

Einflussfaktoren auf die Akzeptanz und die Verkehrssicherheit des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen

Dissertationsschrift

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden

von Sebastian Hantschel

Gutachter*innen: Prof. Dr.-Ing. Regine Gerike
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gerlach

Tag der Einreichung: 09.02.2022

Tag der Disputation: 03.08.2022

VORWORT

Die vorliegende Arbeit baut auf meinen Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Straßenverkehrstechnik mit dem Fachbereich Theorie der Verkehrsplanung und der Professur für Integrierte Verkehrsplanung und Straßenverkehrstechnik der Fakultät Verkehrswissenschaften der Technischen Universität Dresden zwischen den Jahren 2009 und 2019 auf.

Ich bedanke mich herzlich bei meiner Betreuerin Prof. Dr.-Ing. Regine Gerike für die kontinuierliche Förderung, die Unterstützung bei der Datenbeschaffung und vor allem die sehr regelmäßigen, zeitintensiven, inhaltlichen Diskussionen während des Verfassens dieser Arbeit.

Zudem danke ich Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gerlach für die Bereitschaft das Zweitgutachten zu übernehmen sowie für die Bereitstellung von Daten aus dem im Rahmen des Nationalen Radverkehrsplanes 2020 bearbeiteten Forschungsprojektes „Radfahren bei beengten Verhältnissen – Wirkung von Piktogrammen und Hinweisschildern auf Fahrverhalten und Verkehrssicherheit“.

Ein sehr persönlicher Dank richtet sich an Bettina Schröter, die sowohl fachlich als auch mental während der gesamten Bearbeitung eine große Unterstützung war. Ein weiterer sehr persönlicher Dank richtet sich an meine Familie, allen voran Kasimir, für das Ertragen meiner Launen, aber vor allem auch für die sehr entspannte, gemeinsame Homeschooling/ Homeoffice-Zeit, in der wesentliche Teile dieser Arbeit entstanden sind.

Für unterschiedlichste Hilfe und Anregungen danke ich: Allan Aurich, Markus Enke, Stefan Huber, Franz Kemnitz, Bernhard Kollmus, Benjamin Kühn, Frank Kutzner, Reinhold Maier, Matthias Medicus, Miriam Niestegge, Michael Otto, Martin Schmotz, Hagen Schüller, Erik Wagner.

Für die Bereitstellung von Daten danke ich Marcel Schreiber und Jörg Ortlepp (Unfallforschung der Versicherer des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.), Thilo Becker (Stadt Offenburg), Kristina Bergmann (Polizei Berlin) und Steffen Wenk (Ministerium für Infrastruktur und Landesplanung des Landes Brandenburg).

Dieser Dissertation liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter den FE-Nr. 70.0907/2015 + FE 77.0496/2010 durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

This dissertation is based on parts of the research project carried out at the request of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute, under research project No. FE 70.0907/2015 + FE 77.0496. The author is solely responsible for the content.

INHALT

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	1
1.2 Vorgehen	2
2 Rechtliche Regelungen	4
3 Technische Regelwerke und Empfehlungen.....	8
3.1 National	8
3.2 International.....	11
4 Kenntnisstand Forschung	14
4.1 Unfälle	14
4.1.1 Erkenntnisse im Überblick	14
4.1.2 Radverkehrsführungsform	18
4.1.3 Unfallkonstellationen.....	20
4.1.4 Einflussgrößen.....	22
4.2 Verhalten	25
4.2.1 Erkenntnisse im Überblick	25
4.2.2 Interaktionen.....	30
4.2.3 Akzeptanz.....	32
4.2.4 Seitliche Abstände	34
4.2.5 Geschwindigkeiten.....	38
4.3 Subjektive Verkehrssicherheit und Präferenzen	39
4.3.1 Erkenntnisse im Überblick	39
4.3.2 Präferierte Radverkehrsführungsform	43
4.3.3 Verhaltensweisen	45
4.4 Schlussfolgerungen & Forschungsfragen	47
5 Daten	50
5.1 Infrastruktur.....	50
5.1.1 Untersuchungsabschnitte	50
5.1.2 Räumliche Abgrenzung	51
5.1.3 Erhobene Merkmale	52
5.2 Verkehrsstärke.....	55

5.2.1	Erhebung	55
5.2.2	Hochrechnung Radverkehrsstärke	56
5.2.3	Hochrechnung Fußverkehrsstärke	57
5.2.4	Hochrechnung Kfz-Verkehrsstärke	58
5.3	Unfalldaten.....	59
6	Methodik	61
6.1	Prüfung innerer Abhängigkeiten	61
6.2	Akzeptanzmodell	62
6.2.1	Definitionen.....	62
6.2.2	Statistische Verteilung	63
6.2.3	Modellaufbau	66
6.2.4	Residuenanalyse	71
6.3	Unfallmodell	73
6.3.1	Statistische Verteilung	73
6.3.2	Modellaufbau	74
6.3.3	Residuenanalyse	75
7	Analyse Akzeptanz.....	77
7.1	Datengrundlage im Überblick	77
7.2	Innere Abhängigkeiten.....	81
7.3	Modelle Anteil Fahrbahnnutzung	83
7.3.1	Gesamtmodell Anteil Fahrbahnnutzung	83
7.3.2	Teilmodell Mischverkehr: Anteil Fahrbahnnutzung und Fahrstreifenbreite	89
7.3.3	Teilmodell Schutzstreifen: Anteil Fahrbahnnutzung und Schutzstreifen-/ Fahrstreifenbreite.....	92
7.4	Modelle Anteil linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg	96
7.5	Modellanwendung Anteil Fahrbahnnutzung in Abhängigkeit ausgewählter Merkmale	101
7.6	Fazit.....	105
8	Analyse Unfälle	107
8.1	Unfallkollektiv	107
8.2	Datengrundlage im Überblick	108
8.3	Innere Abhängigkeiten.....	112
8.4	Modelle	114
8.4.1	Gesamtmodell	114
8.4.2	Teilmodell Mischverkehr / Piktogramme	117
8.4.3	Teilmodell Schutzstreifen.....	120
8.4.4	Teilmodelle nach Unfalltypen.....	123

8.5	Modellanwendung Radverkehrsunfälle in Abhängigkeit ausgewählter Merkmale	129
8.6	Fazit.....	133
9	Synthese & Empfehlungen.....	135
10	Methodische Diskussion & Ausblick.....	143
11	Zusammenfassung.....	145
	Literaturverzeichnis	147
	Anlagen	157

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Bild 1-1	Übersicht Untersuchungsablauf.....	3
Bild 3-1	Belastungsbereiche zur Vorauswahl von Radverkehrsführungen bei zwei- (links) und vierstreifigen (rechts) Stadtstraßen (FGSV 2010a, S. 19)	9
Bild 4-1	Anteil der Nutzung der Radverkehrsführung durch Radfahrende aus verschiedenen Quellen im Überblick.....	32
Bild 5-1	Beispiel räumliche Abgrenzung Untersuchungsabschnitte (eigene Darstellung; Kartengrundlage: Openstreetmap)	52
Bild 6-1	Definition der Akzeptanz.....	63
Bild 6-2	Histogramme der Verteilungen des Anteils der Fahrbahnnutzung (A_{Fb}) sowie des Anteil linksfahrender Radfahrender ($A_{Gw, li}$).....	64
Bild 6-3	Beispiel für einen CURE-Plot (Hantschel et al. 2016, S. 170)	75
Bild 7-1	Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn berechnet (lineares Modell) und empirisch.....	84
Bild 7-2	QQ-Plot (links) und Tukey-Anscombe-Plot (rechts) der linearen Regression zum Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn	85
Bild 7-3	Anteilige Reduzierung der Devianz durch die unabhängigen Variablen	87
Bild 7-4	Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn berechnet (logistisches Modell) und empirisch (links) und Tukey-Anscombe-Plot der logistischen Regression zum Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn (rechts)	88
Bild 7-5	Anteilige Reduzierung der Devianz durch die unabhängigen Variablen – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit und ohne Piktogramme	91
Bild 7-6	Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn berechnet (logistisches Modell) und empirisch (links) und Tukey-Anscombe-Plot der logistischen Regression zum Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn (rechts) – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit und ohne Piktogramme	92
Bild 7-7	Anteilige Reduzierung der Devianz durch die unabhängigen Variablen – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit Schutzstreifen.....	94
Bild 7-8	Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn berechnet (logistisches Modell) und empirisch (links) und Tukey-Anscombe-Plot der logistischen Regression zum Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn (rechts) – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit Schutzstreifen.....	95
Bild 7-9	Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg berechnet (lineares Modell) und empirisch	97
Bild 7-10	QQ-Plot (links) und Tukey-Anscombe-Plot (rechts) der linearen Regression zum Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg	98
Bild 7-11	Anteilige Reduzierung der Devianz durch die unabhängigen Variablen	100
Bild 7-12	Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg berechnet (logistisches Modell) und empirisch (links) und Tukey-Anscombe-Plot (rechts) der logistischen Regression zum Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg	100
Bild 7-13	Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn auf einstreifigen Richtungsfahrbahnen in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform, Kfz-Verkehrsstärke und der zulässigen Geschwindigkeit	102

Bild 7-14	Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Abhängigkeit der Kfz-Verkehrsstärke, der zulässigen Geschwindigkeit und der Radverkehrsstärke auf einstreifigen Richtungsfahrbahnen mit Mischverkehr ohne (links) und mit Piktogrammen (rechts).....	104
Bild 7-15	Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Abhängigkeit der Kfz-Verkehrsstärke, der zulässigen Geschwindigkeit und der Radverkehrsstärke auf einstreifigen Richtungsfahrbahnen mit Schutzstreifen.....	104
Bild 8-1	Verteilung der Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) differenziert nach Unfalltypen (links) und Beteiligtenkonstellationen (rechts)	107
Bild 8-2	Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat/ df) der Variablen – Gesamtmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), alle Abschnitte.....	115
Bild 8-3	Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (links) und CURE-Plot (rechts) – Gesamtmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), alle Abschnitte.....	116
Bild 8-4	Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat/ df) der Variablen – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen	119
Bild 8-5	Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (links) und CURE-Plot (rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen	120
Bild 8-6	Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat/ df) der Variablen – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Schutzstreifen.....	122
Bild 8-7	Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (links) und CURE-Plot (rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Schutzstreifen.....	123
Bild 8-8	Erklärungsgehalt der Merkmale innerhalb der Teilmodelle differenziert nach Radverkehrsführungsform und Unfalltypen	129
Bild 8-9	Unfallraten in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform, Kfz-Verkehrsstärke und der zulässigen Geschwindigkeit.....	131
Bild 8-10	Unfallraten in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform, Rad- und Kfz-Verkehrsstärke für Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen (links; zusätzlich in Abhängigkeit der zulässigen Geschwindigkeit) und Abschnitte mit Schutzstreifen (rechts)	132

