann 99	Wiedemann 99
CC0	Fahrzeugfolgemodell	0.5	0.2
CC1	Fahrzeugfolgemodell	0.5	0.5
CC2	Fahrzeugfolgemodell	0	2
CC3	Fahrzeugfolgemodell	-8	-20
CC4	Fahrzeugfolgemodell	-0.35	-0.25
CC5	Fahrzeugfolgemodell	0.35	0.25
CC6	Fahrzeugfolgemodell	11.44	1
CC7	Fahrzeugfolgemodell	0.25	0.2
CC8	Fahrzeugfolgemodell	3.5	1.8
CC9	Fahrzeugfolgemodell	1.5	0.01
Grundverhalten	Fahrstreifenwechsel	Freie Fahrstreifenwahl	Rechtsfahrgebot
Notw. Fahrstreifenwechsel: Maximale Verzögerung – eigene	Fahrstreifenwechsel	-4	-3
Notw. Fahrstreifenwechsel: Maximale Verzögerung – Folgefahrzeug	Fahrstreifenwechsel	-3	-3
Notw. Fahrstreifenwechsel: -1 m/s ² pro Entfernung – eigene	Fahrstreifenwechsel	100	50
Notw. Fahrstreifenwechsel: -1 m/s ² pro Entfernung – Folgefahrzeug	Fahrstreifenwechsel	100	50
Notw. Fahrstreifenwechsel: Akzeptierte Verzögerung – eigene	Fahrstreifenwechsel	-1	-1
Notw. Fahrstreifenwechsel: Akzeptierte Verzögerung – Folgefahrzeug	Fahrstreifenwechsel	-1	-1
Wartezeit bis zur Diffusion	Fahrstreifenwechsel	60	60
Min. Nettoweglücke (vorne/hinten)	Fahrstreifenwechsel	0.5	0.5
Auf langsameren Fahrstreifen wenn Kollisionszeit mind.	Fahrstreifenwechsel	11	11
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	Fahrstreifenwechsel	0.6	0.2
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	Fahrstreifenwechsel	-3	-3
Langsamfahrbereiche überholen	Fahrstreifenwechsel	nein	nein
Intelligentes Einfädeln	Fahrstreifenwechsel	ja	ja
Vorausschau Fahrzeugroutenentscheidung	Fahrstreifenwechsel	ja	nein
Kooperativer Fahrstreifenwechsel	Fahrstreifenwechsel	nein	nein
Hinterkantenkorrektur der Querposition	Fahrstreifenwechsel	nein	nein
Wunschposition bei freier Fahrt	Querverhalten	Rechts	Rechts
Nachbarfahrstreifen beachten	Querverhalten	nein	nein
Versetztes Aufstellen	Querverhalten	ja	nein
Nächste Abbiegerichtung berücksichtigen	Querverhalten	nein	nein
Kollisionszeitgewinn	Querverhalten	2	15
Min. Längs-Geschwindigkeit	Querverhalten	3.6	9.9
Zeit zwischen Richtungswechseln	Querverhalten	0	5
Auf gleichem Fahrstreifen überholen links	Querverhalten	ja	ja
Auf gleichem Fahrstreifen überholen rechts	Querverhalten	ja	nein
Mindestseitenabstand im Stand	Querverhalten	0.1	0.2
Mindestseitenabstand beim Fahren	Querverhalten	0.3	0.75
	FAHRZEUGTYP		
Maximalbeschleunigung	Funktionen und Verteilungen	Zweirad	Cyclists, normal
Wunschbeschleunigung	Funktionen und Verteilungen	Zweirad	Cyclists, normal
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	Funktionen und Verteilungen	Zweirad	Cyclists, normal
Wunschverzögerung	Funktionen und Verteilungen	Zweirad	Cyclists, normal
	STRECKE		
Überholen (Gegenfahrbahn) Vorausschauweite	Sonstige	500	Nicht untersucht
Überholen (Gegenfahrbahn) Überholgeschwindigkeitsfaktor	Sonstige	1.3	Nicht untersucht
Überholen (Gegenfahrbahn) Angenommene Geschwindigkeit des Gegenverkehrs	Sonstige	60	Nicht untersucht

Tab. C-1: Modellparameter in PTV Vissim, die für die Kalibrierung in Frage kommen

Anhang D: Auswertung des Überholverhaltens auf Einzelanlagen

Strecke	Breite	Überholungen (empirisch)	Überholungen (theoretisch)	Überholungen (Simulation)
Einrichtungsanlagen				
Berlin Berliner Straße	1,60 m	42	111	54
Berlin Oberbaumbrücke	1,50 m	111	324	195
Freiburg Eschholzstraße	2,12 m	42	50	12
München Lindwurmstraße	2,00 m	116	126	108
Münster Wareндorfer Straße	1,50 / 1,60 m	108	129	104
Münster Wolbecker Straße	1,60 m	54	28	23
Zweirichtungsanlagen				
Göttingen	3,94 m	45	129	98
Hamburg An der Alster	2,50 m	21	386	1
Mülheim	4,00 m	29	142	102
München Erhardtstraße	2,98 m	109	239	85
Münster Promenade	4,60 m	127	504	127
Wuppertal Nordbahntrasse	3,87 m	65	273	198

Tab. D-1: Empirische, theoretische und simulierte Überholungen auf allen Einzelanlagen

Anhang E: Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden Parameter des Fahrzeugfolgeverhaltens und zur Einstellung des Überholens im Gegenverkehr untersucht. Für jede der unten aufgeführten Parameter wurde eine systematische Variation durchgeführt. Die Geschwindigkeitsverteilungen wurden auf Basis der Geschwindigkeitsmessungen aller Fahrradtypen auf allen Untersuchungsstrecken eingestellt. Lastenräder und Pedelecs wurden nicht gesondert betrachtet. Für jede Parameterkombination wurden fünf Simulationsläufe durchgeführt, die Ergebnisse gemittelt und die statistischen Kennwerte der ermittelten Überholungen sowie der Verlustzeitmessungen berechnet.

Fahrzeugfolgeverhalten

Bezüglich des Fahrzeugfolgeverhaltens wurden solche Parameter als relevant betrachtet, die den Annäherungsvorgang beeinflussen. Parameter, die auf das Verhalten während des Folgens einwirken, wurden nicht untersucht. Dies sind die Parameter CC2 und CC4 bis CC9. CC2, CC4, CC5 und CC6 definieren Wahrnehmungsschwellen, die nicht sinnvoll im Zusammenhang mit Überholvorgängen kalibriert werden können. Die Parameter CC7, CC8 und CC9 bestimmen das Beschleunigungsverhalten während des Folgens, das unabhängig vom Beschleunigen im Rahmen eines Überholvorgangs ist. Bei diesen Parametern ist anzunehmen, dass Wechselwirkungen mit dem Überholverhalten vernachlässigbar sind, auch wenn diese Parameter Einfluss auf das kollektive Verhalten an der Kapazitätsgrenze haben können. Es wurden daher die drei Parameter CC0, CC1 und CC3 des Wiedemann-Modells untersucht. Für die Sensitivitätsanalyse wurde eine Strecke von 2 m Breite und 500 m Länge modelliert. Die Verkehrsstärke beträgt 1000 Rad/h im gesamten Simulationszeitraum. Die Auswertung erfolgte auf einem 100 m langen Abschnitt in der Mitte der Strecke. Ausgewertet wurde eine Stunde Simulationszeit. Bei der Auswertung ist zu beachten, dass die Anzahl der Überholungen nicht in einem direkten Zusammenhang mit der Verkehrsqualität steht. Lediglich verhinderte Überholungen beeinflussen die Verkehrsqualität negativ. Eine geringere Anzahl an aus der Simulation ermittelten Überholungen kann auch aus einer Reduktion von Überholungen folgen, die zu gar keinen oder nur geringen Zeitgewinnen führen und daher in der Realität unter Umständen nicht durchgeführt werden. Daher wurde zusätzlich die Verlustzeit betrachtet.

Der Vergleich der Überholungen und Verlustzeiten der Variationen von CC0, CC1 und CC3 (siehe Bild E-1 und Bild E-2) zeigt, dass lediglich der Parameter CC1 einen relevanten Einfluss auf die Verlustzeit hat. Alle Parameter beeinflussen die Überholungen, allerdings hat CC1 den größten Einfluss der drei Parameter. Die Zunahme der Verlustzeiten bei der Variation des Parameters CC1 hängt damit zusammen, dass der Parameter *Kollisionszeitgewinn* mit 15 s sehr hoch eingestellt ist und ab 20 s aufgrund einer internen Einstellung nicht mehr von den Fahrzeugen berücksichtigt wird. Daher kann es bei großen Differenzgeschwindigkeiten und hohen Werten für CC1 dazu kommen, dass sehr schnelle Fahrräder sehr langsame nicht mehr überholen können. Dies stellt eine Verzerrung des real auftretenden Verhaltens dar und sollte vermieden werden. Die Variation der anderen beiden Parameter wirkt möglicherweise nur auf Überholungen mit geringen Differenzgeschwindigkeiten und hat daher auf die Verlustzeit nur einen vernachlässigbaren Einfluss. Bei vielen Überholungen durch Fahrräder mit geringen Differenzgeschwindigkeiten können außerdem gegenseitige Behinderungen der Überholenden die Verkehrsqualität beeinträchtigen.

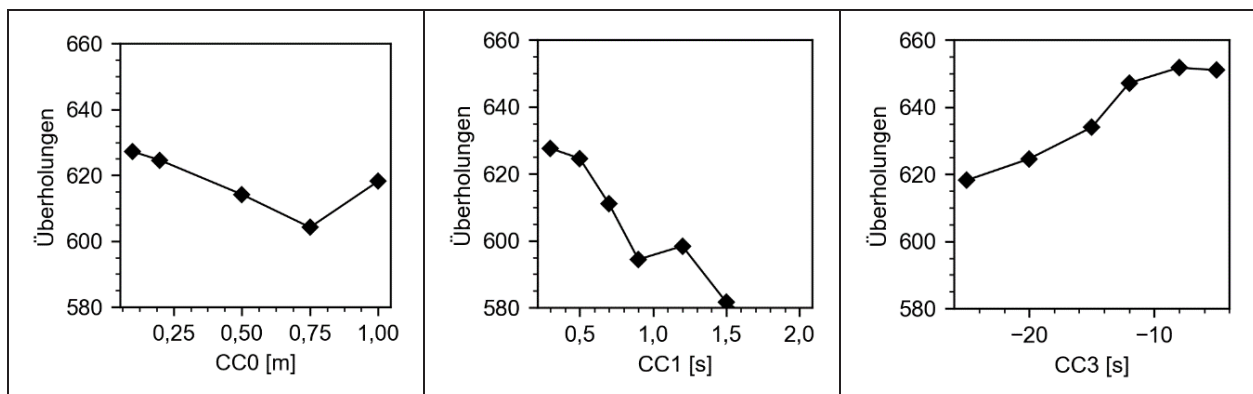


Bild E-1: Überholungen in Abhängigkeit vom Parameter CC0 (links), CC1 (Mitte) und CC3 (rechts)

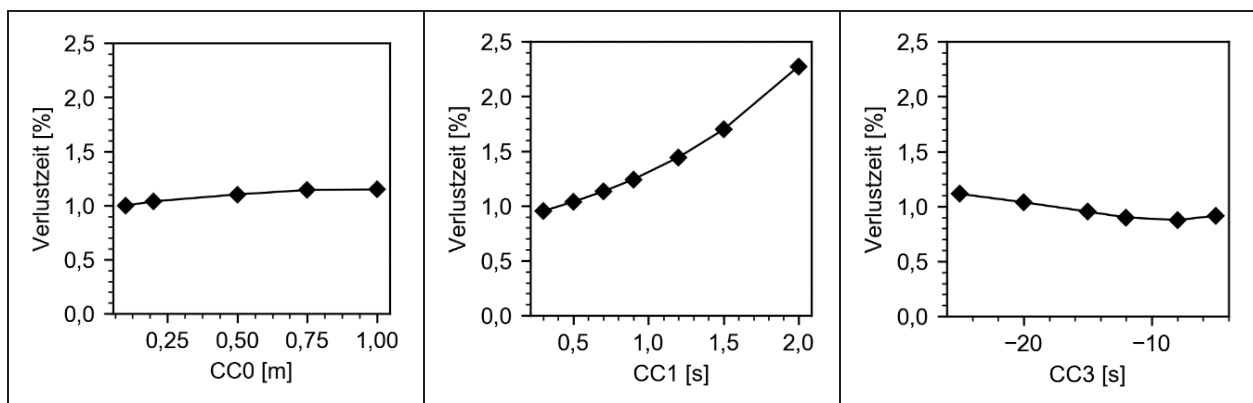


Bild E-2: Verlustzeit in Abhängigkeit vom Parameter CC0 (links), CC1 (Mitte) und CC3 (rechts)

Überholen im Gegenverkehr

Eine Kalibrierung des Überholverhaltens im Gegenverkehr erfolgt über die Parameter *Sichtweite*, *Überholgeschwindigkeitsfaktor* und *angenommene Geschwindigkeit des Gegenverkehrs*. Letztere bezeichnet die Geschwindigkeit, die potenziell entgegenkommende Fahrzeuge am Ende der Vorausschauweite zugewiesen bekommen. Sobald tatsächlich ein Fahrzeug im Gegenverkehr innerhalb der Vorausschauweite auftritt, wird mit dessen tatsächlicher Geschwindigkeit die Möglichkeit zum Überholen kalkuliert. Durch den Überholgeschwindigkeitsfaktor wird die Wunschgeschwindigkeit des überholenden Fahrzeugs während des Überholvorgangs mit dem entsprechenden Faktor erhöht. Die Sichtweite und die angenommene Geschwindigkeit des Gegenverkehrs können aus den empirischen Daten nicht direkt bestimmt werden. Eine Auswertung einzelner Überholvorgänge, um den Überholgeschwindigkeitsfaktor zu ermitteln, konnte im Rahmen dieses Projekts nicht vorgenommen werden.