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 3-1	Einsatzbereiche der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf zweistreifigen Streckenabschnitten ohne Schutzstreifen nach FGSV (2006) und FGSV (2010a)im Vergleich	9
Tab. 3-2	Übersicht von Einsatzgrenzen für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen oder Piktogramme.....	13
Tab. 3-3	Übersicht von Gestaltungsempfehlungen für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen oder Piktogramme	13
Tab. 4-1	Datengrundlagen, methodische Aspekte und wesentliche Erkenntnisse (Ref. = Referenz; „+“ = unfallerhöhend; „-“ = unfallreduzierend) der analysierten Studien zum Unfallgeschehen.....	16
Tab. 4-2	Überblick zu ermittelten Unfallraten in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform.....	18
Tab. 4-3	Datengrundlagen, methodische Aspekte und wesentliche Erkenntnisse der analysierten Studien zum Verhalten	27
Tab. 4-4	Datengrundlagen, methodische Aspekte und wesentliche Erkenntnisse der analysierten Studien zu Befragungen	41
Tab. 5-1	Kriterien für die Auswahl der Untersuchungsabschnitte in Schüller et al. (2020b), Ohm et al. (2015), Richter (2019) und Koppers et al. (2021)	50
Tab. 5-2	Erhobene Infrastrukturmerkmale im Überblick	53
Tab. 5-3	Auswerteziträume zur Erhebung der Verkehrsstärken bei Schüller et al. (2020b, S. 28), Ohm et al. (2015, S. 54), Richter (2019, k. A. im Bericht) und Koppers et al. (2021, S. 26).....	56
Tab. 5-4	Verwendete Unfalldaten	60
Tab. 6-1	Definition des Skalenniveaus der nominalen Variablen.....	62
Tab. 6-2	Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnov- und Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung des Anteils der Fahrbahnutzung (A_{Fb}) sowie des Anteil linksfahrender Radfahrender ($A_{Gw, li}$)	64
Tab. 6-3	Interpretationshilfe für Regressionskoeffizienten und Odds Ratios nach UZH (2020).....	69
Tab. 7-1	Überblick metrische Variablen und deren Verteilung – Akzeptanzmodelle.....	77
Tab. 7-2	Überblick kategoriale (ordinale) Variablen und deren Verteilung – Akzeptanzmodelle	79
Tab. 7-3	Korrelationsmatrix (Spearman's Rho) der unabhängigen Variablen – Akzeptanzmodelle	82
Tab. 7-4	Lineares Regressionsmodell Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Richtung i.....	84
Tab. 7-5	Logistisches Regressionsmodell Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Richtung i.....	86
Tab. 7-6	Logistisches Regressionsmodell Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Richtung i – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit und ohne Piktogramme	90
Tab. 7-7	Logistisches Regressionsmodell Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Richtung i – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit Schutzstreifen	93
Tab. 7-8	Lineares Regressionsmodell Anteil linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg in Richtung i	96
Tab. 7-9	Logistisches Regressionsmodell Anteil linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg in Richtung i.....	99
Tab. 8-1	Überblick metrische Variablen und deren Verteilung – Unfallmodelle	109
Tab. 8-2	Überblick kategoriale (ordinale) Variablen und deren Verteilung – Unfallmodelle	110

Tab. 8-3	Korrelationsmatrix (Spearmans Rho) der unabhängigen Variablen – Unfallmodelle.....	113
Tab. 8-4	Gesamtmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), alle Abschnitte.....	114
Tab. 8-5	Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen	118
Tab. 8-6	Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Schutzstreifen.....	121
Tab. 8-7	Teilmodelle Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) differenziert nach Radverkehrsführungsform und Unfalltypen	127
Tab. 9-1	Empfehlungen für Einsatzgrenzen der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen oder Piktogrammen auf zweistreifigen Hauptverkehrsstraßen.....	140
Tab. 9-2	Gestaltungsempfehlungen für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen oder Piktogrammen auf zweistreifigen Hauptverkehrsstraßen.....	142

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A_{Fb}	Anteil Radfahrender auf der Fahrbahn
$A_{Gw, li}$	Anteil linksfahrender Radfahrender auf dem Gehweg
B_{FS}	nutzbare Fahrstreifenbreite
B_{GW}	Breite Gehweg
$B_{RVFSich}$	Breite Sicherheitsraum zum ruhenden Verkehr
BSSF	Breite Schutzstreifen
DTV	durchschnittlich täglicher Verkehr
EUSka	Elektronische Unfalltypen-Steckkarte
Fb	Fahrbahn
Fg	Gehende
Gw	Gehweg
KP	Knotenpunkt
Kfz	Kraftfahrzeug
$Lage_{rV}$	Lage des ruhenden Verkehrs
L_G/ AL_G	Länge/ Anteil Länge Geschäftsbesatz
L_{ges}	Länge des Untersuchungsabschnittes Gesamt
L_{GR}/ AL_{GR}	Länge/ Anteil Länge bewirtschaftete Grünflächen (Parks, Spielplätze, Friedhöfe)
L_{rV}/ AL_{rV}	Länge/ Anteil Länge ruhender Verkehr
LSO/ AL_{SO}	Länge/ Anteil Länge sonstige gewerbliche Nutzung
LW/ AL_W	Länge/ Anteil Länge Wohnbebauung
LWG/ AL_{WG}	Länge/ Anteil Länge Wohnbebauung mit Geschäftsbesatz
Max	Maximum
Min	Minimum
Mittel	Mittelwert
MT	Mitteltrennung
MV30	Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Markierung und $v_{zul} = 30$ km/h
MV50	Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Markierung und $v_{zul} = 50$ km/h
$N_{AKP,LSA}$	Anzahl Anschlussknotenpunkte mit Lichtsignalanlage
$N_{AKP,VZ}$	Anzahl Anschlussknotenpunkte mit Vorfahrtzeichenregelung
N_{BusHST}	Anzahl Bushaltestellen
N_{FBT}	Anzahl Mittelinseln/ Fahrbahnteiler (Querungsanlage)
$N_{FGÜ}$	Anzahl Fußgänger*innenüberwege (Querungsanlage)
N_{FLSA}	Anzahl Lichtsignalanlagen als Querungsanlage

N _{FS}	Anzahl Fahrstreifen
N _{KPA}	Anzahl Knotenpunktarme
N _{StrabHST}	Anzahl Straßenbahnhaltstellen
N _{Zf, G}	Anzahl Grundstückszufahrten Geschäftlich
N _{Zf, W}	Anzahl Grundstückszufahrten Wohnen
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
Pikto	Piktogramme
q	Verkehrsstärke
Q 15	15 %-Quantil
Q 85	85 %-Quantil
Rf	Radfahrende
RFS	Radfahrstreifen
Ri	Richtung
RMSE	root mean square error (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers)
rV	ruhender Verkehr
rV-Art	Art der Anordnung des ruhenden Verkehrs
RVF	Radverkehrsführungsform
RW	Radweg
SrV	System repräsentativer Verkehrserhebungen
SSF	Schutzstreifen
UF	Umfeldfaktor
U _{Rf} (P)	Radverkehrsunfälle mit Personenschaden
U _{Rf} (P,S)	Radverkehrsunfälle mit Personen- und Sachschaden
U _{Rf} (P,SS)	Radverkehrsunfälle mit Personen- und schwerwiegende Radverkehrsunfälle mit Sachschaden
UR _{Rf} (P)	Unfallraten der Radverkehrsunfälle mit Personenschaden
UTyp F	Unfalltyp 1 Fahrrunfall
UTyp AB	Unfalltyp 2 Abbiege-Unfall
UTyp EK	Unfalltyp 3 Einbiegen/ Kreuzen-Unfall
UTyp ÜS	Unfalltyp 4 Überschreiten-Unfall
UTyp RV	Unfalltyp 5 Unfall durch ruhenden Verkehr
UTyp LV	Unfalltyp 6 Unfall im Längsverkehr
UTyp SO	Unfalltyp 7 Sonstiger Unfall
VZ _{Gw}	Verkehrszeichen Gehweg
v _{zul}	zulässige Geschwindigkeit
ZST_SrV	Gruppierung der Untersuchungsstädte nach Zentralität, Stadtgröße und Topografie (SrV)

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Veränderungen im Mobilitätsverhalten hin zu einer umweltfreundlichen Fortbewegung sind unter anderem mit einer Steigerung der Attraktivität des Radverkehrs verbunden. Radfahren ist flexibel, schnell, kostengünstig, gesundheitsfördernd, kommunikativ und macht Spaß. Insbesondere in Städten gewährleistet es zudem ein hohes Maß an Flexibilität und ist hinsichtlich von Reisezeiten sehr zuverlässig. Hohe Radverkehrsanteile sind auch aus gesamtgesellschaftlicher Sicht wünschenswert, da sie sich positiv auf verkehrliche Umweltwirkungen wie z.B. Emissionen von Treibhausgasen, Luftschadstoffen oder Lärm auswirken. Weiterhin zeichnet sich der Radverkehr durch einen verminderten Flächenbedarf im Vergleich zum motorisierten Verkehr und damit verbunden auch verbesserten Gestaltungsmöglichkeiten für attraktive Straßen und öffentliche Räume aus. Diese zeitgemäße und sozialpolitisch gewollte Entwicklung setzt ein entsprechend sicheres und attraktives Radverkehrsnetz voraus. So ist auch das Ziel des nationalen Radverkehrsplans 3.0 des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur den Radverkehr mehr, besser und sicher zu machen (BMVI 2021, S. 6).

Die Steigerung des Radverkehrsanteils aufgrund der Erhöhung der Attraktivität des Radverkehrs insbesondere in urbanisierten Räumen, bei gleichzeitig begrenzten finanziellen Mitteln und Flächenverfügbarkeiten erhöht zusätzlich den Bedarf an einfachen Führungsformen. Das ist vor allem dann der Fall, wenn die Platzverhältnisse aufgrund historisch gewachsener netzplanerischer Strukturen stark begrenzt ist. Konkret betrifft dies Hauptverkehrsstraßen, die unabhängig von den rechtlichen Randbedingungen (Radwegebenutzungspflicht) eine Anordnung von Radverkehrsanlagen (Radfahrstreifen und Radwege) aufgrund enger und zum Teil intensiv genutzter Randbebauung nicht möglich machen. Häufig müssen solche Straßen auch den Ansprüchen des ruhenden Verkehrs sowie des ÖPNV genügen. Entsprechend überlagern sich hier eine Vielzahl von Ansprüchen bei begrenzten Möglichkeiten der Gestaltung dieser Verkehrsanlagen. Aus diesen Gründen hat die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr, welche in verkehrsberuhigten Bereichen die zu bevorzugende Lösung ist, auf Hauptverkehrsstraßen vor allem im Bestand eine sehr hohe Bedeutung (Schüller et al. 2020b, S. 39). Innerhalb vorliegender Arbeit stehen Hauptverkehrsstraßen im Fokus. Diese sind nach FGSV (2009b, S. 18) der Verkehrswegekategorie für den Kfz-Verkehr Hauptverkehrsstraße (HS) sowie für den Radverkehr der Verkehrswegekategorien innergemeindlicher Radhaupt- (IR III) und Radverkehrsverbindungen (IR IV) zuzuordnen.

Die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr kann nach den derzeit geltenden Regelwerken ohne weitere Maßnahmen sowie mit Schutzstreifen umgesetzt werden (FGSV 2010a, S. 18 ff.). Zudem wird vor allem im internationalen Raum (NTA 2011; Austroads 2014; MTO 2013; AASHTO 2012) auch die Markierung von Radpiktogrammen auf der Fahrbahn für die Steigerung der Wahrnehmung von Radfahrenden empfohlen. Auch wenn es durch die Regelwerke derzeit nicht abgedeckt wird, kommen Piktogramme seit einigen Jahren auch in deutschen Städten zum Einsatz (vgl. Koppers et al. 2021, S. 22).

Zur Führung des Radverkehrs im Mischverkehr liegen lediglich für schmale vier- und zweistreifige Hauptverkehrsstraßen gesicherte Erkenntnisse zur Verkehrssicherheit und Akzeptanz vor (Schüller et al. 2020b). Je nach Vorhandensein von ruhendem Verkehr betrifft dies nutzbare Fahrbahnbreiten (ohne Sicherheitsabstände zum ruhenden Verkehr von mindestens 0,50 m) für zweistreifige Straßen unter 8,00 m. Bei vierstreifigen Straßen betrifft dies, je nach Vorhandensein von ruhendem Verkehr, bis unter 14,50 m. Dabei wurde aber nicht explizit untersucht, wie sich das Unfallgeschehen bei Breiten zwischen 6,00 m und 7,00 m verhält. Denn nach den Empfehlungen für Radverkehrsanlagen (ERA) kann die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr bei Breiten zwischen 6,00 und 7,00 m sowie Kfz-Verkehrsstärken von über 400 Kfz/h (Spitzenstunde) „*problematisch*“ sein (FGSV 2010a). Bei geringeren Breiten wird eine Kfz-Verkehrsstärke von 700 Kfz/h als verträglich angesehen, da Radfahrende „*im Begegnungsfall Kfz-Kfz nicht überholt werden*“ können sein (FGSV 2010a, S. 22).

Eine ebenfalls offene Fragestellung betrifft die Einordnung des Unfallgeschehens von markierten Führungshilfen für den Radverkehr im Mischverkehr, dies ist vorrangig die Führung mit Schutzstreifen. Ab Breiten von 7,50 m können Schutzstreifen zur Anwendung kommen. Damit wird bei einer Regelbreite für Schutzstreifen von 1,50 m eine

Kernfahrbahnbreite von 4,50 m gewährleistet (FGSV 2006, S. 83; FGSV 2010a, S. 22 ff.). Durch Ohm et al. (2015) wird die Verkehrssicherheit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen mit und ohne Schutzstreifen zwar vergleichend analysiert – als Kenngröße zur Beschreibung der Verkehrssicherheit werden allerdings nur Unfalldichten verwendet. Das heißt, das Unfallgeschehen wird lediglich auf die Streckenlänge bezogen, nicht aber auf die Verkehrsstärke. Richter (2019) untersuchten ebenfalls Streckenabschnitte mit Schutzstreifen. Innerhalb dieser Untersuchung wird durch die Verwendung von Unfallkostenraten die Exposition (Verkehrsstärke Rad- und Kfz-Verkehr) berücksichtigt, wobei aber der Vergleich zwischen Schutz- und Radfahrstreifen im Fokus steht.

Piktogramme, welche im nationalen Regelwerk nicht enthalten sind, werden im internationalen Raum (bspw. Australien, Irland, Kanada und den USA) zur Verdeutlichung sowie zur Erhöhung der Akzeptanz des Radverkehrs im Mischverkehr verwendet. Die sogenannte „Sharrow“- oder „bike-and-chevron“-Markierung wird in regelmäßigen Abständen auf der Fahrbahn markiert. Zur Wirkung hinsichtlich des Unfallgeschehens liegen nur wenig und auch unterschiedliche Erkenntnisse vor (bspw. Harris et al. 2013; Ferenchak und Marshall 2016, 2019). Hinsichtlich des Einflusses auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmenden zeigen die meisten Untersuchungen, dass sich durch den Einsatz der Piktogramme der Abstand der Radfahrenden zum Fahrbahnrand, die Überholabstände als auch die Akzeptanz im Vergleich zur nicht markierten Führung erhöhen können (bspw. Birk et al. 2004, S. 12; Hunter et al. 2010, S. 50; Pein et al. 1999, S. 3). In Deutschland kommen die sog. „Piktogrammketten“ auf ausgewählten Abschnitten u.a. in Baden-Württemberg, Bremen, Hessen und Nordrhein-Westfalen seit kurzem zum Einsatz (vgl. Koppers et al. 2021, S. 22). Allerdings erfolgt der Einsatz der Piktogramme ohne entsprechende verwaltungsrechtliche Grundlage. Koppers et al. (2021, S. 43 ff.) zeigen aber auch im nationalen Raum, dass die Anwendung von Piktogrammen die Akzeptanz des Radverkehrs im Mischverkehr erhöhen kann.

Es zeigt sich, dass im nationalen Raum Untersuchungen jeweils zu den einzelnen Mischverkehrsführungsformen und unter der Verwendung unterschiedlicher Methoden vorliegen. Aufbauend darauf ist das Ziel dieser Untersuchung, die verschiedenen Mischverkehrsführungen (ohne Markierung, mit Schutzstreifen, mit Piktogrammen) hinsichtlich der objektiven Verkehrssicherheit und der Akzeptanz mit einer einheitlichen Methodik zu analysieren. Dabei sollen vor allem Straßenräume betrachtet werden, die aufgrund nah angrenzender und z. T. intensiv genutzter Randbebauung, die Anordnung von Radverkehrsanlagen (Radfahrstreifen und Radwege) nicht möglich machen. Abschließend sollen die Erkenntnisse der Untersuchung zu einer subjektiv und objektiv sicheren sowie einer akzeptierten Führung des Radverkehrs im Mischverkehr zusammengefasst dargestellt werden.

1.2 Vorgehen

Der Ablauf des Vorgehens ist vereinfacht in Bild 1-1 dargestellt und wird im Folgenden kurz beschrieben:

- Grundlagen: Innerhalb dieses Arbeitsschrittes werden zunächst alle im nationalen Raum geltenden rechtlichen Aspekte zum Radverkehr im Mischverkehr mit und ohne Markierungslösungen dargestellt und interpretiert. Aufbauend darauf folgt eine Dokumentation der Vorgaben der Technischen Regelwerke national und international. Im Fokus steht dabei vor allem ein Vergleich der verkehrlichen, betrieblichen und entwurfstechnischen Randbedingungen zur Anordnung der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Markierungslösungen. Die Analyse des nationalen und internationalen Forschungsstandes beinhaltet Erkenntnisse zu Unfällen (Sicherheitsbewertung unterschiedlicher Mischverkehrsführungen, Unfallkonstellationen, Einflussgrößen), zum Verhalten (Interaktionen, Akzeptanz unterschiedlicher Mischverkehrsführungen, seitliche Abstände zum Fahrbahnrand, Geschwindigkeiten) sowie zur subjektiven Verkehrssicherheit von Verkehrsteilnehmenden (präferierte Radverkehrsführungsform, Verhaltensweisen). Während die Erkenntnisse zum Unfallgeschehen und dem Verhalten eine unmittelbare Grundlage hinsichtlich der Ableitung von Forschungsfragen sowie der Einordnung der Ergebnisse darstellen, werden die Erkenntnisse zur subjektiven Sicherheit innerhalb der Synthese zur Gestaltung akzeptierter und sicherer Mischverkehrslösungen herangezogen.

- **Daten:** Gegenstand dieses Arbeitsschrittes ist vor allem die Fusionierung und Plausibilisierung der Daten zu den zu untersuchenden Streckenabschnitten. Die Daten beinhalten Informationen zur Exposition (Rad-, Fuß- und Kfz-Verkehrsstärke) und zu potentiell unfallbeeinflussenden und verhaltensbeeinflussenden Infrastrukturmerkmalen (baulich/gestalterisch und betrieblich). Grundlage bilden Daten aus den Untersuchungen von Schüller et al. (2020b), Ohm et al. (2015), Richter (2019) und Koppers et al. (2021), wobei die von Schüller et al. (2020b) entwickelte Datenstruktur verwendet wird. Der Arbeitsschritt beinhaltet dabei auch Nacherhebungen von Infrastrukturmerkmalen, Daten zur Exposition sowie zur Akzeptanz der Führungsform.
- **Analyse:** Die Analyse der Daten soll vor allem hinsichtlich zweier Aspekte erfolgen. Zum einen wird der Einfluss verschiedener Infrastrukturmerkmale auf das Unfallgeschehen und zum anderen auf die Akzeptanz des Radverkehrs im Mischverkehr quantifiziert. Sowohl die Akzeptanz, welche differenziert nach dem Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn sowie dem Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg betrachtet wird, als auch das Unfallgeschehen, welches differenziert nach den Mischverkehrsführungsformen sowie nach Unfalltypen betrachtet wird, wird auf Basis multivariater Modelle analysiert. Die Grundlage der Modellierung bildet eine deskriptive Analyse der genannten Aspekte.
- **Synthese:** Innerhalb der Synthese werden abschließend die Erkenntnisse hinsichtlich akzeptierter und objektiv verkehrssicherer Mischverkehrslösungen zusammenfassend dargestellt. Hierzu werden die Ergebnisse der Unfallmodelle, die Modelle zur Quantifizierung des Einflusses unabhängiger Merkmale auf die Akzeptanz sowie die Erkenntnisse zur subjektiven Verkehrssicherheit Radfahrender (vgl. Arbeitsschritt „Grundlagen“) übergreifend interpretiert, um die in den Grundlagen formulierten Forschungsfragen zu beantworten.

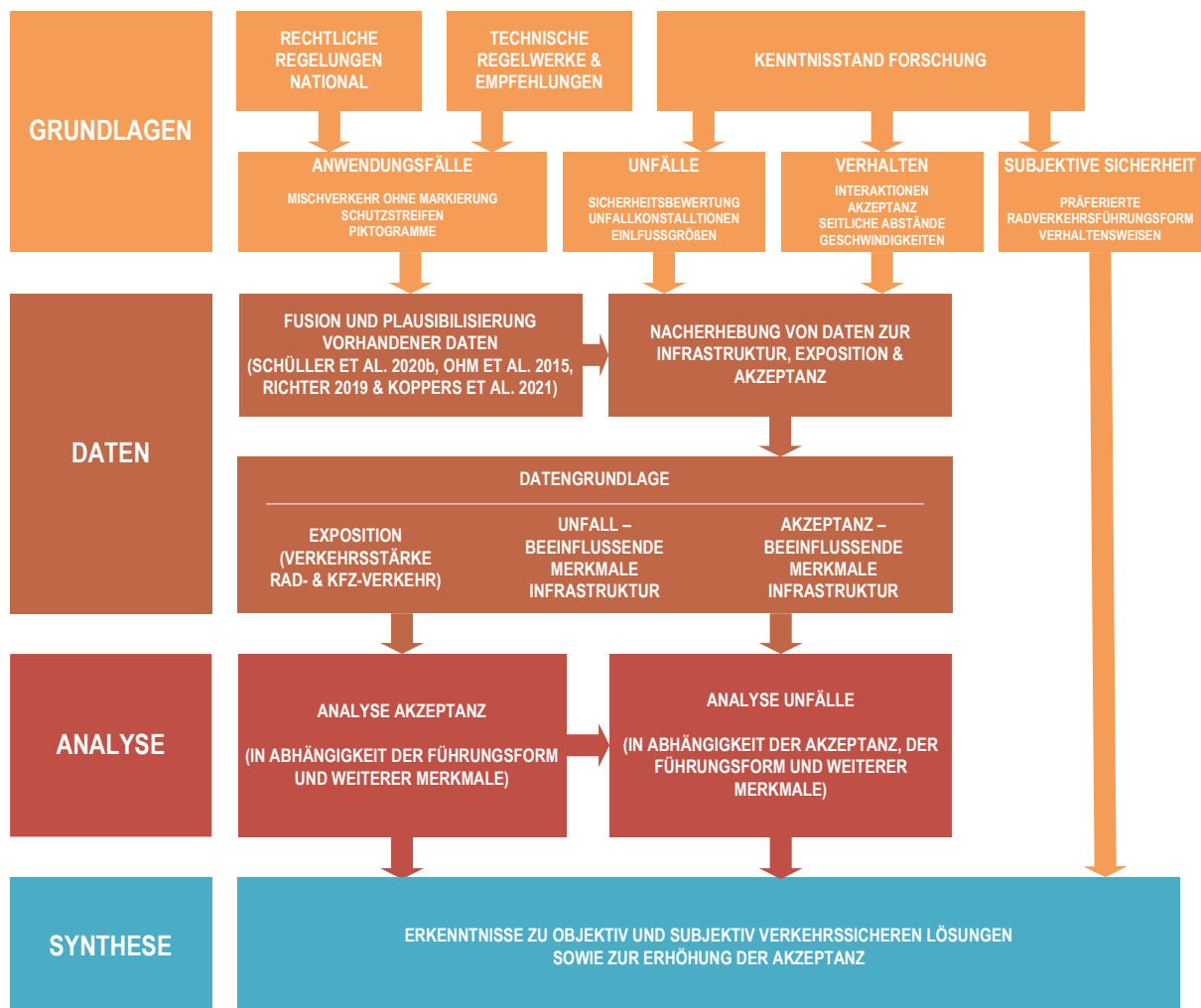


Bild 1-1 Übersicht Untersuchungsablauf

2 RECHTLICHE REGELUNGEN

Die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr unterliegt einer Reihe von rechtlichen Rahmenbedingungen, sowohl aus Sicht der Nutzer*innen als auch aus Sicht der Planer*innen und Behörden. Grundlegend stellen sich folgende rechtliche Fragestellungen:

- Wann und unter welchen Bedingungen wird der Radverkehr im Mischverkehr auf der Fahrbahn geführt?
- Wann können Schutzstreifen angeordnet werden und welche rechtlichen Auswirkungen hat die Anlage eines Schutzstreifens auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmenden?
- Ist die Markierung von Fahrrad-Piktogrammen oder sog. „Sharrows“ auf der Fahrbahn durch die Rechtsprechung abgedeckt?
- Wie groß muss der seitliche Abstand beim Überholen von Radfahrenden auf der Fahrbahn sein und gibt es Unterschiede, wenn ein Schutzstreifen markiert ist?
- Unter welchen Bedingungen kann bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr eine zulässige Geschwindigkeit von 30 km/h angeordnet werden?

Die Fragestellungen werden auf Basis der aktuellen Rechtsprechung, Erläuterungen zur Rechtsprechung sowie aktueller Interpretationen derer beantwortet.

Wann und unter welchen Bedingungen wird der Radverkehr im Mischverkehr auf der Fahrbahn geführt?

In der Straßenverkehrsordnung (StVO) und der Verwaltungsvorschrift der Straßenverkehrsordnung (VwV-StVO) ist die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen nicht explizit geregelt. Sie ergibt sich vielmehr aus der Radwegebenutzungspflicht. So besteht nach § 2 Absatz 4 StVO eine Pflicht Radwege zu benutzen nur, *„wenn dies durch Zeichen 237, 240 oder 241 angeordnet ist. Rechte Radwege ohne die Zeichen 237, 240 oder 241 dürfen benutzt werden. Linke Radwege ohne die Zeichen 237, 240 oder 241 dürfen nur benutzt werden, wenn dies durch das allein stehende Zusatzzeichen „Radverkehr frei“ angezeigt ist.“* Das bedeutet, dass sofern die Zeichen 237, 240 oder 241 StVO nicht vorhanden sind, Radfahrende die Fahrbahn benutzen müssen. Ist der Gehweg durch das Zusatzzeichen „Radverkehr frei“ für den Radverkehr freigegeben, darf die Fahrbahn benutzt werden. Darüber hinaus gilt nach § 2 Absatz 5 StVO, dass Kinder bis zum vollendeten achten Lebensjahr mit Fahrrädern die Gehwege befahren müssen und bis zum vollendeten zehnten Lebensjahr benutzen dürfen. Kinder bis zum vollendeten achten Lebensjahr dürfen dabei von einer Aufsichtsperson mit dem Fahrrad auf dem Gehweg begleitet werden.

Nach VwV-StVO zu § 2 StVO zu Absatz 4 Satz 2 dürfen benutzungspflichtige Radverkehrsanlagen nur dort angeordnet werden, *„wo es Verkehrssicherheit und -ablauf erfordern“* und wo gleichzeitig ausreichender Platz für Gehende verbleibt. *„Innerorts kann dies insbesondere für Vorfahrtstraßen mit starkem Kraftfahrzeugverkehr gelten.“* Somit sollte der Radverkehr im Mischverkehr nur bei geringem bis mittlerem Kraftfahrzeugverkehr oder an Straßen angeordnet werden, auf denen vor dem Hintergrund der Verkehrssicherheit und des Verkehrsablaufs keine benutzungspflichtigen Radverkehrsanlagen notwendig sind. Durch Leue (2018, S. 14) wird darauf hingewiesen, dass die Anordnung der Benutzungspflicht auch stets ein Fahrbahnbenutzungsverbot nach sich zieht und damit *„ein belastender Eingriff in die Rechte der Radfahrenden verbunden“* ist. Demzufolge ist bei der Anordnung der Radwegebenutzungspflicht § 45 Absatz 9 Satz 2 StVO zu beachten. Danach dürfen *„insbesondere Beschränkungen und Verbote des fließenden Verkehrs ... nur angeordnet werden, wenn auf Grund der besonderen örtlichen Verhältnisse eine Gefahrenlage besteht, die das allgemeine Risiko einer Beeinträchtigung der in den vorstehenden Absätzen genannten Rechtsgüter erheblich übersteigt.“* Nach Leue (2018, S. 213) *„muss also eine qualifizierte Gefährdungslage (für die Verkehrssicherheit und/oder den Verkehrsfluss ...) aufgrund besonderer örtlicher Verhältnisse vorliegen, die auch im Hinblick auf den Ausbauzustand des Radweges nicht hinnehmbar ist, sodass eine Entmischung des Radverkehrs vom übrigen Fahrzeugverkehr auf der Fahrbahn geboten ist.“* Als Gefährdungslagen für die Verkehrssicherheit und/oder den Verkehrsfluss werden u.a. der Ausbauzustand der Strecke, Verkehrsbelastung und Unfallzahlen genannt (Leue 2018, S. 213).

Wann können Schutzstreifen angeordnet werden und welche Auswirkungen hat die Anlage eines Schutzstreifens auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmenden?

Eine Sonderform der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr stellt der Schutzstreifen dar: *„Ein Schutzstreifen ist ein durch Zeichen 340 gekennzeichnete und zusätzlich in regelmäßigen Abständen mit dem Sinnbild „Fahrräder“ markierter Teil der Fahrbahn. Er kann innerhalb geschlossener Ortschaften auf Straßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von bis zu 50 km/h markiert werden, wenn die Verkehrszusammensetzung eine Mitbenutzung des Schutzstreifens durch den Kraftfahrzeugverkehr nur in seltenen Fällen erfordert. Er muss so breit sein, dass er einschließlich des Sicherheitsraumes einen hinreichenden Bewegungsraum für den Radfahrer bietet. Der abzüglich Schutzstreifen verbleibende Fahrbahnteil muss so breit sein, dass sich zwei Personenkraftwagen gefahrlos begegnen können.“* (VwV-StVO zu § 2 StVO zu Absatz 4 Satz 2).

Zu Zeichen 340 StVO (Anlage 3 zu § 42 Absatz 2) ist zudem geregelt, dass der Schutzstreifen für den Radverkehr nur bei Bedarf von Kfz-Führenden überfahren werden darf. *„Der Radverkehr darf dabei nicht gefährdet werden“*. Zudem darf auf Schutzstreifen nicht gehalten werden. Aus Sicht des Radverkehrs ist außerdem relevant, wie „bei Bedarf“ hinsichtlich des Überfahrens des Schutzstreifens durch Kraftfahrzeugführende definiert ist. Nach Müller (2018, S. 9 ff.) und Leue (2018, S. 322) besteht ein Bedarf zum Überfahren des Schutzstreifens nur, wenn ein Ausweichen aufgrund entgegenkommender Fahrzeuge notwendig ist. Durch Müller (2018, S. 11) wird dies damit begründet, dass nach der Rechtsprechung *„der in gleicher Richtung verlaufende und einen nachfolgenden Kraftfahrzeugführer behindernde fließende Verkehr für einen „Bedarf“ nicht zu berücksichtigen“* ist. Dabei stützt sich Müller (2018) auf die VwV-StVO zu § 2 StVO zu Abs. 4 Satz 2 (*„Der abzüglich Schutzstreifen verbleibende Fahrbahnteil muss so breit sein, dass sich zwei Personenkraftwagen gefahrlos begegnen können.“*) sowie auf einen Beschluss des OVG Lüneburg, welches wiederum aus der lediglich auf den Begegnungsfall fokussierten Formulierung der VwV-StVO schließt, dass *„nicht aber noch weiter gehend auch ein Überholen von Radfahrern trotz Gegenverkehrs möglich sei“* (OVG Lüneburg, Beschluss vom 25. Juli 2018 – 12 LC 150/16, Rn. 45, juris).

Nach VwV-StVO zu Zeichen 340 ist *„die Leitlinie für Schutzstreifen (...) im Verhältnis Strich/Lücke 1:1 zu markieren und auf vorfahrtberechtigten Straßen an Kreuzungen und Einmündungen als Radverkehrsführung fortzusetzen. Auf die Markierung einer Leitlinie in Fahrbahnmitte ist zu verzichten, wenn abzüglich Schutzstreifen der verbleibende Fahrbahnteil weniger als 5,50 m breit ist.“*

Im Zusammenhang damit, dass der Schutzstreifen als Form des Mischverkehrs eigentlich nur dort zur Anwendung kommen sollte, wo keine benutzungspflichtigen Radverkehrsanlagen (aus Gründen der Verkehrssicherheit und des Verkehrsablaufs) notwendig sind (siehe Abschnitt „Wann und unter welchen Bedingungen wird der Radverkehr im Mischverkehr auf der Fahrbahn geführt?“), ist folgende Regelung durchaus kritisch zu bewerten: *„Ist ein Radfahrstreifen nicht zu verwirklichen, kann auf der Fahrbahn ein Schutzstreifen angelegt werden. Ist das nicht möglich, ist die Freigabe des Gehweges zur Mitbenutzung durch den Radverkehr in Betracht zu ziehen“* (VwV-StVO zu § 2 StVO Absatz 4 Satz 2). Denn wenn die Überprüfung auf Benutzungspflicht die Notwendigkeit einer Radverkehrsanlage (Radfahrstreifen) ergibt, dann ist diese sowohl aus Sicht der Verkehrssicherheit oder des Verkehrsablaufs auch erforderlich (vgl. VwV-StVO zu § 2 StVO Absatz 4 Satz 2 Randnummer 9).

Ist die Markierung von Fahrrad-Piktogrammen oder sog. „Sharrows“ auf der Fahrbahn durch die Rechtsprechung abgedeckt?