Die voreingestellten Werte betragen für die angenommene Geschwindigkeit des Gegenverkehrs 18 km/h, für die Sichtweite 250 m und für den Überholgeschwindigkeitsfaktor 1,3. Alle Parameter wurden in der Sensitivitätsstudie einzeln variiert, um den jeweiligen Einfluss auf die Häufigkeit der Überholungen im Gegenverkehr zu quantifizieren.

Da das Überholverhalten auf den Untersuchungsstrecken durch Überholungen im eigenen Fahrstreifen dominiert wird, ist die Untersuchung von Überholen im Gegenverkehr auf Strecken mit Regelbreite schwierig. Es wurde daher eine Laborstrecke mit 1,25 m Breite für die Sensitivitätsanalyse verwendet. Die Verkehrsstärke in der Hauptrichtung beträgt 450 Rad/h, in der Gegenrichtung 150 Rad/h. Beim Überholen im Gegenverkehr sind Überholungen mit niedrigen Differenzgeschwindigkeiten unwahrscheinlicher als beim Überholen im Fahrstreifen, da die Berechnung der zur Verfügung stehenden Zeitlücke für den Überholvorgang direkt von der Differenzgeschwindigkeit abhängt. Alle Überholungen finden aufgrund der schmalen Fahrbahn außerdem auf der Gegenfahrbahn statt, weshalb gegenseitige Beeinflussungen der Fahrräder durch die Überholvorgänge ausgeschlossen werden können. Daher ist es ausreichend, die Anzahl der Überholungen zu betrachten.

In der Sensitivitätsanalyse wurde der Überholgeschwindigkeitsfaktor in Schritten von 0,1, die Vorausschauweite in Schritten von 25 bis 100 m und die angenommene Geschwindigkeit des Gegenverkehrs in Schritten von 2,5 km/h variiert. Die Auswertung der Sensitivitätsanalyse (Bild E-3) zeigt, dass der Überholgeschwindigkeitsfaktor und die Vorausschauweite einen stärkeren Einfluss auf die Anzahl der Überholungen haben als die angenommene Geschwindigkeit des Gegenverkehrs. Eine Erhöhung des Überholgeschwindigkeitsfaktor im Bereich zwischen 1,0 und 1,4 bewirkt eine starke Zunahme der Überholungen, ab einem Wert von 1,5 nehmen die Überholungen mit zunehmenden Überholgeschwindigkeitsfaktor ab. Überholgeschwindigkeitsfaktoren ab diesem Wert sind allerdings unrealistisch und werden daher modellseitig nicht sinnvoll abgebildet. Eine Erhöhung der Vorausschauweite im Bereich 0 bis 300 m bewirkt ebenfalls eine Zunahme der Überholungen. Eine weitere Erhöhung auf 400 m bewirkt nur noch eine leichte Zunahme von im Mittel sechs Überholungen. Der Einfluss auf die Überholungen durch die angenommene Geschwindigkeit des Gegenverkehrs ist absolut sehr viel geringer. Deutlich mehr Überholungen zeigen sich nur für die Einstellung von unter 18 km/h, mit über 20 km/h nehmen die Überholungen weiter ab.

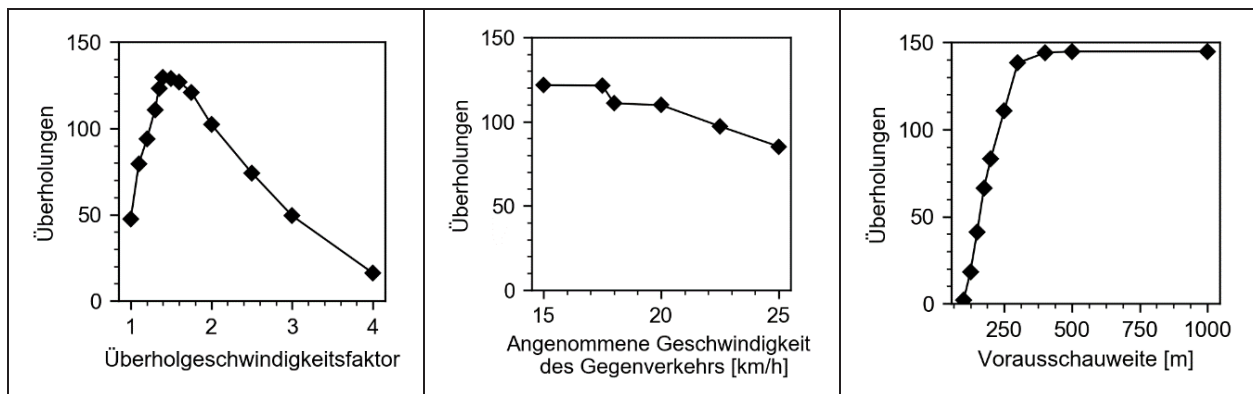


Bild E-3: Anzahl der Überholungen in Abhängigkeit vom Parameter *Überholgeschwindigkeitsfaktor* (links), *Angenommene Geschwindigkeit des Gegenverkehrs* (Mitte) und *Vorausschauweite* (rechts)

Anhang F: Kalibrierung der Steigungsstrecken

Zur Kalibrierung der Modelle der Steigungsstrecken wurden zwei verschiedene Ansätze untersucht. Zunächst wurde eine für alle Fahrräder geltende Maximalbeschleunigungsfunktion an das empirisch beobachtete Verhalten angepasst. Bild F-1 zeigt den Vergleich der simulativ ermittelten und empirisch gemessenen Geschwindigkeitsverläufe vor der Kalibrierung. Bild F-2 zeigt die entsprechenden Geschwindigkeitsverläufe nach der ersten Kalibrierung. Es ist zu erkennen, dass zwar die Maximalwerte der Geschwindigkeitsreduktion reduziert werden und damit eine Anpassung an die empirischen Werte erreicht werden kann, die Fahrräder in der Simulation aber alle auf eine ähnliche Beharrungsgeschwindigkeit reduzieren und damit die in den empirischen Daten vorhandene Breite der Geschwindigkeitsverteilung nicht reproduziert werden kann. Diese Problematik liegt in der Modellierung begründet, da die konkreten Werte für Wunschgeschwindigkeit und Maximalbeschleunigung der Fahrräder in der Simulation mittels voneinander unabhängigen Zufallszahlen ermittelt werden. Einem Fahrrad, dem von der Simulation eine hohe Wunschgeschwindigkeit zugeordnet wird, wird also mit der gleichen Wahrscheinlichkeit eine niedrige Maximalbeschleunigung zugeordnet wie einem Fahrrad mit einer niedrigen Wunschgeschwindigkeit. Sofern die Steigung die Maximalbeschleunigung soweit reduziert, dass die Wunschbeschleunigung unterschritten wird, reduziert ein Fahrrad seine Geschwindigkeit.

In einem zweiten Schritt wurden daher verschiedene Geschwindigkeitsklassen auf Basis der empirisch gemessenen Geschwindigkeiten gebildet, für die jeweils Fahrzeugtypen und -klassen definiert wurden. Die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen der jeweiligen Fahrzeugklassen wurden auf Basis der jeweils gemessenen Startgeschwindigkeiten festgelegt, um eine gute Vergleichbarkeit der Geschwindigkeiten über die Strecke herzustellen. Die Geschwindigkeitsverläufe wurden nach den einzelnen Gruppen getrennt analysiert und die Maximalbeschleunigungskurven einzeln angepasst. Dieses Vorgehen hat zur Folge, dass sehr schnelle Radfahrer eine hohe Maximalbeschleunigung und damit auch Beharrungsgeschwindigkeit zugeordnet bekommen. Gleichmaßen wird langsameren Fahrzeugen eher eine niedrigere Maximalbeschleunigung zugeordnet. Die mit diesem Ansatz resultierenden Geschwindigkeitsverläufe zeigt Bild F-3. Die Anpassung an die empirischen Daten ist durch die Nutzung von Geschwindigkeitsgruppen hinsichtlich der Breite der Verteilung deutlich besser geeignet. Die resultierende Geschwindigkeitsverteilung ist zwar nicht so breit ist wie in den empirischen Daten, aber deutlich breiter als bei der Simulation ohne Geschwindigkeitsgruppen. Allerdings zeigt sich eine Abweichung zwischen Median und Mittelwert der simulativ ermittelten Geschwindigkeiten am Ende der Steigungsstrecke. Dies spricht dafür, dass die vorgenommene Einstellung Schwachstellen besitzt und eine stärkere Kopplung des Beschleunigungsvermögens mit der gefahrenen Geschwindigkeit wünschenswert wäre. Mit diesem Ansatz ist es mit sehr feinen Anpassungen der Maximalbeschleunigungskurven für alle Fahrzeugklassen möglich, eine spezifische Steigungsstrecke repräsentativ abzubilden. Bei der Übertragung der Maximalbeschleunigungsfunktion auf andere Strecken hat sich allerdings gezeigt, dass auf anderen Strecken eine erneute, sehr detaillierte Anpassung der Kurvenverläufe notwendig wäre, um die empirischen Verläufe abzubilden. Eine allgemeingültige und für beliebige Steigungen valide Parameterkombination ist also nicht erreichbar. Zur weiteren Reihensimulation von Steigungsstrecken und zur Inter- und Extrapolation der empirischen Daten lässt sich die Simulationssoftware daher nicht mit vertretbarem Aufwand einsetzen.