Die Verwendung von Fahrrad Piktogrammen (Sinnbild „Fahrräder“) zur Verdeutlichung der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf der Fahrbahn ist nicht nach StVO und VwV-StVO geregelt. So wird die Markierung des Sinnbildes Fahrrad lediglich in Verbindung mit dem Schutzstreifen explizit erwähnt (Anlage 3 zu §42 Absatz 2 (Zeichen 340) StVO, VwV-StVO zu Absatz 4 Satz 2): Nach VwV-StVO zu den §§ 39 bis 43 wird im Abschnitt IV generell darauf hingewiesen, dass *„durch Schriftzeichen, Sinnbilder oder die Wiedergabe eines Verkehrszeichens auf der Fahrbahn (...) der Fahrzeugverkehr lediglich zusätzlich auf eine besondere Verkehrssituation aufmerksam gemacht werden“* kann. *„Von dieser Möglichkeit ist nur sparsam Gebrauch zu machen. Sofern dies dennoch in Einzelfällen erforderlich sein sollte, sind die Darstellungen ebenfalls nach den*

RMS auszuführen.“ Das bedeutet, dass die Markierung von Fahrrad-Piktogrammen oder sog. „Sharrows“ auf der Fahrbahn zwar durch die Rechtsprechung nicht explizit erwähnt wird, aber auch, dass aus rechtlicher Sicht nichts gegen die Anwendung solcher Markierungsformen spricht.

Wie groß muss der seitliche Abstand beim Überholen von Radfahrenden auf der Fahrbahn sein und gibt es Unterschiede, wenn ein Schutzstreifen markiert ist?

Nach § 5 Absatz 4 StVO muss beim Überholen *„ein ausreichender Seitenabstand zu den anderen Verkehrsteilnehmern eingehalten werden. Beim Überholen mit Kraftfahrzeugen von zu Fuß Gehenden, Rad Fahrenden und Elektrokraftfahrzeug-Führenden beträgt der ausreichende Seitenabstand innerorts mindestens 1,5 m und außerorts mindestens 2 m.“*

Nach Müller (2018, S. 12 ff) müssen auf Schutzstreifen fahrende Radfahrende ebenfalls mit einem Seitenabstand von mindestens 1,5 m überholt werden. Dies wird damit begründet, dass ein Schutzstreifen nach VwV-StVO zu § 2 StVO zu Abs. 4 Satz 2 unter I. 5. lediglich ein markierter Teil der Fahrbahn ist.

Unter welchen Bedingungen kann bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr eine zulässige Geschwindigkeit von 30 km/h angeordnet werden?

Schüller et al. (2020b, S. 56 und 65) konnten zeigen, dass die Anordnung einer zulässigen Geschwindigkeit von 30 km/h in Zusammenhang mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr einen Einfluss auf die Akzeptanz der Führungsform sowie die Zahl und Schwere von Unfällen hat. Nach § 45 Absatz 9 StVO sind aber *„Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen (...) nur dort anzuordnen, wo dies auf Grund der besonderen Umstände zwingend erforderlich ist. (...) Insbesondere Beschränkungen und Verbote des fließenden Verkehrs dürfen nur angeordnet werden, wenn auf Grund der besonderen örtlichen Verhältnisse eine Gefahrenlage besteht, die das allgemeine Risiko einer Beeinträchtigung der in den vorstehenden Absätzen genannten Rechtsgüter erheblich übersteigt.“* Ausgenommen davon sind u.a. Tempo 30-Zonen sowie *„innerörtliche streckenbezogene Geschwindigkeitsbeschränkungen von 30 km/h (Zeichen 274) nach Absatz 1 Satz 1 auf Straßen des überörtlichen Verkehrs (Bundes-, Landes- und Kreisstraßen) oder auf weiteren Vorfahrtstraßen (Zeichen 306) im unmittelbaren Bereich von an diesen Straßen gelegenen Kindergärten, Kindertagesstätten, allgemeinbildenden Schulen, Förderschulen, Alten- und Pflegeheimen oder Krankenhäusern, (...)“*. Nach Leue (2018, S. 212) ist *„die Vorschrift [§ 45 Absatz 9 StVO, Anm. d. Verf.] (...) ein – erstmaliger – Versuch des VO-Gebers, insbesondere das in Deutschland – im europäischen Vergleich – häufig zu beobachtende Übermaß an Verkehrszeichen durch eine ausdrückliche, (...) bindenden Rechtsnorm einzudämmen.“* Begründet wird dies damit, dass zu viele Verkehrszeichen einen *„Abstumpfungseffekt“* bewirken, welcher sich wiederum auf die Verkehrssicherheit auswirken würde. Allerdings ist hierzu zu erwähnen, dass diese Argumentation auf einen *„versuchsweise Abbau „eines großen Teils außerörtlicher Verkehrsbeschränkungen in dem bayrischen Regierungsbezirk Mittelfranken“* (Leue 2018, S. 212) aufbaut. Eine Quelle wird dafür allerdings nicht angegeben.

Das heißt, liegt eine konkrete Hauptverkehrsstraße nicht an o.g. Einrichtungen, kann die zulässige Geschwindigkeit nur reduziert werden, wenn es aufgrund der besonderen Umstände erforderlich ist oder wenn eine Gefahrenlage nachgewiesen werden kann. Nach Leue (2018, S. 213) sind besondere *„Umstände „z.B. eine gegenüber dem Durchschnitt ähnlicher Strecken signifikant erhöhte Unfallrate (ggf. Unfalldichte), die erkennbar mit der Ursache zusammenhängt, deren Bekämpfung das vorgesehene Zeichen dienen soll.“* Nach VwV-StVO zu Zeichen 274 (zulässige Höchstgeschwindigkeit) heißt es dazu weiter, dass *„Geschwindigkeitsbeschränkungen aus Sicherheitsgründen (...) auf bestehenden Straßen angeordnet werden“* sollen, *„wenn Unfalluntersuchungen ergeben haben, dass häufig geschwindigkeitsbedingte Unfälle aufgetreten sind.“* Allerdings auch nur dann, wenn die Mehrzahl der Kraftfahrzeugführenden die zulässige Höchstgeschwindigkeit einhält. Andererseits ist zunächst die zulässige Höchstgeschwindigkeit durchzusetzen. Weiterhin heißt es, dass sich *„Geschwindigkeitsbeschränkungen (...) im Einzelfall schon dann empfehlen, wenn aufgrund unangemessener Geschwindigkeiten häufig gefährliche Verkehrssituationen festgestellt werden.“* Generelle Verkehrssicherheitsüberlegungen, wie z.B. dass geringere Geschwindigkeiten zu geringeren Unfallfolgen führen

sind nach Leue (2018, S. 213) keine zulässigen Argumente. Denn „solche allgemeinen Sicherheitsüberlegungen sind dem Gesetz- bzw. VO-Geber vorbehalten (...)“ (Leue 2018, S. 213). Wie „gefährliche Verkehrssituationen aufgrund unangemessener Geschwindigkeiten“ (Leue 2018, S. 213) definiert sind, ist nicht angegeben.

Ausgenommen von o.g. Ausführungen sind Erprobungsmaßnahmen „zur Erforschung des Unfallgeschehens, des Verkehrsverhaltens, der Verkehrsabläufe sowie zur Erprobung geplanter verkehrssichernder oder verkehrsregelnder Maßnahmen.“ (§ 45 Absatz 1 Satz 2 Nummer 6). „Entsprechend dem Versuchscharakter der Maßnahmen sind nur zeitlich begrenzte Maßnahmen zulässig, die i. d. R. ein Jahr nicht überschreiten dürfen.“ (Leue 2018, S. 200). Unzulässig sind nach Leue (2018, S. 200) hingegen Einschränkungen des fließenden Verkehrs, „wenn dazu bereits hinreichende Studien vorliegen oder wenn zu erwarten ist, dass VO-Geber eine derartige Maßnahme nicht in der StVO verankern wird (...)“.

3 TECHNISCHE REGELWERKE UND EMPFEHLUNGEN

3.1 National

Die gestalterischen und verkehrlichen Rahmenbedingungen unterschiedlicher Führungsformen des Radverkehrs innerhalb von Städten sind in den Richtlinien für Anlage von Stadtstraßen (RASt, FGSV 2006) sowie den Empfehlungen für Radverkehrsanlagen (ERA, FGSV 2010a) beschrieben. Zudem sind ergänzende Hinweise in den Empfehlungen für Fußgängerverkehrsanlagen (EFA, FGSV 2002), den Empfehlungen für die Anlage des öffentlichen Personennahverkehrs (EAÖ, FGSV 2013), den Hinweisen für den Entwurf von Verknüpfungsanlagen des öffentlichen Personennahverkehrs (H VÖ, FGSV 2009a) und den Hinweisen zur Integration der Belange von Kindern in die Verkehrsplanung zu finden (FGSV 2010b) zu finden, die aber hinsichtlich der für folgende Arbeit relevanten Aspekte in FGSV (2006) und FGSV (2010a) wiedergegeben werden.

Nach FGSV (2006, S. 82 ff.) ist zunächst grundsätzlich zu unterscheiden ob der Radverkehr

- auf der Fahrbahn oder im Seitenraum und
- auf getrennten oder gemeinsamen mit anderen Verkehrsarten genutzten Flächen

geführt werden soll. Darüber hinaus ist noch zu unterscheiden, ob der Radverkehr auf einer oder auf zwei Straßenseiten und im Einrichtungs- oder Zweirichtungsbetrieb geführt werden soll, wobei diese beiden Aspekte für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand eine eher untergeordnete Rolle spielen.

Die **Führung des Radverkehrs auf der Fahrbahn ohne Markierungslösungen** eignet sich nach FGSV (2006, S. 83) vor allem

- auf verkehrsarmen Straßen sowie
- auf Straßen mit geringen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (bspw. Tempo-30-Zonen).

Soll der Radverkehr auf anderen Straßen im Mischverkehr geführt werden, so ist eine „*verstärkte Vorsorge, dass die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten eingehalten werden*“ sowie eine Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ($v_{zul} < 50$ km/h) zu prüfen (FGSV 2006, S. 83). Nach den FGSV (2010a, S. 19) wird die Vorauswahl einer bestimmten Radverkehrsführungsform weiter in Abhängigkeit der Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs sowie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit differenziert (siehe Bild 3-1). Die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne weitere Maßnahmen (bspw. Schutzstreifen, Gehwege „Radfahrende frei“) kommt danach nur innerhalb des Belastungsbereiches I in Frage (vgl. Bild 3-1). Das heißt, bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von

- 50 km/h ist die Führung im Mischverkehr bis zu einer Verkehrsstärke in der werktäglichen Spitzenstunde von 400 Kfz/h möglich.
- 30 km/h beträgt der Grenzwert etwa 800 Kfz/h.

Dies gilt zunächst unabhängig von der zur Verfügung stehenden Fahrbahnbreite. Unter gewissen Bedingungen kann zudem ein Wechsel in den Belastungsbereich II vorteilhaft sein – konkret heißt das, bei starken Längsneigungen die Anordnung von Gehwegen „Radfahrende frei“ oder bei großen Fahrbahnbreiten die Gliederung der Fahrbahn durch möglichst breite Schutzstreifen.

Aufbauend auf der Vorauswahl werden durch FGSV (2006) und FGSV (2010a) weitere Einsatzgrenzen vor dem Hintergrund der Fahrbahnbreite sowie der Kfz-Verkehrsstärke gegeben, wobei Unterschiede in den Vorgaben festzustellen sind. Tab. 3-1 zeigt die Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Fahrbahnbreite für FGSV (2010a, S. 22) und FGSV (2006, S. 83) im Vergleich.

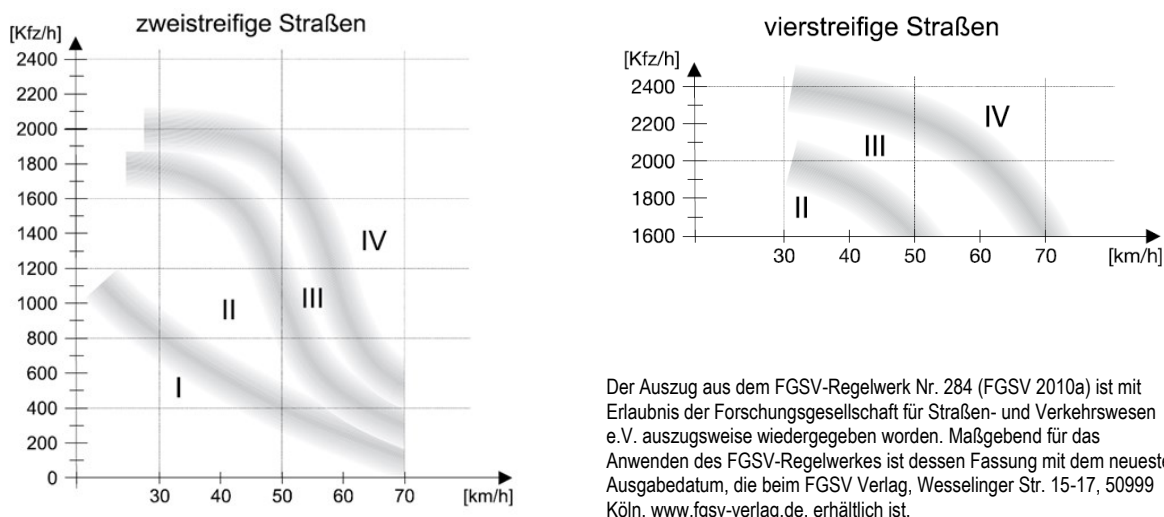


Bild 3-1 Belastungsbereiche zur Vorauswahl von Radverkehrsführungen bei zwei- (links) und vierstreifigen (rechts) Stadtstraßen (FGSV 2010a, S. 19)

Schmale Fahrbahnen (< 6,00 m) eignen sich nach FGSV (2006, S. 83) bis 500 Kfz/h während dieser Grenzwert nach FGSV (2010a, S. 22) 700 Kfz/h beträgt. Nach FGSV (2010a, S. 22) sind bis zu 700 Kfz/h deshalb möglich, „da der Radverkehr im Begegnungsfall Kfz-Kfz nicht überholt werden kann“. Hinsichtlich breiter Fahrbahnen (> 7,00 m) sind die Unterschiede gering. Bei Fahrbahnbreiten von 7,50 m und mehr soll nach FGSV (2010a, S. 22) die Anlage von Schutzstreifen geprüft werden.

Fahrbahnbreiten zwischen 6,00 m und 7,00 m werden nach beiden Regelwerken als problematisch eingestuft. Während dies nach FGSV (2010a, S. 22) erst ab 400 Kfz/h der Fall ist, sind diese Breiten nach FGSV (2006, S. 83) generell als kritisch hinsichtlich des Vorbei-/Nebeneinanderfahrfalls einzustufen, da sie zwar eine Möglichkeit des Überholens auch bei Gegenverkehr suggerieren können, diese Überholungen aber nicht mit Einhaltung des Sicherheitsabstandes möglich sind. Nach FGSV (2006, S. 83) ist in solchen Situationen die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr nur bei geringen Verkehrsstärken und niedrigem Geschwindigkeitsniveau möglich, ohne dass dies näher quantifiziert wird. Hintergrund dieser Empfehlungen ist die Untersuchung von Reichenbach und Affolter (2003), die auf Streckenabschnitten mit einer Fahrbahnbreite von 6,30 m bis 6,50 m die höchsten Anteile an kritischen Überholabständen erfasst haben (siehe Kapitel 4.2.4).

Tab. 3-1 Einsatzbereiche der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf zweistreifigen Streckenabschnitten ohne Schutzstreifen nach FGSV (2006) und FGSV (2010a)im Vergleich

Verfügbare Fahrbahnbreite für zweistreifige Streckenabschnitte	Grenzwert mittlere Verkehrsstärke	
	FGSV (2006, S. 83)	FGSV (2010a, S. 22)
< 6,00 m	500 Kfz/h	700 Kfz/h
6,00 m bis 7,00 m	problematisch (nur bei geringen q und geringen v)	problematisch bei > 400 Kfz/h
> 7,00 m	800 Kfz/h bis 1.000 Kfz/h ¹	700 bis 1.000 Kfz/h ²

¹ und einem Schwerverkehrsanteil von 6 %

² Nach Bild 3-1 bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h.

Für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf vierstreifigen Straßen gibt es nach FGSV (2006) keine Empfehlungen. Nach FGSV (2010a, S. 22) ist die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf vierstreifigen Straßen bis 2.200 Kfz/h verträglich, wobei nach Bild 3-1 dann eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h anzuordnen ist. Bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h beträgt dieser Grenzwert 1.600 Kfz/h. Die Empfehlung, dass bei geringem Schwerverkehr die Markierung eines Schutzstreifens innerhalb eines überbreiten rechten Fahrtstreifens (3,75 m) möglich ist (FGSV 2010a, S. 22), erscheint vor dem Hintergrund der dann entstehenden Überholabstände nicht sinnvoll.

Soll ruhender Verkehr zugelassen werden, sind Parkstände am Fahrbahnrand so anzulegen (bspw. durch vorgezogene Seitenräume), dass zwischen Radverkehr und parkenden Fahrzeugen ein Sicherheitsraum von 0,50 m (Längsparken) bzw. 0,75 m (Schrägparken) entsteht (FGSV 2010a, S. 22). Nicht in den Regelwerken erwähnt, aber durchaus sinnvoll erscheint die Markierung des Sicherheitsraumes – dieser Aspekt wird in Kapitel 9 nochmal aufgegriffen. Bei vierstreifigen Straßen sollte der rechte Fahrstreifen, sofern auf diesem geparkt werden darf, mindestens 3,75 m breit sein (FGSV 2010a, S. 22). Auch hier erscheint eine Markierung des Sicherheitsraumes sinnvoll.

Ergänzende Hinweise betreffen Halte-, Lade- oder Lieferverkehr (ist durch zeitliche Regelungen in Grenzen zu halten) sowie Straßen mit erhöhten Längsneigungen (bergauf: breiterer Fahrstreifen, ggf. Gehweg „Radfahrende frei“) (FGSV 2006, S. 83; FGSV 2010a, S. 22).

Wird der Radverkehr im Mischverkehr mit Straßenbahnen geführt, sollte eine Führung in der Regel neben den Gleisen ($\geq 1,30$ m zwischen Bord und Rillenschiene) vorhanden sein (FGSV 2010a, S. 30 ff.). Ist das nicht möglich, ist auch eine Führung innerhalb der Gleise (Gleisabstand $> 1,00$ m) möglich, wobei in diesem Fall die Markierung von Fahrradpiktogrammen empfohlen wird (FGSV 2010a, S. 30 ff.).

Die **Führung des Radverkehrs auf der Fahrbahn mit Schutzstreifen** als Sonderform der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr eignet sich nach FGSV (2006, S. 83) dann, wenn

- Radverkehr im Mischverkehr zwar verträglich ist, „*dem Radverkehr aus Gründen der Verkehrssicherheit aber eine eigene Fläche zur Verfügung gestellt werden soll und der Raum für die Anlage von Radfahrstreifen nicht ausreichend ist*“ (FGSV 2006, S. 83).
- die Schwerverkehrsstärke < 1.000 Kfz/24 h beträgt (vgl. auch FGSV 2010a, S. 22).
- bei entsprechendem Bedarf Möglichkeiten zum Parken, Liefern und Laden außerhalb der Fahrbahn vorhanden sind, da auf Schutzstreifen nicht gehalten werden darf (vgl. Kapitel 2).

Nach FGSV (2010a, S. 18 ff.) kommen Schutzstreifen mit oder ohne Gehwegfreigabe sowie die Führung im Mischverkehr ohne Markierungslösung aber mit Gehwegfreigabe bzw. dem Vorhandensein eines nicht benutzungspflichtigen Radweges im Belastungsbereich II in Frage (vgl. Bild 3-1). Bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von

- 50 km/h beträgt die maximale Verkehrsstärke in der werktäglichen Spitzenstunde ca. 1.200 Kfz/h.
- 30 km/h beträgt die maximale Verkehrsstärke in der werktäglichen Spitzenstunde ca. 1.800 Kfz/h.

Randbedingungen für den Wechsel des Belastungsbereiches nach unten (Mischverkehr ohne Markierung bzw. freigegebenen Gehwegen) sind: geringer Schwerverkehr, Gefälle $> 3\%$ Längsneigung, übersichtliche Linienführung und geeignete Fahrbahnbreiten. Höhere Belastungsbereiche (Radfahrstreifen, Radweg, gemeinsamer Geh- und Radweg) können hingegen sinnvoll sein bei: starkem Schwerverkehr, unübersichtlicher Linienführung und ungünstigen Fahrbahnquerschnitten. In den Belastungsbereichen III und IV wird die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen grundsätzlich nicht empfohlen.

Schutzstreifen sollten im Regelfall 1,50 m breit sein (einschließlich Markierung), wobei 1,25 m auf keinen Fall unterschritten werden sollten (FGSV 2006, S. 83; FGSV 2010a, S. 23). Dabei sollte die Restfahrbahnbreite 4,50 m nicht unterschreiten, so dass der Begegnungsfall PKW-PKW möglich ist, ohne dass der Schutzstreifen befahren werden muss (FGSV 2006, S. 83). Wie bereits erwähnt, ist aber insbesondere im Begegnungsfall besonders kritisch, dass der Sicherheitsabstand bei den gegebenen Mindestmaßen nicht einzuhalten ist. Ab einer Restfahrbahnbreite $< 5,50$ m darf keine Leitlinie markiert werden.

Für die Führung des Radverkehrs auf der Fahrbahn mit Schutzstreifen auf vierstreifigen Straßen gibt es nach den FGSV (2006) keine Empfehlungen. Nach den ERA FGSV (2010a, S. 23) können Schutzstreifen auf vierstreifigen Straßen angelegt werden, wenn die Richtungsfahrbahn mindestens 6,50 m breit ist. Sinnvoll erscheint dabei die Empfehlung nach Möglichkeit einen überbreiten Fahrstreifen von mindestens 5,00 m Breite mit einem 1,50 m breiten Schutzstreifen vorzusehen. Bei geringem Schwerverkehr kann auch ein 1,50 m breiter Schutzstreifen neben

einem rechten Fahrstreifen von 2,25 m Breite und einem linken Fahrstreifen von 2,75 m Breite eine Möglichkeit sein (FGSV 2010a, S. 23).

Soll ruhender Verkehr neben Schutzstreifen zugelassen werden, sollte ein Sicherheitsabstand vorhanden sein, welcher nach FGSV (2006, S. 83) mit einem Schutzstreifen von 1,50 m neben 2,00 m breiten Parkständen gegeben ist. Nach den FGSV (2010a, S. 23) sollte bei häufigem Parkwechsel ein Sicherheitstrennstreifen von 0,50 m (bei Schrägparken 0,75 m) vorgesehen werden, welcher baulich (z. B. durch entsprechend breite Parkbuchten) oder durch Markierung erkennbar gemacht wird. Wiederum etwas kritisch erscheint die Empfehlung, dass der Schutzstreifen bei wenigen Parkvorgängen und beengten straßenräumlichen Situationen einschließlich Sicherheitsraum 1,50 m breit sein kann (FGSV 2010a, S. 23). In solchen Situationen scheint die Prüfung auf Unterbindung des Parkens sinnvoller.