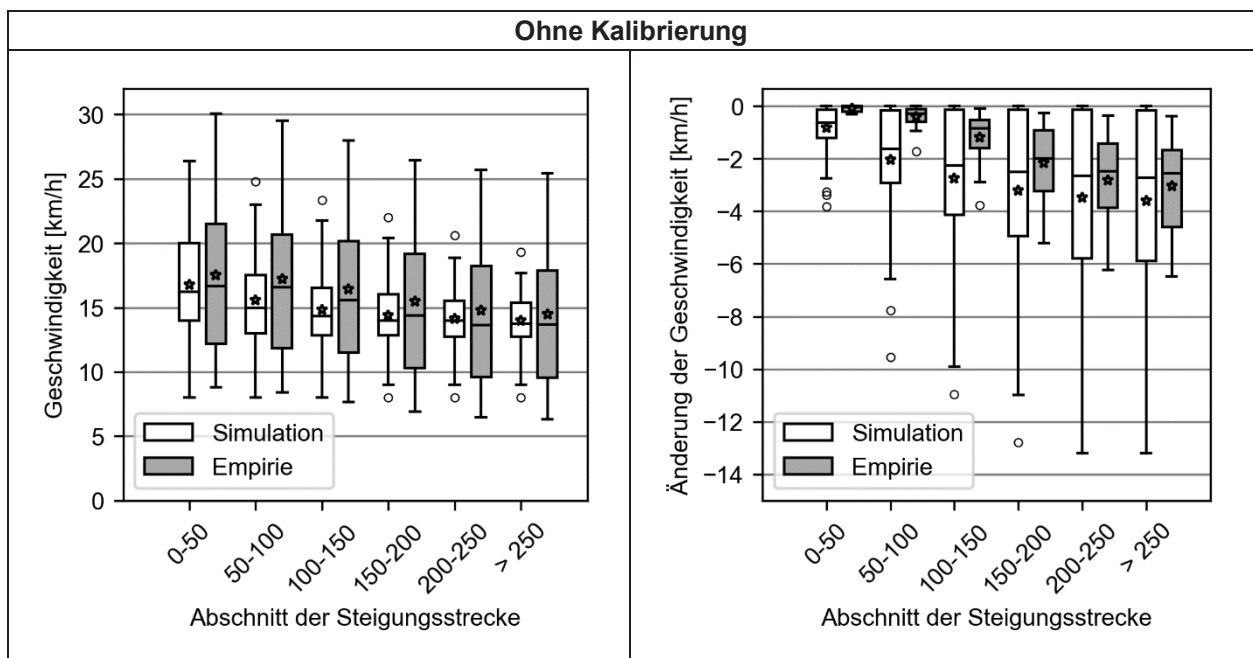


Bild F-1: Vergleich der empirischen und simulativ ermittelten Geschwindigkeiten (links) und Geschwindigkeitsänderungen (rechts) über den Steigungsverlauf der Bessemerstraße ohne Kalibrierung

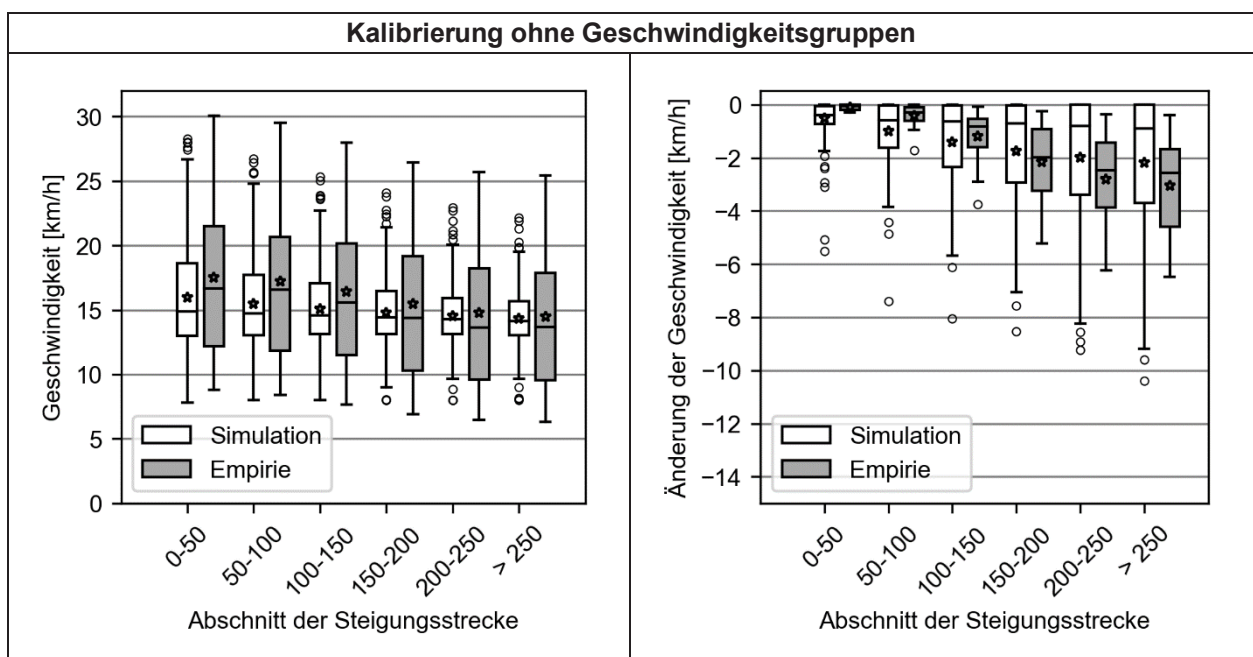


Bild F-2: Vergleich der empirischen und simulativ ermittelten Geschwindigkeiten (links) und Geschwindigkeitsänderungen (rechts) über den Steigungsverlauf der Bessemerstraße nach Kalibrierung der Beschleunigungsfunktion

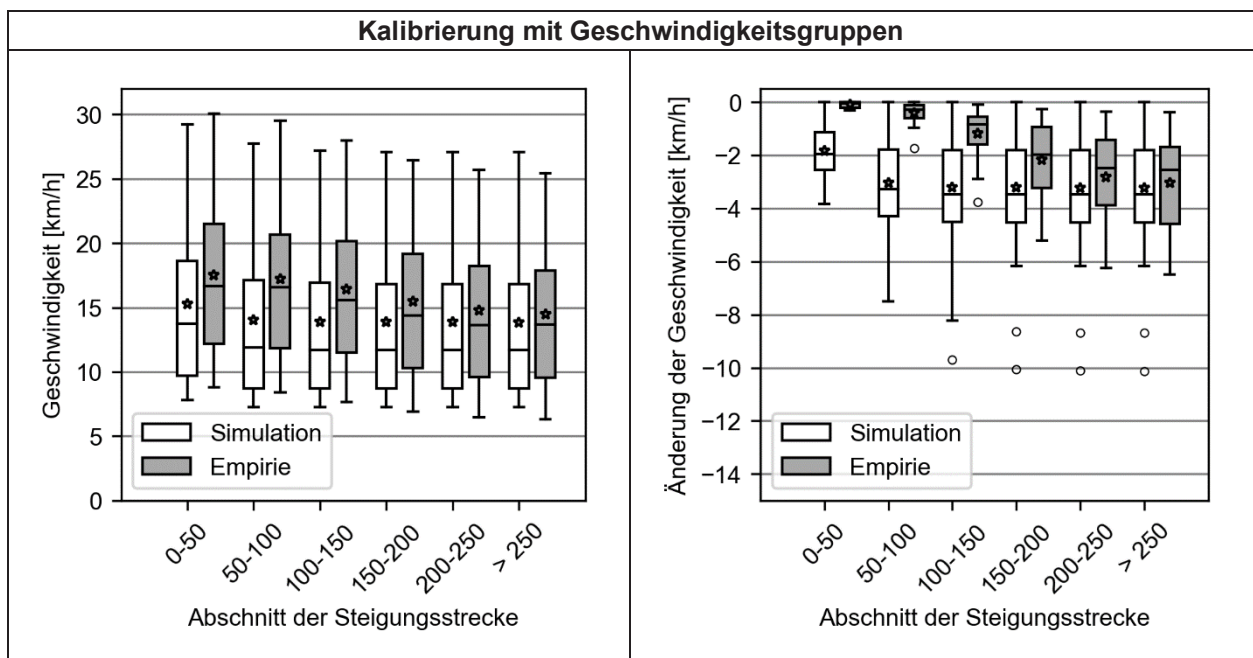


Bild F-3: Vergleich der empirischen und simulativ ermittelten Geschwindigkeiten (links) und Geschwindigkeitsänderungen (rechts) über den Steigungsverlauf der Bessemerstraße mit vier Geschwindigkeitsgruppen

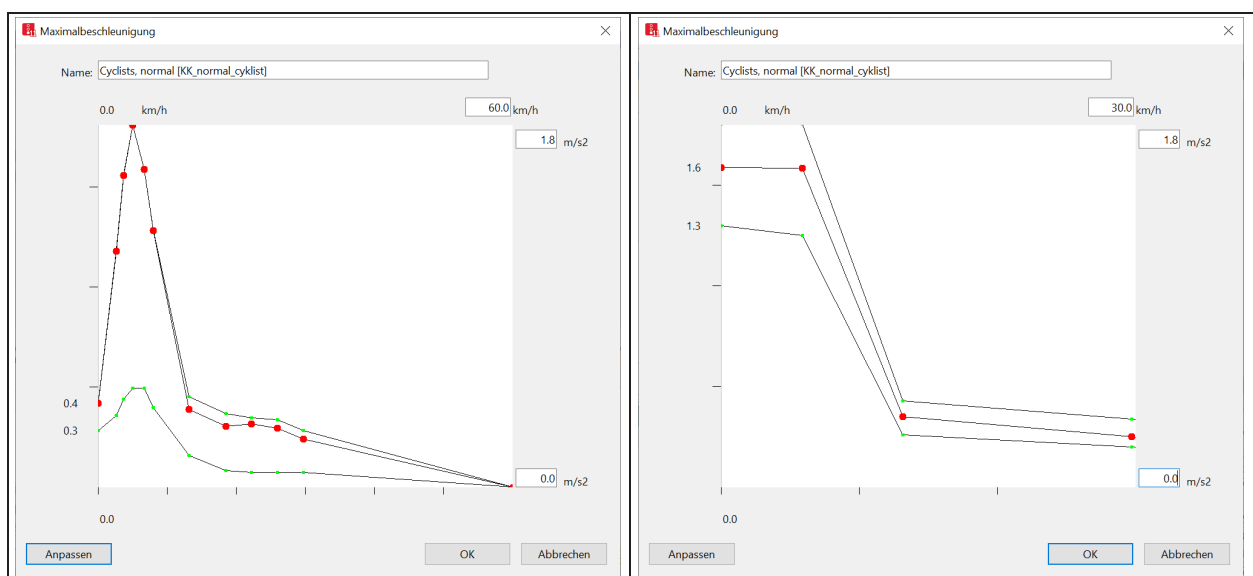


Bild F-4: Maximalbeschleunigungs-Funktion für COWI-Fahrzeugtyp „KK_cykel_normal“ (links) und nach Kalibrierung ohne Geschwindigkeitsgruppen (rechts)

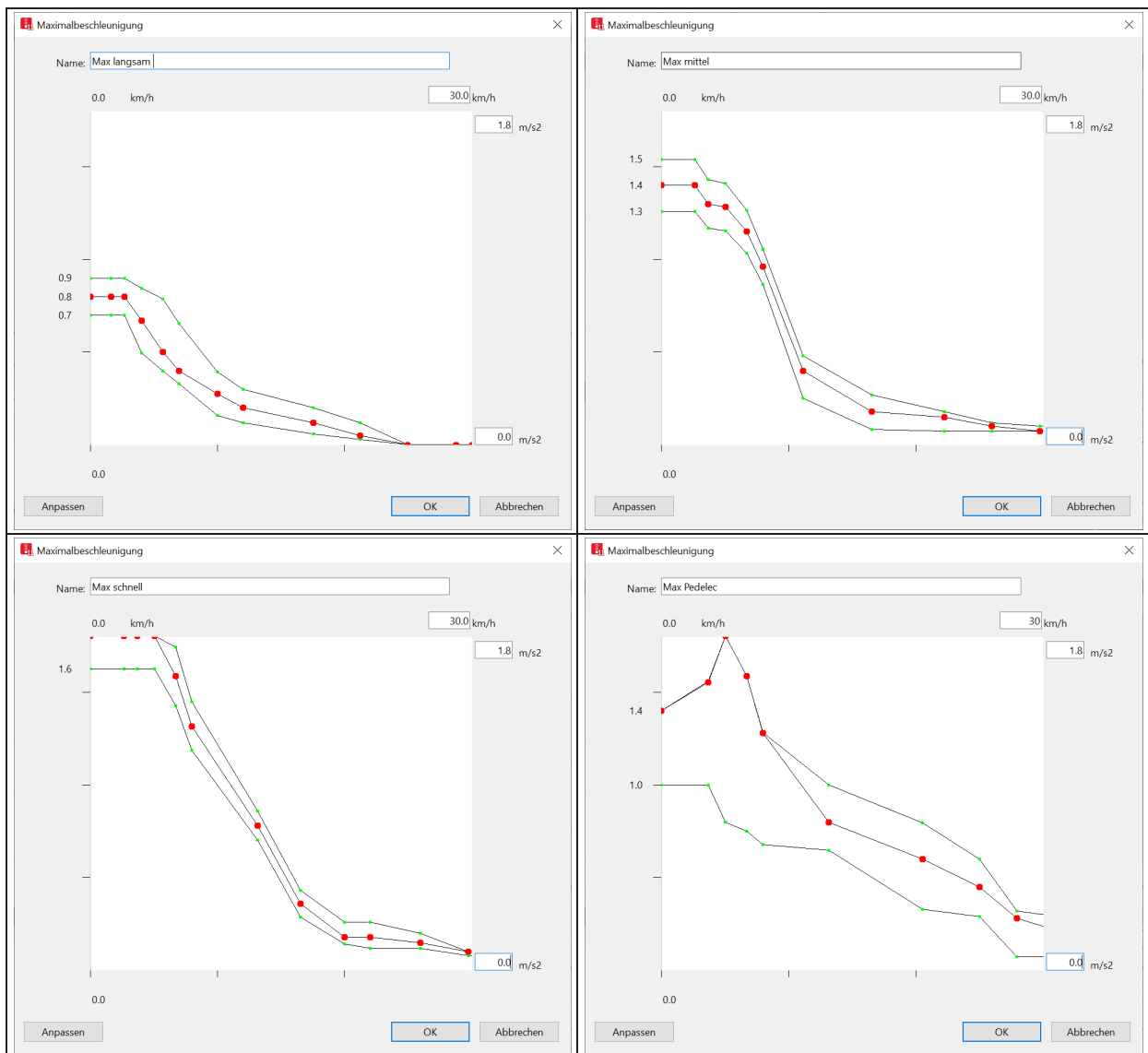


Bild F-5: Maximalbeschleunigungs-Funktion für Fahrzeugtyp „Langsam“ (oben links), „Mittel“ (oben rechts), „Schnell“ (unten links) und „Pedelec“ (unten rechts) nach Kalibrierung mit Geschwindigkeitsgruppen

Anhang G: Einstellungen für die Reihensimulationen

Geschwindigkeit [km/h]	Alltagsrad	Lastenrad	Pedelec
8	0	0	0
9	0,27	0,66	0,23
10	0,75	1,75	0,51
11	1,55	2,84	1,03
12	3,16	6,78	1,94
13	5,72	11,82	3,42
14	9,68	17,72	5,08
15	15,41	29,54	8,16
16	22,77	37,86	12,95
17	31,19	47,05	19,57
18	40,37	53,17	27,27
19	49,46	59,52	34,8
20	58,05	68,49	42,61
21	65,63	76,59	51,63
22	72,62	83,15	59,04
23	78,57	87,31	66,12
24	83,85	91,9	72,05
25	87,7	94,31	79,12
26	90,98	96,94	86,02
27	93,47	98,69	90,59
28	95,32	99,12	93,44
29	96,65	99,56	95,09
30	97,61	100	96,29
31	98,28	100	97,38
32	98,77	100	98
33	99,16	100	98,75
34	100	100	100

Tab. G-1: Geschwindigkeitsverteilung für die Reihensimulation auf Basis aller empirisch gemessenen Geschwindigkeiten

Geschwindigkeit [km/h]	Alltagsrad	Lastenrad	Pedelec
8	0,18	0,46	0,36
9	0,62	1,62	0,71
10	1,35	2,55	1,33
11	2,91	6,48	2,49
12	5,46	11,34	3,73
13	9,43	17,59	5,33
14	15,18	29,63	8,08
15	22,82	37,73	12,26
16	31,61	46,53	19,89
17	41,15	53,01	28,15
18	50,57	59,26	35,26
19	59,5	68,06	42,72
20	67,32	75,69	51,6
21	74,44	82,41	58,35
22	80,47	86,81	64,83
23	85,74	91,44	69,54
24	89,58	93,98	76,47
25	92,71	96,76	83,93
26	95,02	98,61	88,72
27	96,68	99,07	92,01
28	97,81	99,54	94,05
29	98,54	100	95,56
30	98,99	100	96,8
31	99,33	100	97,69
32	99,58	100	98,49
33	100	100	100

Tab. G-2: Geschwindigkeitsverteilung für die Simulation der Netzabschnitte Göttingen und München auf Basis der empirisch innerorts gemessenen Geschwindigkeiten

Geschwindigkeit [km/h]	Alltagsrad	Lastenrad	Pedelec
8	0,79	4	0,36
9	1,55	4	0,71
10	2,76	8	1,33
11	4,68	12	2,49
12	7,26	20	3,73
13	11,2	20	5,33
14	16,78	28	8,08
15	22,43	40	12,26
16	28,66	56	19,89
17	35,63	56	28,15
18	42,7	64	35,26
19	49,25	76	42,72
20	55,35	92	51,6
21	61,61	96	58,35
22	67,05	96	64,83
23	72,34	100	69,54
24	76,26	100	76,47
25	80,46	100	83,93
26	84,01	100	88,72
27	87,06	100	92,01
28	89,61	100	94,05
29	92,01	100	95,56
30	93,93	100	96,8
31	95,37	100	97,69
32	96,58	100	98,49
33	100	100	100

Tab. G-3: Geschwindigkeitsverteilung für die Simulation des Netzabschnitts Mülheim auf Basis der auf Radschnellwegen empirisch gemessenen Geschwindigkeiten

Fahrverhalten

?
X

Nr.:
Name:

Folgeverhalten
Fahrzeugfolgemodell
Fahrstreifenwechsel
Querverhalten
LSA-Steuerung
Meso

Wiedemann 99

Modellparameter

CC0 (Stillstandsabstand):

CC5 (pos. Geschwindigkeitsdifferenz):

CC1 (Folgeabstand):

CC6 (Einfluss Geschwindigkeit auf Oszillation):

CC2 (Längs-Oszillation):

CC7 (Beschleunigung bei Oszillation):

CC3 (Wahrnehmungsschwelle für Folgen):

CC8 (Beschleunigung aus Stillstand):

CC4 (neg. Geschwindigkeitsdifferenz):

CC9 (Beschleunigung bei 80 km/h):

Bild G-1: Anpassungen des Fahrzeugfolgmodells auf Basis der „Cykelsti“-Parameter in der Reihensimulation

Fahrverhalten ? X

Nr.: 1006 Name: Bicycle path Bast

Folgeverhalten Fahrzeugfolgemodell Fahrstreifenwechsel Querverhalten LSA-Steuerung Meso

Wunschposition bei freier Fahrt: Rechts

☐ Nachbarfahrstreifen beachten

☐ Versetztes Aufstellen

☐ Nächste Abbiegerichtung berücksichtigen

Kollisionszeitgewinn: 15,00 s

Min. Längs-Geschwindigkeit: 5,00 km/h

Zeit zwischen Richtungswechseln: 8,00 s

Standardverhalten beim Überholen auf dem gleichen Fahrstreifen oder Nachbar-Fahrstreifen

Auf gleichem Fahrstreifen überholen Mindestseitenabstand

☒ Überholen links (Standard) Abstand im Stand: 0,37 m bei 0 km/h

☐ Überholen rechts (Standard) Abstand beim Fahren: 0,37 m bei 50 km/h

Bild G-2: Anpassungen des Querverhaltens auf Basis der „Cykelsti“-Parameter für die Reihensimulation

Strecke ? X

Nr.: 2 Name: 2 m Gegen

Anz. Fahrstreifen: 2 Streckenverhaltenstyp: 106: Bicycle path Bast

Streckenlänge: 898,800 m Darstellungstyp: 1: Straße grau

Ebene: 1: Nullebene

Fahrstreifen Meso Fußgängerfläche Darstellung Sonstige

Steigung: 0,00 %

☐ Nur ÖV überholen

Auswertung

☒ Fahrzeugprotokoll

☒ Fahrstreifenwechsel-Protokoll

☒ Streckenauswertung

Segmentlänge: 100,0 m

☒ Netzauswertung

Dynamische Umlegung

Kosten: 0,00 je km

Zuschlag 1: 0,00

Zuschlag 2: 0,00

Überholen auf der Gegenfahrbahn

Vorausschauweite: 400,00 m

Überholgeschwindigkeit-Faktor: 1,10

Angenommene Geschwindigkeit des Gegenverkehrs: 20,00 km/h

Bild G-3: Anpassung des Überholens im Gegenverkehr in der Reihensimulation


Fahrverhalten
?
×

Nr.:
 Name:

Folgeverhalten
 Fahrzeugfolgemodell
 Fahrstreifenwechsel
 Querverhalten
 LSA-Steuerung
 Meso

Wunschposition bei freier Fahrt:

☐ Nachbarfahrstreifen beachten
☐ Versetztes Aufstellen
☐ Nächste Abbiegerichtung berücksichtigen

Kollisionszeitgewinn:

Min. Längs-Geschwindigkeit:

Zeit zwischen Richtungswechseln:

Standardverhalten beim Überholen auf dem gleichen Fahrstreifen oder Nachbar-Fahrstreifen

Auf gleichem Fahrstreifen überholen	Mindestseitenabstand
☒ Überholen links (Standard)	Abstand im Stand: 0,21 m bei 0 km/h
☐ Überholen rechts (Standard)	Abstand beim Fahren: 0,21 m bei 50 km/h

Bild G-4: Anpassung des Querverhaltens auf Basis der Parameter für die Reihensimulation in der Modellierung der Einzelanlagen (siehe Anhang D)

Anhang H: Ergebnisse der Reihensimulation

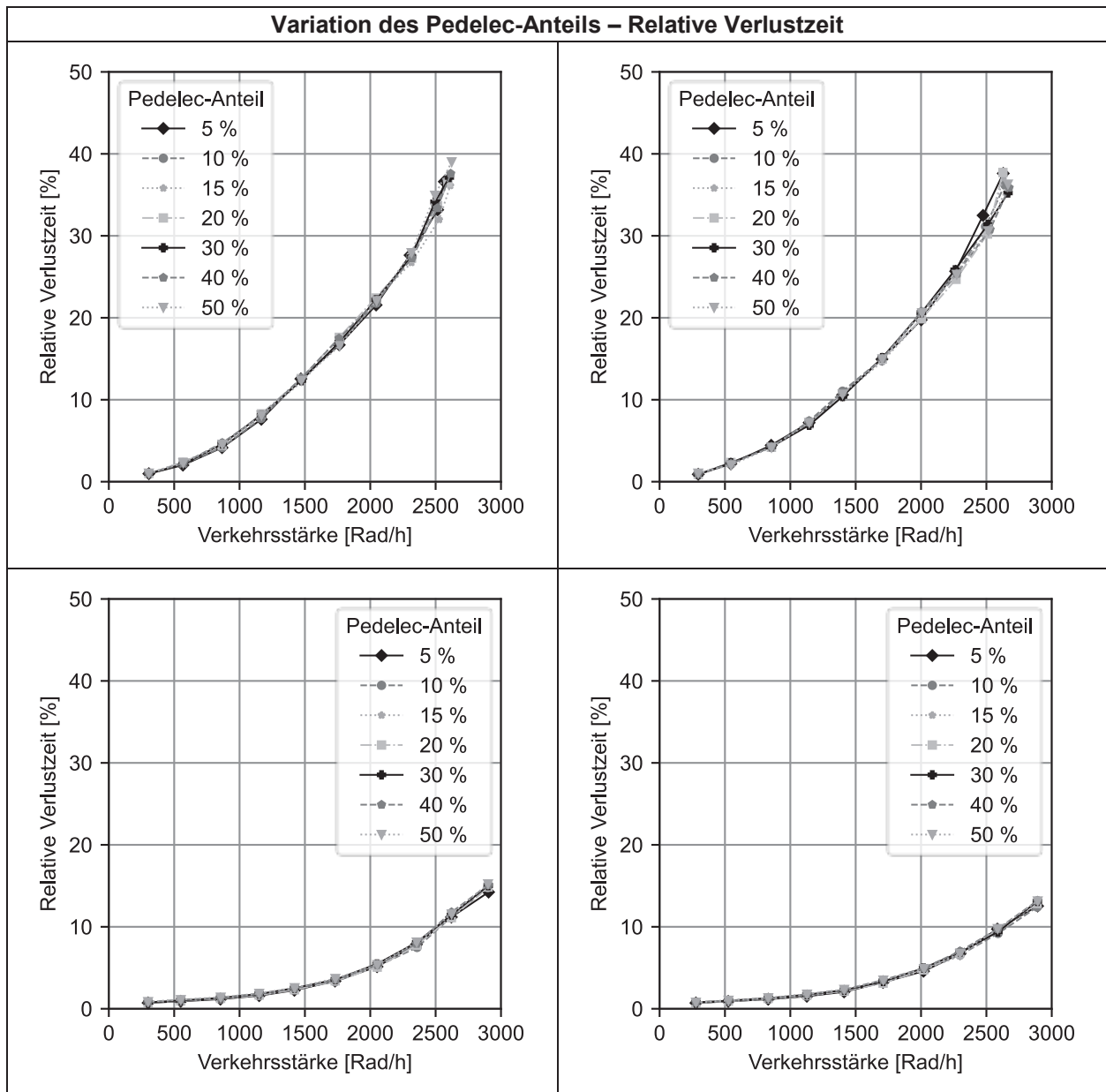


Bild H-1: Einfluss des Pedelec-Anteils auf die relative Verlustzeit auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 3,00 m (unten links) und 3,50 m (unten rechts)