3.2 International

Dieses Kapitel gibt einen zusammenfassenden Überblick zu den unterschiedlichen Einsatzgrenzen und der Gestaltungsempfehlungen hinsichtlich der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne markierte Führungshilfen im internationalen Raum. Tab. 3-2 zeigt die Einsatzgrenzen und Tab. 3-3 die Gestaltungsempfehlungen sowie die entsprechenden Quellen im Überblick. In Anlage 1 sind zudem detaillierte Ausführungen zu den analysierten Empfehlungen zu finden. Dabei wurden lediglich Richtlinien, Empfehlungen und Merkblätter mit explizitem Radverkehrsbezug berücksichtigt, die jeweils landesweit Gültigkeit besitzen bzw. von entsprechend landesweiten Institutionen erstellt wurden¹. Vorrangig nicht berücksichtigt wurden Radverkehrskonzepte (landesweit und kommunal) sowie kommunale Empfehlungen für Radverkehrsanlagen. Außerdem werden lediglich zweistreifige Straßen betrachtet, da die betrachteten Führungsformen im Mischverkehr mit wenigen Ausnahmen auf vierstreifigen Straßen nicht empfohlen werden.

Als wesentliche Einsatzkriterien werden die Geschwindigkeit (zulässige Höchstgeschwindigkeit oder v_{85} -Geschwindigkeit) sowie die Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs herangezogen (siehe Tab. 3-2). In den Niederlanden und Frankreich (inspiriert von den Niederlanden) wird zusätzlich die Radverkehrsstärke berücksichtigt. Hinsichtlich der Kfz-Verkehrsstärke sind zwischen den Ländern deutliche Unterschiede zu verzeichnen. Während die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr bei einer $v_{85}/v_{zul} = 30$ km/h in Deutschland (\leq ca. 8.000 Kfz/24 h), Irland (\leq 10.000 Kfz/24 h) und Österreich (\leq ca. 15.000 Kfz/24 h) auch bei höheren Verkehrsstärken zum Einsatz kommen kann, wird sie in den anderen Ländern eher bei geringen Verkehrsstärken (ca. 2.500 bis 6.000 Kfz/24 h) bzw. im Nebennetz empfohlen. Bei einer $v_{85}/v_{zul} = 50$ km/h werden in Österreich (\leq ca. 10.000 Kfz/24 h) sowie in der Schweiz (\leq 8.000 Kfz/24 h) die höchsten Obergrenzen angegeben. Hinsichtlich der verträglichen Geschwindigkeit sind Dänemark, Frankreich, Niederlande und Großbritannien² hervorzuheben, die die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr nur bei Geschwindigkeiten < 50 km/h empfehlen.

Schutzstreifen kommen in Deutschland, Großbritannien, Irland, Norwegen, Österreich und der Schweiz zur Anwendung (siehe Tab. 3-2). Während Schutzstreifen in Deutschland und Österreich eine Sonderform des Mischverkehrs darstellen, gelten sie in Großbritannien und Irland als Sonderform von Radfahrstreifen und sind in Norwegen und der Schweiz das Pendant zum deutschen Radfahrstreifen, können aber bei Bedarf von Kfz überfahren werden (vgl. Anlage 1). In den Niederlanden kamen Schutzstreifen in der Vergangenheit zur Anwendung, werden aber aktuell explizit nicht mehr empfohlen: Entweder man entscheidet sich für eine vollwertigen Radverkehrsanlage, oder man führt den Radverkehr vollständig im Mischverkehr (CROW 2016, S. 111). Grundsätzlich können Schutzstreifen im Vergleich zum Mischverkehr ohne Maßnahmen bei höheren Verkehrsstärken zur Anwendung kommen. Dabei werden in Deutschland (\leq ca. 18.000 bei $v_{zul} = 30$ km/h), Norwegen (\leq 15.000 bei $v_{zul} = 50$ km/h) und Österreich (\leq ca. 15.000 bei $v_{zul} = 30$ km/h) die höchsten

¹ Eine Ausnahme stellt die Schweiz dar: Diese besitzen keine umfassenden Richtlinien oder Empfehlungen für die Radverkehrsinfrastruktur. Vielmehr finden sich die Vorgaben in unterschiedlichen Normen.

² Interpretation der Grenzwerte, die für die meisten Menschen geeignet sind und keine Sicherheitsbedenken aufwerfen (vgl. Anlage 1).

Verkehrsstärken zugelassen. In der Schweiz (> 4.000 Kfz/24 h) werden in den analysierten Regelwerken keine Obergrenzen hinsichtlich der Verkehrsstärke angegeben. Sie kommen dann zur Anwendung, wenn Radverkehr im Mischverkehr nicht mehr verträglich ist.

Piktogramme werden hingegen nur in wenigen Ländern (Irland, Australien, Kanada, USA) empfohlen (siehe Tab. 3-2), auch wenn sie in anderen Ländern teilweise zum Einsatz kommen (siehe bspw. Koppers et al. 2021, S. 22, Knoflacher 2014, S. 8 ff.). Während die Piktogramme in Australien eher optional aufgebracht werden können, werden sie in Irland, Kanada und USA standardmäßig bei höheren Verkehrsstärken bzw. wenn keine Radverkehrsanlage möglich ist, empfohlen.

Hinsichtlich der Gestaltungsempfehlungen wird auf die Fahrbahn- und Schutzstreifenbreiten, den ruhenden Verkehr sowie die Platzierung der Piktogramme auf dem jeweiligen Fahrstreifen eingegangen (vgl. Tab. 3-3). Bei den Fahrbahnbreiten unterscheiden die meisten Länder zwischen schmalen Profilen (Überholungen von Radfahrenden durch Pkw bei Gegenverkehr nicht möglich) und breiten Profilen (Überholungen von Radfahrenden durch Pkw bei Gegenverkehr möglich). Dabei ist die Obergrenze des schmalen Profils in den Niederlanden deutlich am schmalsten (4,80 m) und in Australien (7,40 m) und Kanada (8,00 m) deutlich am breitesten. Hinsichtlich der breiten Profile sind ebenfalls Unterschiede abzuleiten: Während in Deutschland, Österreich und der Schweiz breite Profile ab einer Fahrbahnbreite von 7,00 m bzw. 7,50 m zur Anwendung kommen sollen, liegt diese Untergrenze in Australien (8,60 m), Kanada (8,00 m) und den USA (8,60 m) deutlich darüber und in Dänemark (6,50 m), Irland (5,50 m) und den Niederlanden (5,80 m) deutlich darunter. Im Zusammenhang damit ist auf eine Besonderheit hinzuweisen: In Deutschland, Österreich und der Schweiz werden Fahrbahnbreiten zwischen 6,00 m und 7,00 m und in Großbritannien zwischen 6,40 m und 7,80 m explizit nicht empfohlen, da eine Möglichkeit des Überholens auch bei Gegenverkehr suggeriert wird, diese aber nicht mit Einhaltung eines ausreichenden Abstandes möglich sind. Dieser Bereich wird somit in den dänischen, niederländischen und irischen Empfehlungen unterschritten, obwohl das breite Profil ein Überholen von Radfahrenden bei Gegenverkehr ermöglichen soll. Zum Vergleich: Addiert man nach dem deutschen Regelwerk (FGSV 2006) die Verkehrs- und Sicherheitsräume für den Fall Pkw überholt Rad mit Gegenverkehr (Pkw) unter Berücksichtigung des gesetzlich vorgeschriebenen Mindestüberholabstand von 1,50 m (vgl. Kapitel 2), ergibt sich eine notwendige Fahrbahnbreite von ca. 7,00 m. Allerdings ist im Zuge dessen auch zu berücksichtigen, dass die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr in Dänemark und den Niederlanden im Vergleich zu den anderen Ländern nur bei deutlich geringeren Verkehrsstärken und einer $v_{zul} < 50$ km/h empfohlen wird. In Frankreich, Norwegen und der Schweiz gibt es keine konkreten Vorgaben zu den Fahrbahnbreiten (hier ergibt sich die Breite aus der Zusammenstellung der jeweiligen Lichtraumprofile und Sicherheitsräume). Hinsichtlich des ruhenden Verkehrs gibt es nur in Dänemark und den Niederlanden konkrete Vorgaben für den Schutz des Radverkehrs (siehe Tab. 3-3).

Die empfohlene Regelbreite für Schutzstreifen beträgt mit Ausnahme von Irland und Großbritannien (2,00 m) in allen Ländern 1,50 m (siehe Tab. 3-3), wobei die norwegischen und schweizerischen Empfehlungen auch konkrete Vorgaben für breitere Ausführungen beinhalten (vgl. Anlage 1). Außerdem werden mit Ausnahme von Irland in den meisten Empfehlungen konkrete Angaben zu Sicherheitsräumen zum ruhenden Verkehr gegeben. Zu den empfohlenen Restfahrbahnbreiten werden lediglich im deutschen und österreichischen Regelwerk konkrete Angaben gemacht.

Hinsichtlich der Platzierung der Piktogramme werden in den US-amerikanischen und kanadischen Empfehlungen konkrete Maße gegeben: Ohne Längsparkstände sind die Piktogramme mit mindestens 1,20 m bzw. 1,30 m und mit Längsparkständen mit mindestens 3,40 m bzw. 3,30 m Abstand vom Fahrbahnrand zu markieren (siehe Anlage 1). Unter der Voraussetzung, dass Radfahrende mittig auf den Piktogrammen fahren und die genutzte Breite des ruhenden Verkehrs etwa 2,00 m beträgt, ergibt sich damit ein Sicherheitsraum zum ruhenden Verkehr von ca. 1,00 m (siehe Tab. 3-3). Zudem wird sowohl in den US-amerikanischen als auch in den kanadischen Empfehlungen darauf hingewiesen, dass die Piktogramme bei Fahrstreifenbreiten, die ein Nebeneinanderfahren nicht gewährleisten, unabhängig von den genannten Abstandsmaßen mittig auf dem Fahrstreifen markiert werden können.