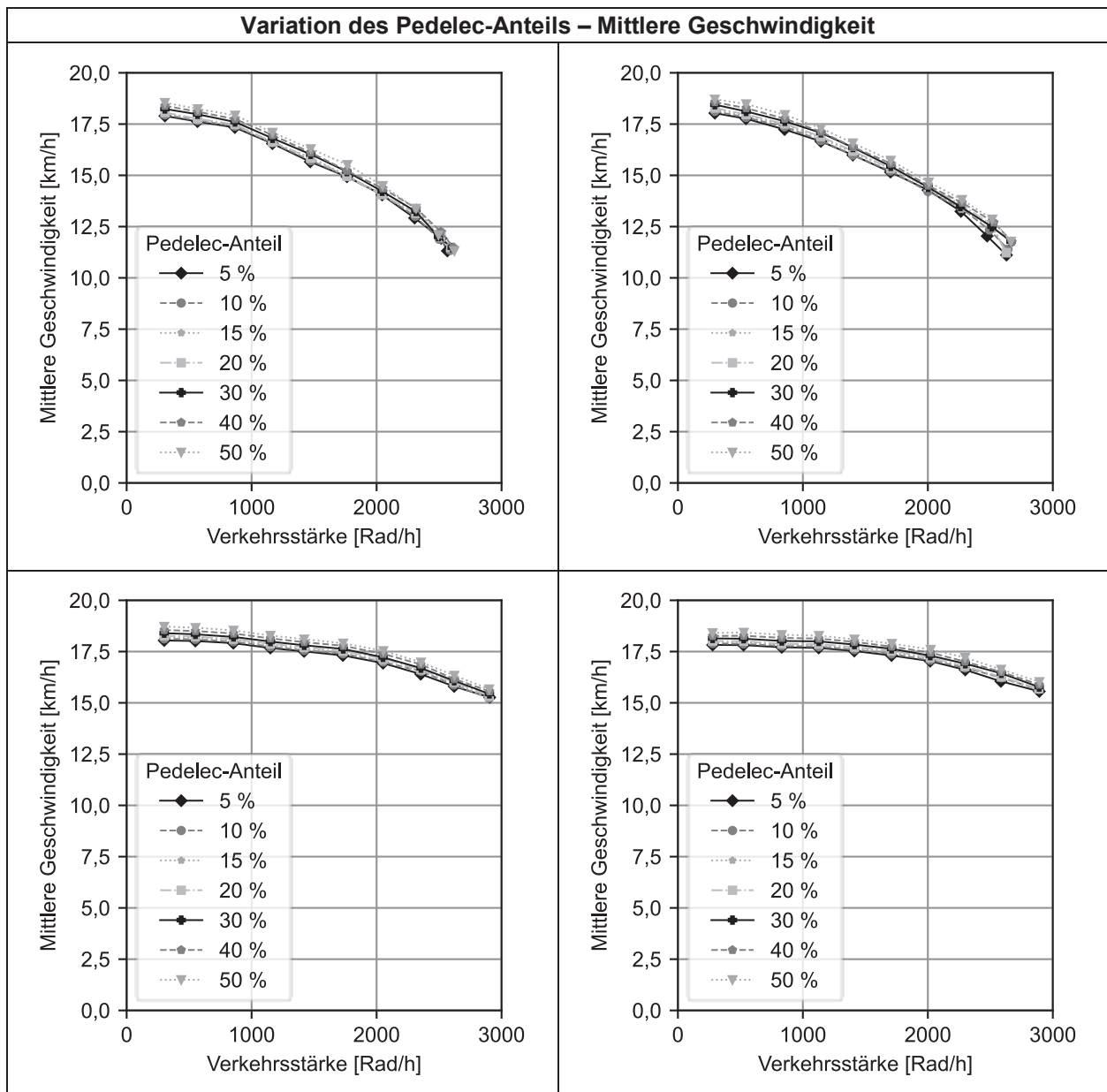


Bild H-2: Einfluss des Pedelec-Anteils auf die mittlere Geschwindigkeit auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 3,00 m (unten links) und 3,50 m (unten rechts)

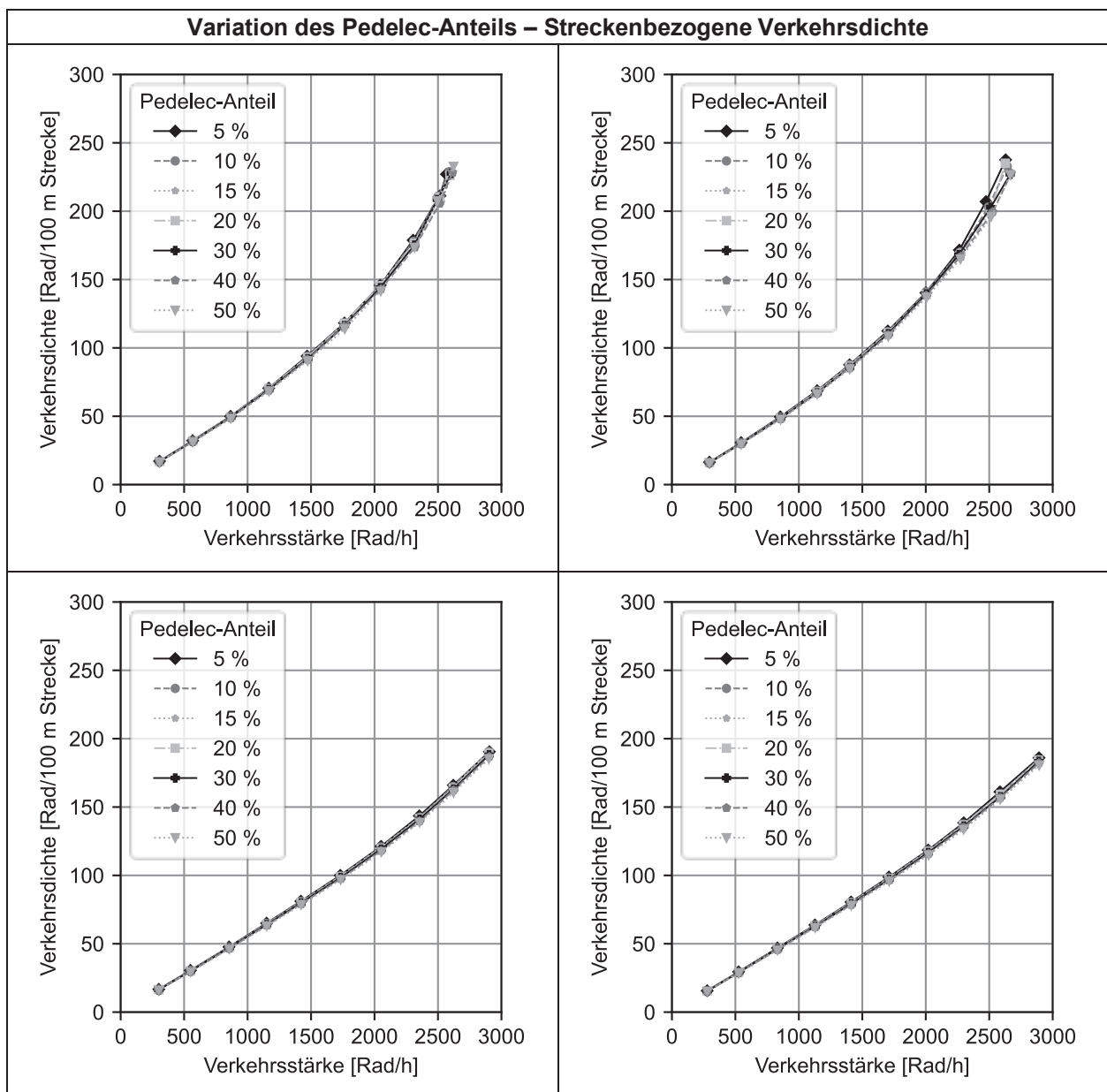


Bild H-3: Einfluss des Pedelec-Anteils auf die streckenbezogene Verkehrsdichte auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 3,00 m (unten links) und 3,50 m (unten rechts)

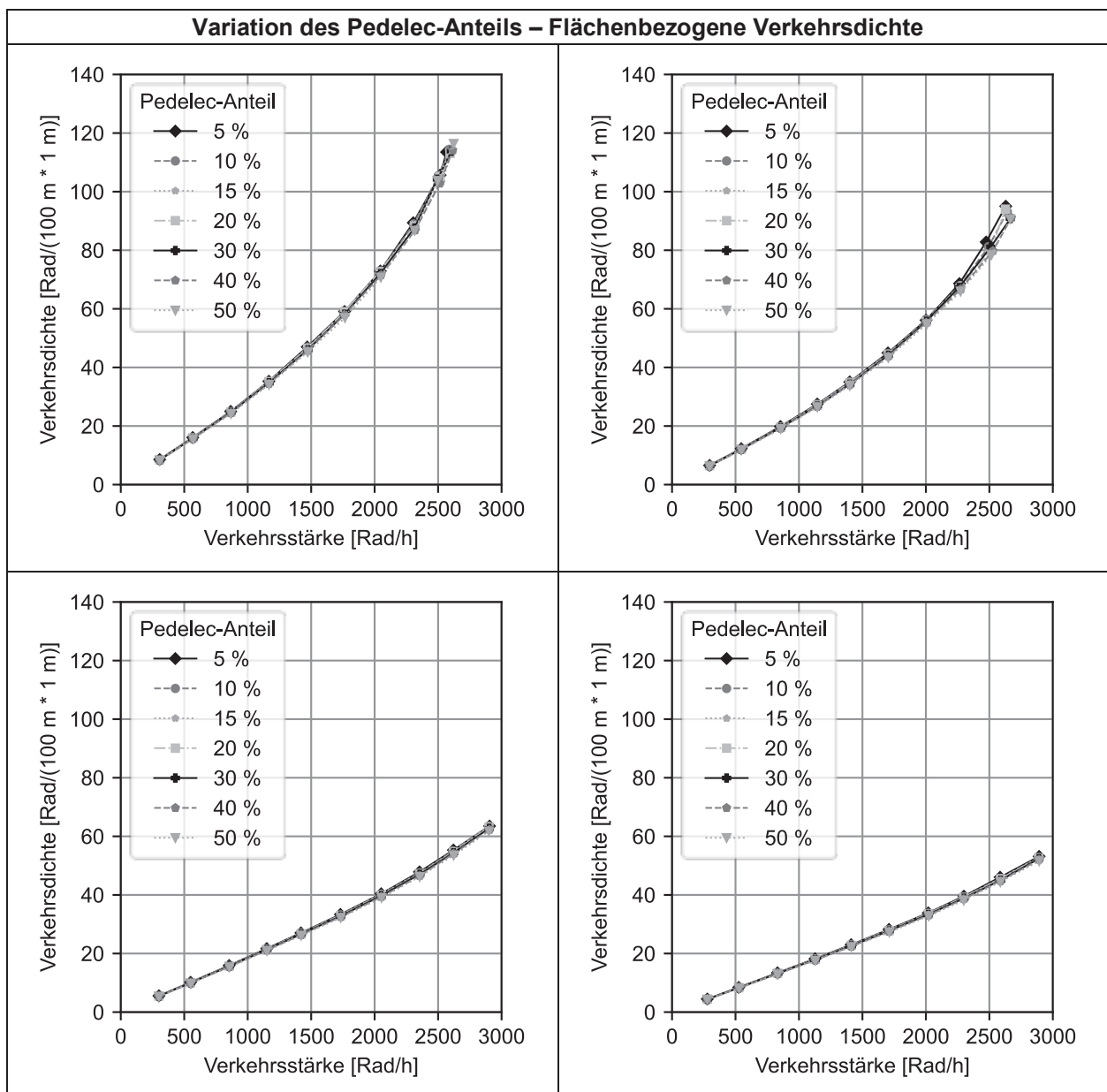


Bild H-4: Einfluss des Pedelec-Anteils auf die flächenbezogene Verkehrsdichte auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 3,00 m (unten links) und 3,50 m (unten rechts)

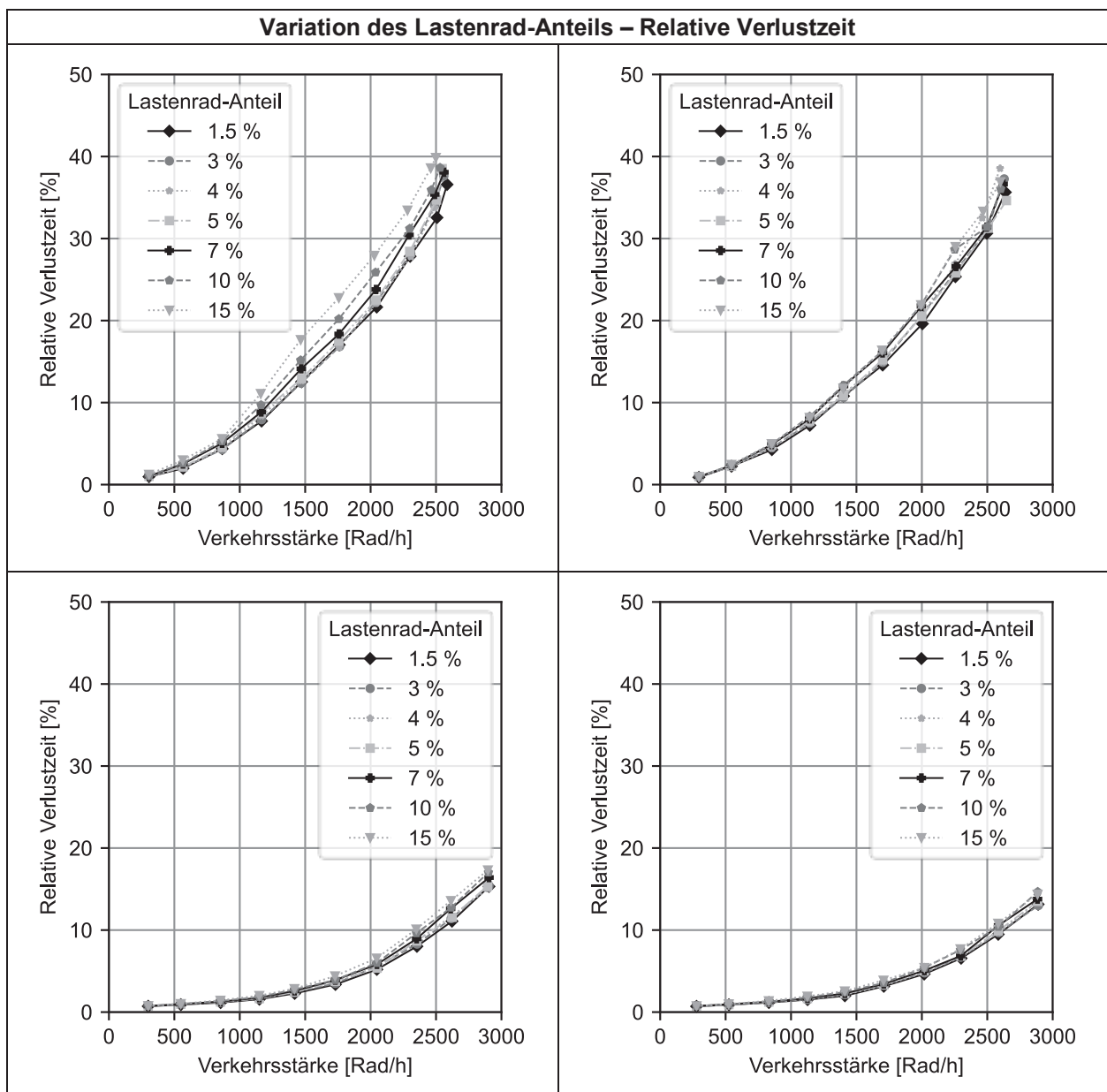


Bild H-5: Einfluss des Lastenrad-Anteils auf die relative Verlustzeit auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 3,00 m (unten links) und 3,50 m (unten rechts)

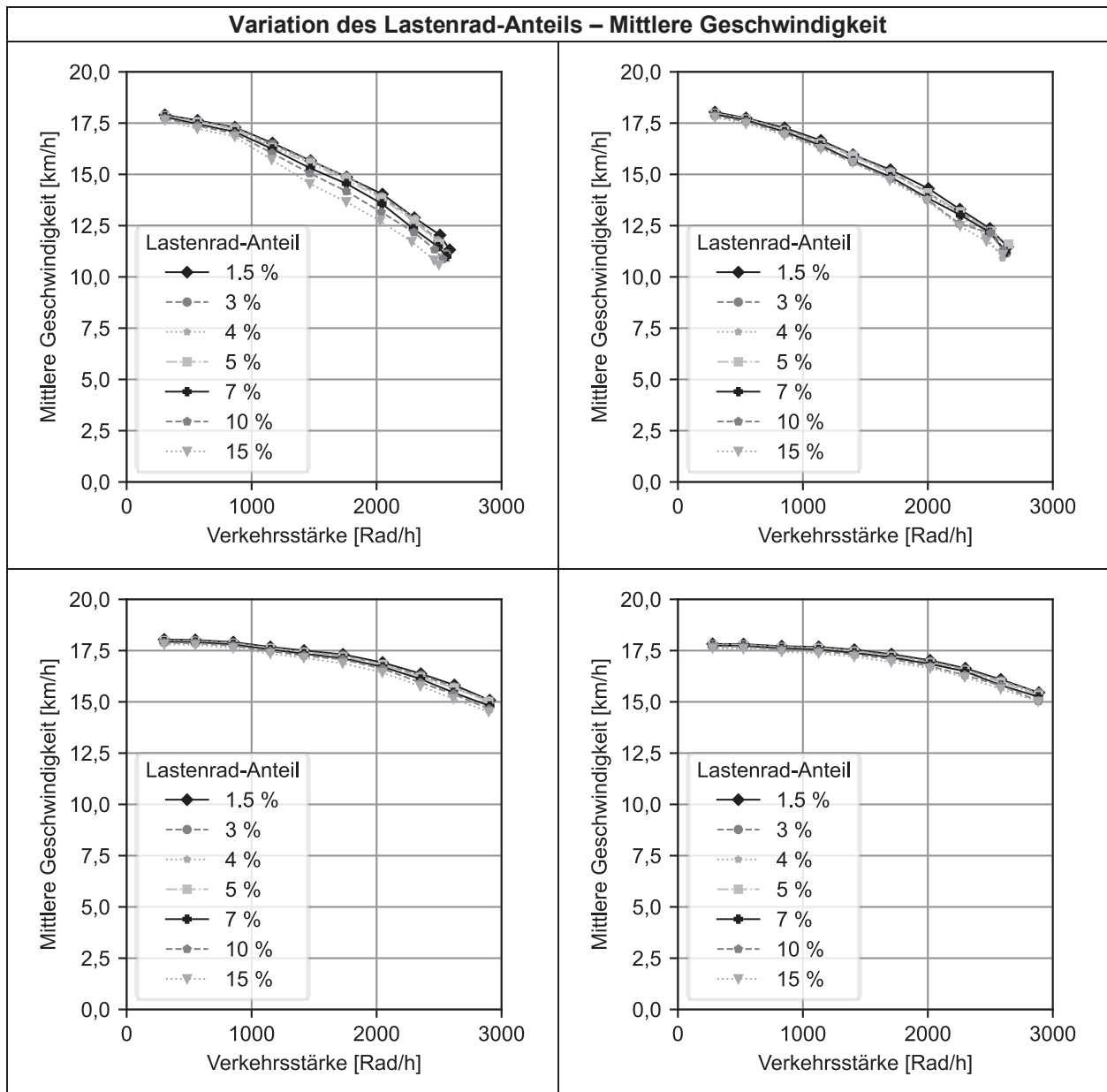


Bild H-6: Einfluss des Lastenrad-Anteils auf die mittlere Geschwindigkeit auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 3,00 m (unten links) und 3,50 m (unten rechts)

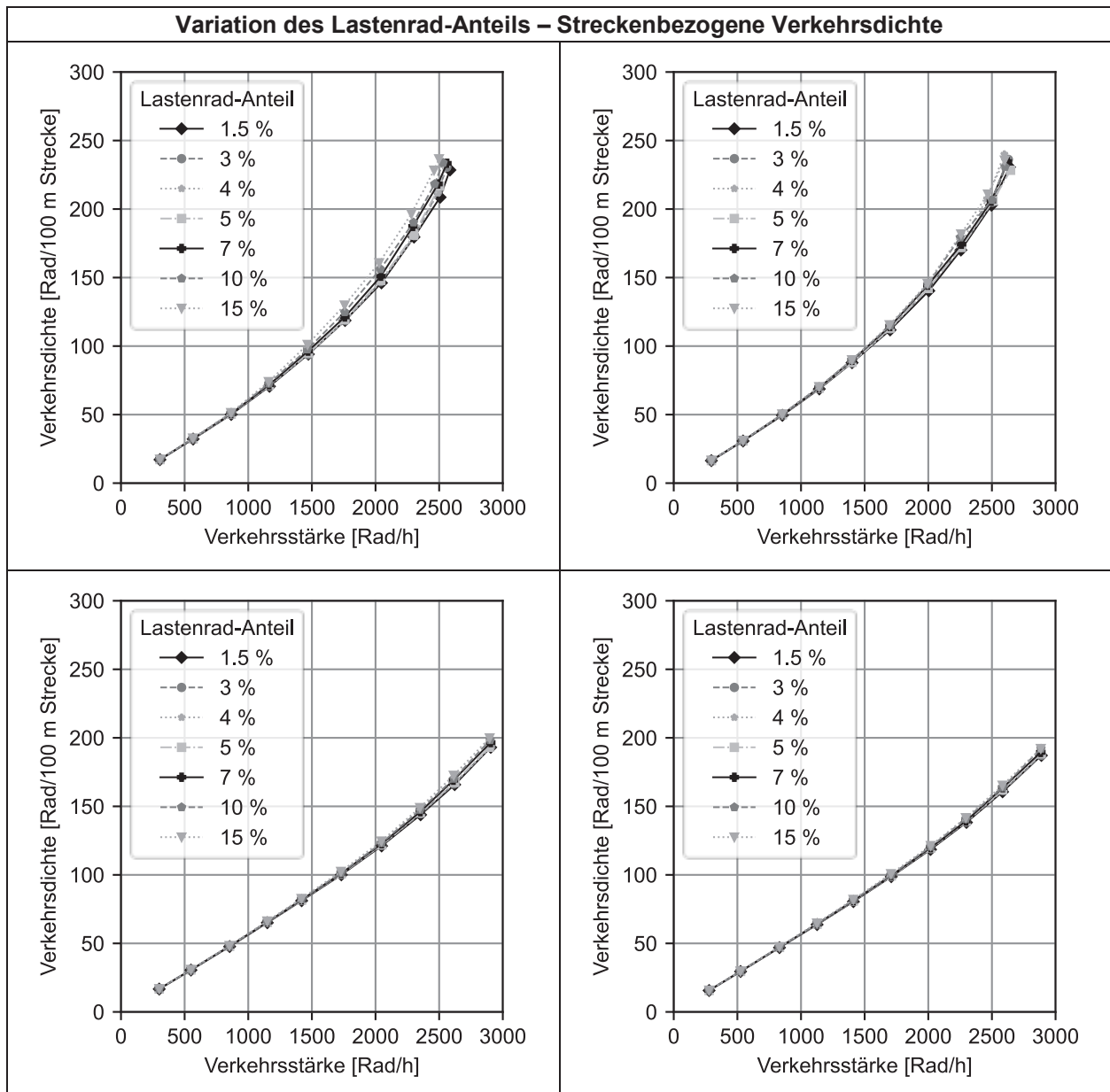


Bild H-7: Einfluss des Lastenrad-Anteils auf die streckenbezogene Verkehrsdichte auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 3,00 m (unten links) und 3,50 m (unten rechts)

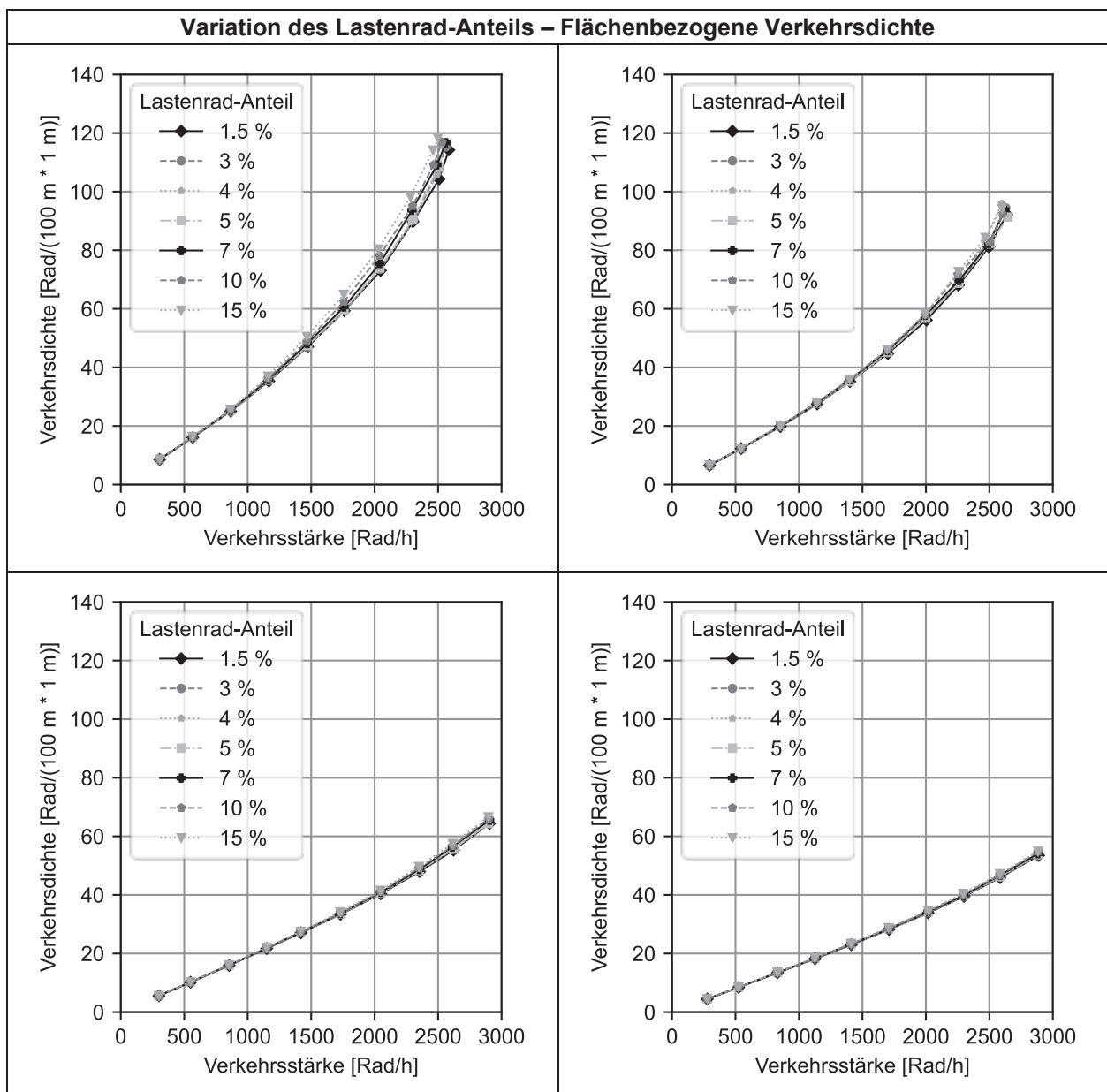


Bild H-8: Einfluss des Lastenrad-Anteils auf die flächenbezogene Verkehrsdichte auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 3,00 m (unten links) und 3,50 m (unten rechts)

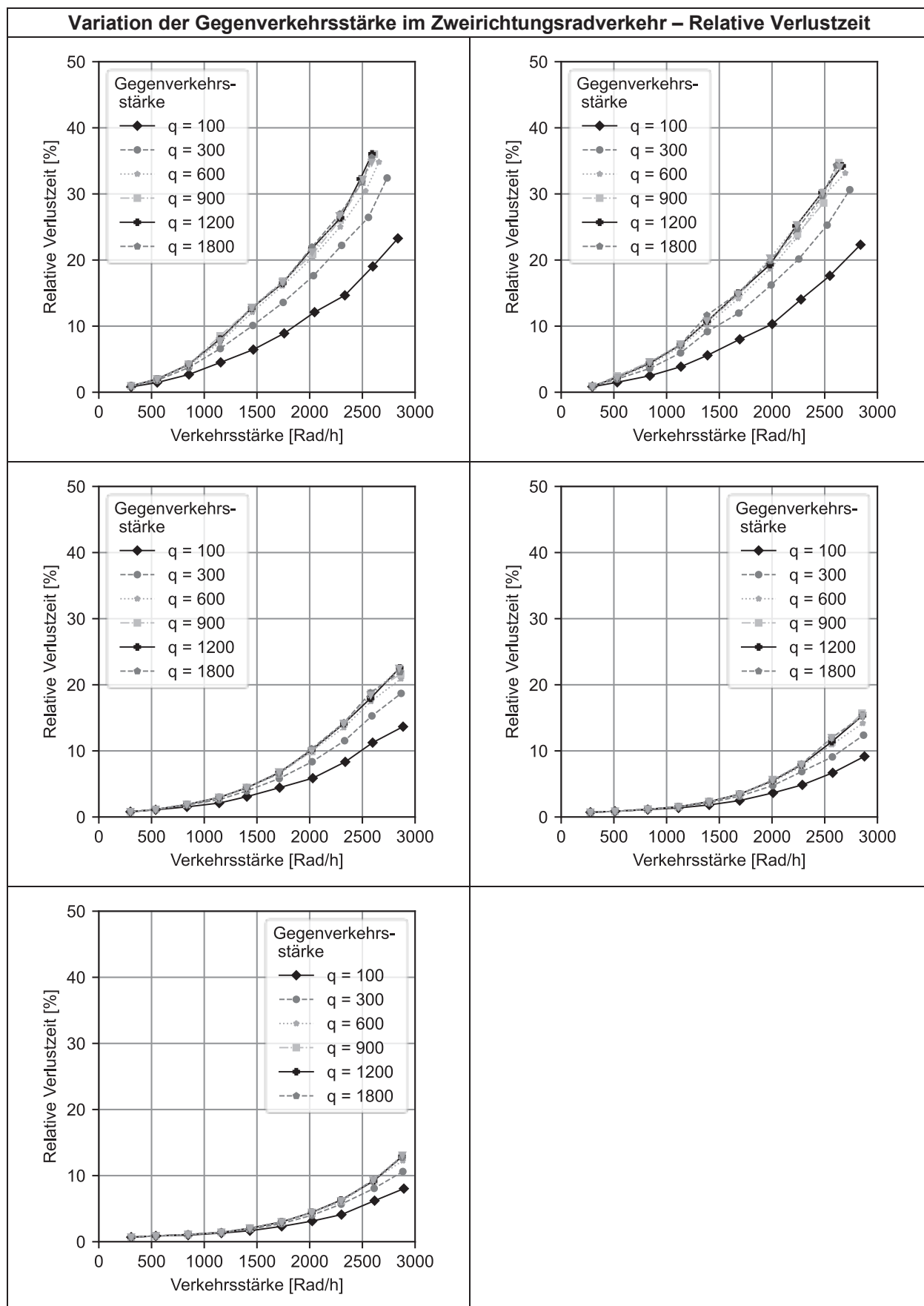


Bild H-9: Einfluss der Gegenverkehrsstärke auf die relative Verlustzeit auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 2,75 m (Mitte links), 3,00 m (Mitte rechts) und 3,50 m (unten links)

Variation der Gegenverkehrsstärke im Zweirichtungsradverkehr – Mittlere Geschwindigkeit

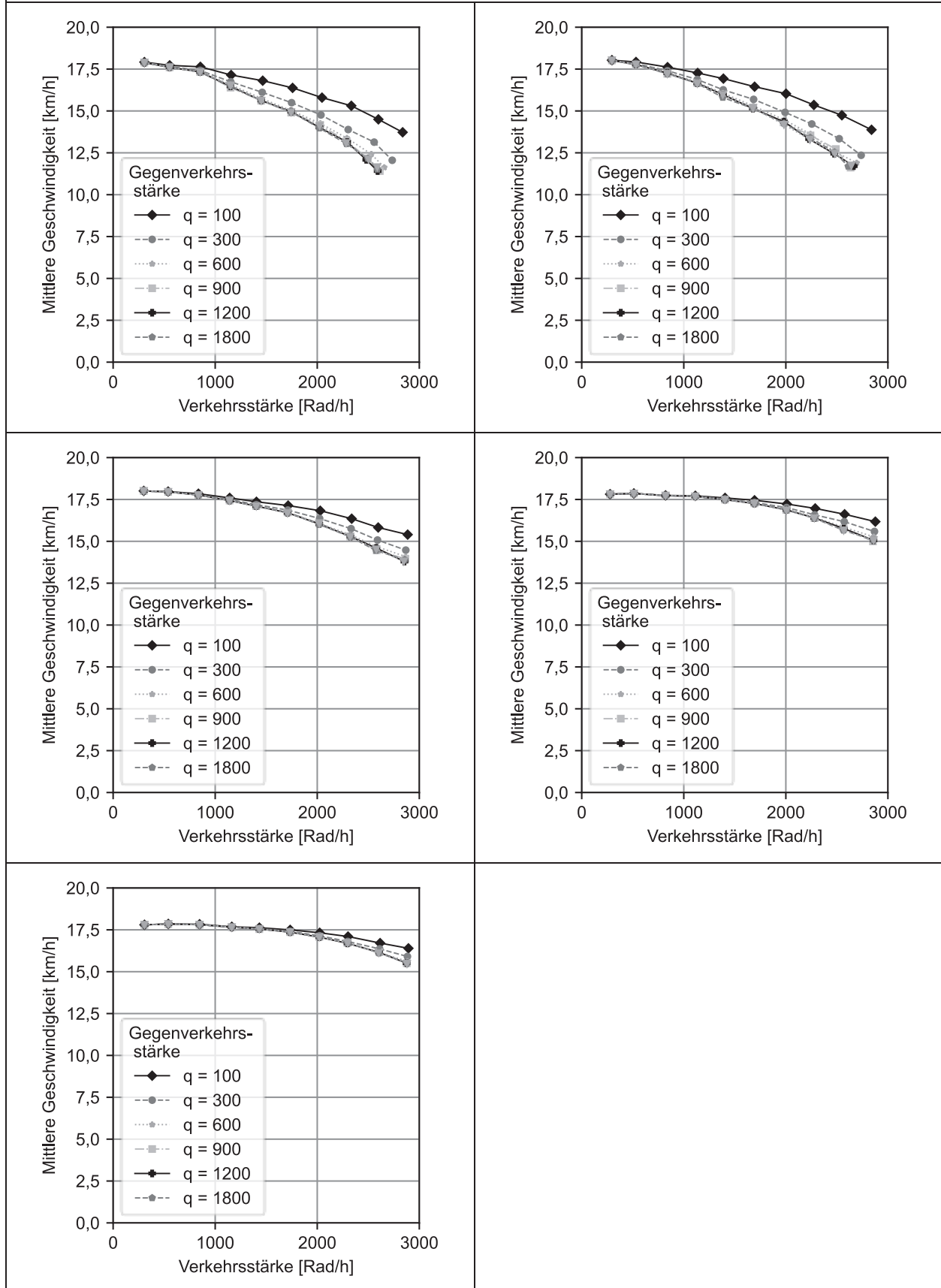


Bild H-10: Einfluss der Gegenverkehrsstärke auf die mittlere Geschwindigkeit auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 2,75 m (Mitte links), 3,00 m (Mitte rechts) und 3,50 m (unten links)

Variation der Gegenverkehrsstärke im Zweirichtungsradverkehr – Streckenbez. Verkehrsdichte

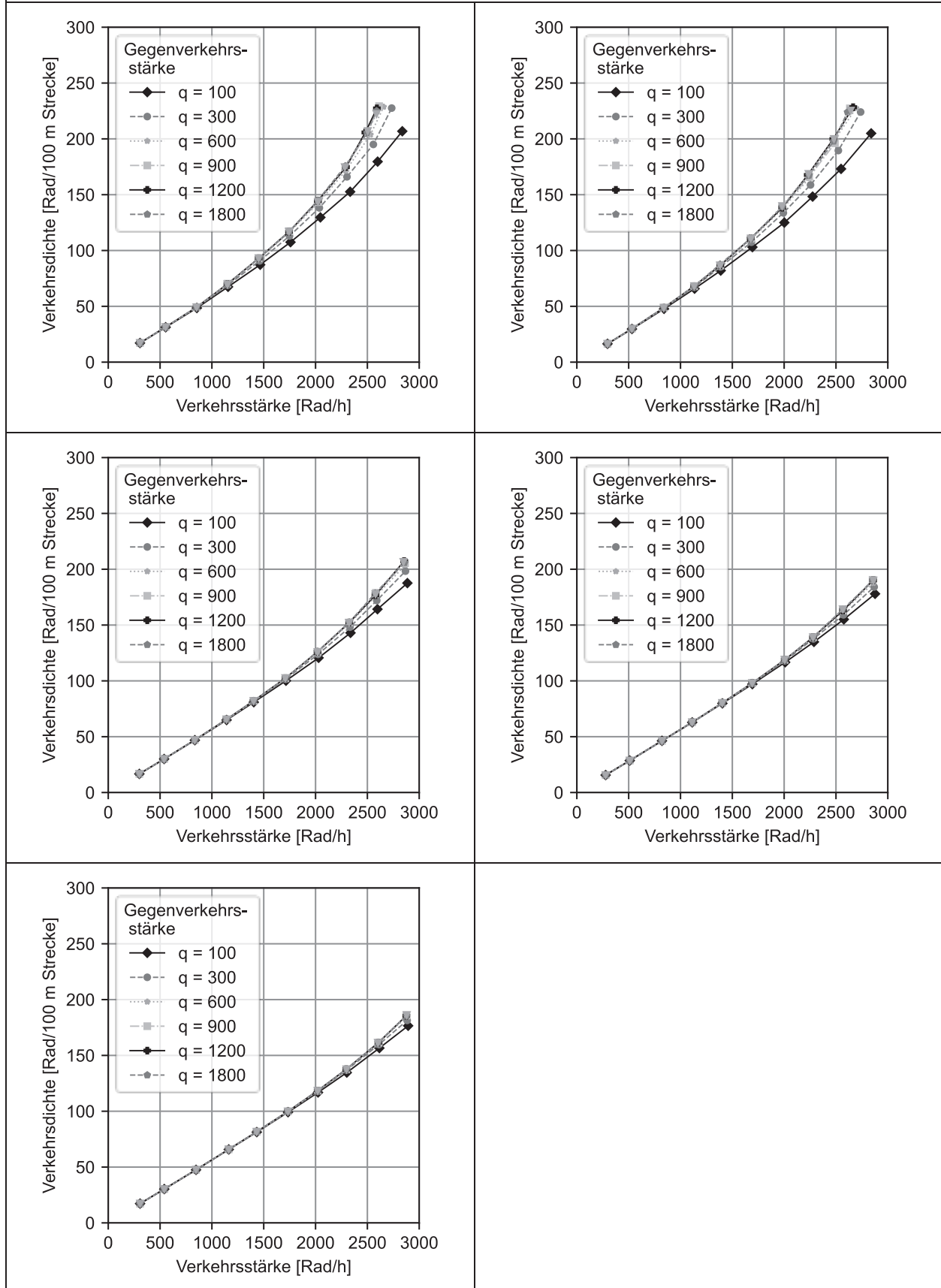


Bild H-11: Einfluss der Gegenverkehrsstärke auf die streckenbezogene Verkehrsdichte auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 2,75 m (Mitte links), 3,00 m (Mitte rechts) und 3,50 m (unten links)

Variation der Gegenverkehrsstärke im Zweirichtungsradverkehr – Flächenbez. Verkehrsdichte

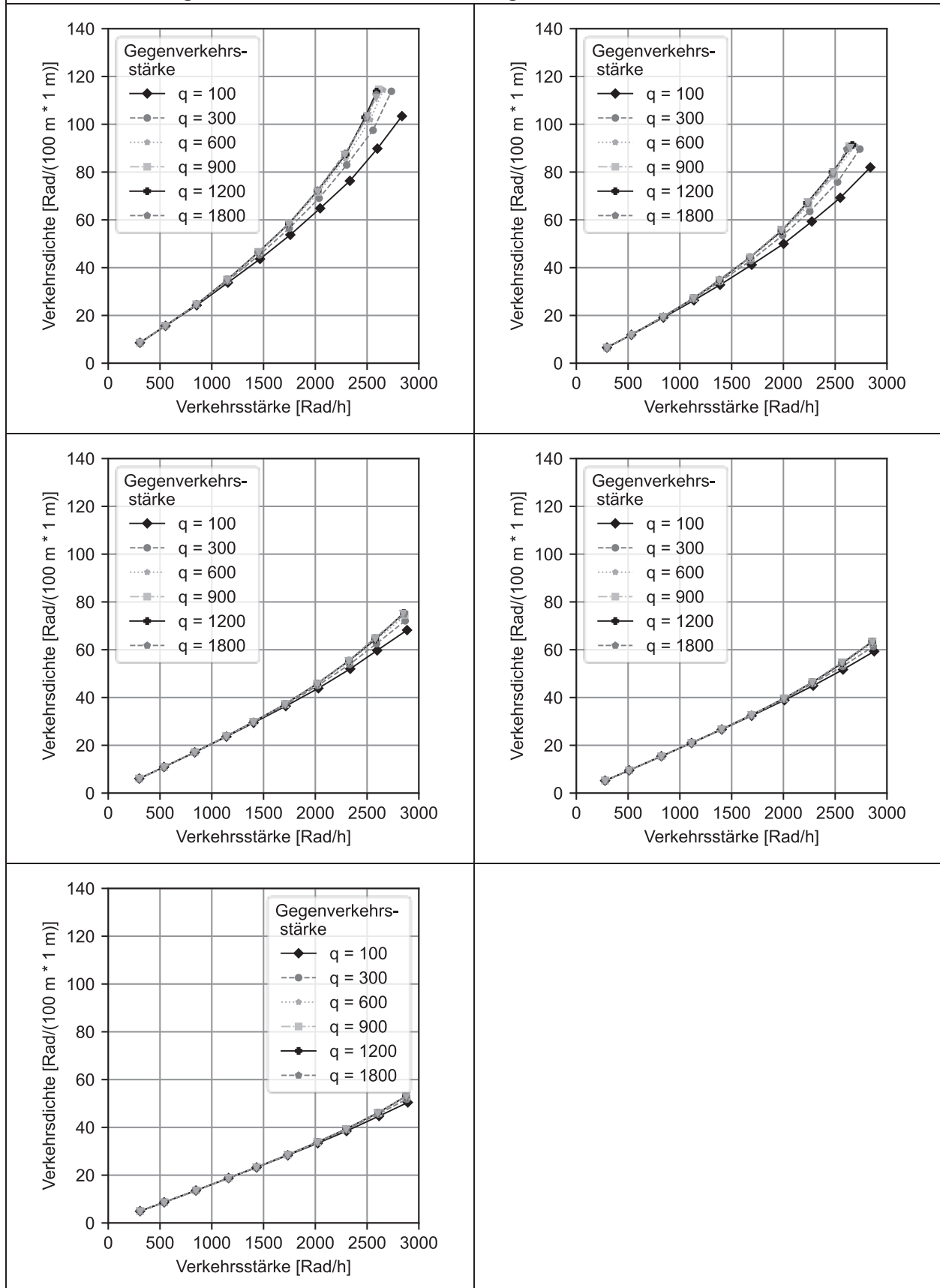


Bild H-12: Einfluss der Gegenverkehrsstärke auf die flächenbezogene Verkehrsdichte auf einer Radverkehrsanlage mit einer Breite von 2,00 m (oben links), 2,50 m (oben rechts), 2,75 m (Mitte links), 3,00 m (Mitte rechts) und 3,50 m (unten links)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Verkehrstechnik“

2023

V 374: Kriterien für die Beurteilung des Gefährdungspotenzials für Motorradfahrer durch scharfkantige Konstruktionsteile in Fahrzeug-Rückhaltesystemen

Kathmann, von Heel, Schimmelpfennig, Reglitz, Kammel, Goergen

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

V 375: Virtuelle Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen mit der Finite-Elemente-Simulation

Fröhlich, Schwedhelm, Kübler, Balzer-Hebborn, Yu

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

V 376: Innovative Datenerfassung und -nutzung im Straßenbetriebsdienst

Hess, Best, Lohmeier, Temme

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

2024

V 377: Verfahren für die Bewertung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen als Ganzjahresanalyse für unterschiedliche Randbedingungen

Geistefeldt, Hohmann

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

V 378: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen

Geistefeldt, von der Heiden, Oeser, Kemper, Diner, Baier, Klemps-Kohnen

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

V 379: Nachhaltige Förderung des Radverkehrs im Winter durch optimierten Winterdienst (WinRad)

Holldorb, Riel, Wiesler, Cypra, März

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

V 380: Maßnahmen zum Umgang mit japanischem Staudenknöterich

Molder, Gaar, Münch, Alberternst

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

V 381: Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme

Lindner, Ruhnau, Schulze

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

V 382: Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen

Ludwig, Tegeler, Schmedes, Tomhave, Hensel, Forster, Kleinhans, Heinrich, John, Schill

€ 19,50

V 383: Analyse und Entwicklung leistungsfähiger Einfahrtstypen ohne Fahrstreifenaddition für Autobahnen

Geistefeldt, Brandenburg, Sauer

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

V 384: Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen – Methoden zur Untersuchung und Metaanalyse

Maier, Leonhardt, Ehm

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

V 385: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Landstraßen

Geistefeldt, Hohmann, Finkbeiner, Sauer, Vortisch, Buck, Weyland, Weiser, Giuliani

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

2025

V 386: Pilothafte Anwendung des Bridge-WIM Verfahrens zur Ergänzung des Achslastmessstellennetzes

Firus, Petschacher

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

V 387: Akustische Wirksamkeit von Vegetation

Lindner, Schulze

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

V 388: Hochaufgelöste multisensorielle Verkehrsdaten in der Streckenbeeinflussung

Schwietering, Löffbering, Weinreis, Maier, Feldges

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

V 389: Lärmwetter in der Praxis – Erprobung und Weiterentwicklung der Methodik zur Anwendung meteorologischer Korrekturen auf die Schallausbreitung

Skowronek, Liepert, Müller, Schady, Elsen

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

V 390: Wirkung von Fahrstreifenbegrenzungen an Einfahrten von Autobahnen auf das Fahrverhalten und auf die Verkehrssicherheit

Geistefeldt, Sauer, Brandenburg

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

V 391: Erprobung psychoakustischer Parameter für innovative Lärminderungsstrategien

Oehme, Böhm, Horn, Pourpart, Schweidler, Weinzierl, Fiebig, Schuck

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

V 392: Evaluierung der Wirksamkeit bestehender Überflughilfen für Fledermäuse an Straßen

Albrecht, Reers, Scharf, Grimm, Radford, Namyslo, Günther, Martin, Behr

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

V 393: Optimierung der Abstände von Anzeigequerschnitten und Messquerschnitten in Streckenbeeinflussungsanlagen

Schwietering, Löffbering, Abarghooie, Geistefeldt, Marnach

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

V 394: Optimierte Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen durch die Berücksichtigung der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2X)

Schendzielorz, Schneider, Künzelmann, Sautter, Höger

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

V 395: Empfehlungen zur Breite von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung der Verkehrsqualität

Geistefeldt, Brandenburg, Vortisch, Buck, Zeidler, Baier

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

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-846-1
<https://doi.org/10.60850/bericht-v395>

www.bast.de