Tab. 3-2 Übersicht von Einsatzgrenzen für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen oder Piktogramme

Kriterien	Dänemark	Deutschland	Frankreich		GB	Irland	Niederlande		Norwegen	Österreich	Schweiz	Australien	Kanada	USA	
	Andersen et al. (2012)	FGSV (2010a)	Cerema (2020)	Certu (2007)	DfT (2020) ³	NTA (2011)	CROW (2016)		NPRA (2013)	FSV (2014)	VSS (2017)	Austrorads (2014)	MTO (2013)	AASHTO (2012) NACTO (2014)	
Führungsform	v _{zul} oder v ₈₅ [km/h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]	DTV _{Rad} [Rad/24 h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]	DTV _{Rad} [Rad/24 h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]	
Mischverkehr (o. Mark.)	30		≤ ca. 8.000	≤ 5.000	≤ 2.500	≤ ca. 2.500	≤ 10.000	≤ 5.000	≤ 2.500	≤ 4.000	≤ ca. 15.000		≤ ca. 4.000	< 1.000 (schmal)	
	40	≤ 2.500											≤ 5.000	≤ 3.000 (Piktogr.)	
	50		≤ ca. 4.000				≤ ca. 3.500				≤ ca. 10.000	≤ 8.000	≤ ca. 3.000	≤ ca. 2.000	> 3000 (breit) ⁴
Schutzstreifen	30	keine Anwendung	≤ ca. 18.000	keine Anwendung innerorts		≤ ca. 4.500	> 10.000	nicht mehr empfohlen			≤ 15.000		keine Anwendung	keine Anwendung	keine Anwendung
	40														
	50		≤ ca. 12.000			≤ ca. 5.500	≤ 15.000			≤ ca. 10.000	> 8.000				
Piktogramme	30	nicht thematisiert	nicht thematisiert	nicht thematisiert		nicht thematisiert	empfohlen bei Mischverkehr	nicht thematisiert		nicht thematisiert	nicht thematisiert	nicht thematisiert	optional möglich	empfohlen bei Mischverkehr	empfohlen bei Mischverkehr
	40														
	50														

Tab. 3-3 Übersicht von Gestaltungsempfehlungen für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen oder Piktogramme

Kriterien	Dänemark	Deutschland	Frankreich	GB	Irland	Niederlande	Norwegen	Österreich	Schweiz	Australien	Kanada	USA	
	Andersen et al. (2012)	FGSV (2010a)	Cerema (2020)	DfT (2020)	NTA (2011)	CROW (2016)	NPRA (2013)	FSV (2014)	VSS (2017) VSS (1992)	Austrorads (2014)	MTO (2013)	AASHTO (2012) NACTO (2014)	
Mischverkehr (o. Mark.)	Breite schmales Profil	< 6,50 m (≤ 40 km/h)	< 6,00 m	keine Vorgaben	6,00 m 6,40 m ⁵	< 5,50 m	4,80 m	keine Vorgaben	< 6,00 m	5,00 bis 6,00 m	7,40 m	6,00 bis 8,00 m	-
	Breite weites Profil	> 6,50 m (> 40 km/h)	> 7,00 m		> 7,80 m	5,50 bis 7,00 m	5,80 m	keine Vorgaben	> 7,50 m	7,00 bis 7,50 m	8,40 m	8,00 bis 9,00 m	8,60 bis 9,20 m
	Ruhender Verkehr	nur bei 30 km/h	keine Vorgaben		keine Vorgaben	keine Vorgaben	keine Vorgaben	nicht zulässig auf Radhaupttrouten	keine Vorgaben	keine Vorgaben	keine Vorgaben	weites Profil	keine Vorgaben
Schutzstreifen	Breite Schutzstreifen		1,50 m	keine Anwendung innerorts	2,00 m (mind. 1,50 m)	2,00 m		1,50 bis 1,80 m	1,50 m	1,50 bis 2,50 m			
	Breite Restfahrbahn	keine Anwendung	≥ 4,50 m		keine Vorgaben	keine Vorgaben	keine Anwendung	keine Vorgaben	4,50 bis 5,50 m	keine Vorgaben	keine Anwendung	keine Anwendung	keine Anwendung
	ruhender Verkehr		Sicherheitsraum (0,50 m)		Sicherheitsraum (0,50 m)	keine Vorgaben	Sicherheitsraum (0,50 m), ≤ 40 km/h	Schutzstreifen: 1,75 m	Sicherheitsraum (0,50 m)				
Piktogramme	Markierung	nicht thematisiert	nicht thematisiert	nicht thematisiert	nicht thematisiert	mittig ⁶	nicht thematisiert	nicht thematisiert	nicht thematisiert	nicht thematisiert	keine Vorgaben	≥ 1,30 m vom Fahrbahnrand	≥ 1,20 m vom Fahrbahnrand
	Ruhender Verkehr					keine Vorgaben					3,30 m vom Fahrbahnrand	3,40 m vom Fahrbahnrand	

³ Interpretation der Grenzwerte, die für die meisten Menschen geeignet sind und keine Sicherheitsbedenken aufwerfen (vgl. Anlage 1)

⁴ Anordnung von Radverkehrsanlagen sollte geprüft werden.

⁵ Auf Linienbusrouten oder einem Schwerverkehrsanteil > 8 % oder einer zulässigen Geschwindigkeit von 40 mph.

⁶ „Mittig“ bezieht sich auf die eine mittige Positionierung der Piktogramme auf dem entsprechenden Fahrstreifen.

4 KENNTNISSTAND FORSCHUNG

Die Analyse des Kenntnisstandes Forschung umfasst grundsätzlich drei Themenblöcke:

- Unfälle (Sicherheitsbewertung unterschiedlicher Radverkehrsführungsformen, Unfallkonstellationen, Einflussgrößen)
- Verhalten (Akzeptanz unterschiedlicher Radverkehrsführungsformen, Interaktionen, seitliche Abstände, Geschwindigkeiten)
- Subjektive Verkehrssicherheit und Präferenzen (präferierte Radverkehrsführungsform, Verhaltensweisen zu den Aspekten Vermeidung, Gründe für Störepfinden und aggressives Verhalten gegenüber Radfahrenden sowie Einfluss von Piktogrammen auf das wahrgenommene Verhalten)

Dabei wurden ausschließlich Untersuchungen berücksichtigt, die

- die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Markierung, mit Schutzstreifen oder mit Piktogrammen einbeziehen.
- einen Bezug zur Infrastruktur mindestens als Einflussgröße herstellen.
- sich auf Streckenabschnitte innerhalb bebauter Gebiete beziehen.

4.1 Unfälle

4.1.1 Erkenntnisse im Überblick

Tab. 4-1 zeigt die Datengrundlagen (Untersuchungsraum und –gegenstand), methodische Aspekte (Zielgröße, Methodik der Auswertung, berücksichtigte Exposition) und die wesentlichen Erkenntnisse (Sicherheitwirkung unterschiedlicher Radverkehrsführungsformen, Einflussgrößen) der analysierten Studien zum Unfallgeschehen. Dabei wird hinsichtlich der Radverkehrsführungsformen unterschieden nach Mischverkehr bei $v_{zul} = 50$ km/h (MV50), Mischverkehr bei $v_{zul} = 30$ km/h (MV30), Schutzstreifen (SSF), Piktogramme (Pikto), Radfahrstreifen (RFS) und Radwege (RW). Die Wirkrichtung auf die Unfallanzahl der Radverkehrsführungsform sowie weiterer Einflussgrößen wird durch „+“ = unfallerhöhend und „-“ = unfallreduzierend dargestellt. Bei den Radverkehrsführungsformen werden die Wirkungen immer ausgehend von den Mischverkehrsführungen als Referenz (Ref.) dargestellt. Bei der Interpretation der Verkehrssicherheit unterschiedlicher Radverkehrsführungsformen ist zu berücksichtigen, dass Radverkehrsanlagen (Radfahrstreifen und Radwege) und zum Teil auch Schutzstreifen bei anderen verkehrlichen Bedingungen (Verkehrsstärken) zur Anwendung kommen als die Führung im Mischverkehr mit und ohne Piktogramme (vgl. Kapitel 3.2). Außerdem ist den analysierten Untersuchungen nicht immer klar zu entnehmen, ob und wie Streckenabschnitte und Knotenpunkte abgegrenzt werden. Zur Bewertung der Verkehrssicherheit unterschiedlicher Radverkehrsführungsformen werden, sofern vorhanden, die Kenngrößen oder Werte berücksichtigt, bei denen ein Bezug zur Verkehrsstärke hergestellt wird (bspw. Unfallraten oder Modelle mit Berücksichtigung der Verkehrsstärke; vgl. Tab. 4-1, Spalte Methodik). Ist dies in den Untersuchungen nicht der Fall, werden auch längenbezogene Werte (bspw. Unfalldichten) herangezogen. Ausführliche Erläuterungen zur Verkehrssicherheit unterschiedlicher Radverkehrsführungsformen, zu typischen Unfallkonstellationen bei der Führung im Mischverkehr sowie zu Einflussgrößen auf die Verkehrssicherheit sind in den Kapiteln 4.1.2 bis 4.1.4 zu finden. Die wesentlichen Erkenntnisse zum Unfallgeschehen bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Hinsichtlich der Verkehrssicherheit unterschiedlicher Radverkehrsführungsformen im nationalen Raum lässt sich kein eindeutiges Ranking ableiten. Dies könnte zum einen auf die grundsätzlichen verschiedenen Einsatzgrenzen von Mischverkehrsführungen gegenüber den anderen Radverkehrsführungsformen und zum anderen auf die Abgrenzung von Streckenabschnitten und Knotenpunkten sowie die betrachteten Unfallkollektive zurückzuführen sein. So ermitteln bspw. Jensen (2008, S. 9 ff.) im internationalen Raum unterschiedliche Wirkungen der Radverkehrsführungsform je nach Knotenpunkt und Streckenabschnitt, was durch Aurich et al. (2015, S. 87) bei der Betrachtung unterschiedlicher Unfalltypen bestätigt werden kann. Dabei zeigt sich

grundsätzlich, dass Radverkehrsanlagen auf Streckenabschnitten und die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne unterstützende Markierung (Schutzstreifen und Piktogramme wurden nicht untersucht) an Knotenpunkten sicherer sein können.

Bei der Betrachtung von Streckenabschnitten weisen Schüller et al. (2020b, S. 58) der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr bei einer $v_{zul} = 50$ km/h im nationalen Raum die höchsten Unfallraten im Vergleich zu den in anderen Untersuchungen betrachteten Radverkehrsführungsformen nach. Im internationalen Raum ergibt sich eine ähnliche Tendenz: Die Mehrzahl der Untersuchungen ermitteln auf Streckenabschnitten Sicherheitsvorteile von Radverkehrsanlagen gegenüber der Führung im Mischverkehr (Harris et al. 2013, S. 306 ff.; Lusk et al. 2011, S. 133; Teschke et al. 2014, S. 6; Teschke et al. 2012, S. 2340). Beim Vergleich zwischen Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen können keine Unterschiede im Verkehrssicherheitsniveau abgeleitet werden (Dietiker et al. 2012, S. 36; Kaulen et al. 2013, S. 42; Ohm et al. 2015, S. 33 ff.; Zweibrücken und Känel 1999, S. 64). Zur Wirkung von Piktogrammen auf das Unfallgeschehen liegen sowohl im nationalen (Koppers et al. 2021) als auch im internationalen Raum (Ferenchak und Marshall 2019; Ferenchak und Marshall 2016; Teschke et al. 2014; Teschke et al. 2012) nur wenige Erkenntnisse vor, wobei sich auch keine eindeutige Tendenz ergibt.

Typische Unfallkonstellationen bei Mischverkehrsführungen auf Streckenabschnitten sind Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle vorrangig an Grundstückszufahrten und Anschlussknotenpunkten sowie Dooring-, Längsverkehr- und Fahrnfälle insbesondere auf Gleisen von Straßenbahnen (u.a. Alrutz et al. 2015, S. 80; Ferenchak und Marshall 2019, S. 142; Koppers et al. 2021, S. 144; Pai 2011, S. 1230; Schüller et al. 2020b, S. 70; Szeiler und Skoric 2017, S. 3; Teschke et al. 2016, S. 6). Beim Vergleich zwischen Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen zeigt sich, dass Unfälle durch ruhenden Verkehr und Abbiege-Unfälle (insbesondere zwischen linksabbiegenden Kfz und entgegenkommenden Radfahrenden) tendenziell häufiger auf Abschnitten mit Schutzstreifen auftreten, während Einbiegen/Kreuzen-Unfälle (an Grundstückszufahrten und Anschlussknotenpunkten) sowie Unfälle im Längsverkehr und Fahrnfälle auf Gleisen von Straßenbahnen häufiger bei Mischverkehr ohne Schutzstreifen registriert werden (u.a. Alrutz et al. 2015, S. 80; Jensen 2008, S. 10; Ohm et al. 2015, S. 49). Hinsichtlich des Einflusses von Piktogrammen auf die Unfallkonstellationen liegen (nur wenige) unterschiedliche Erkenntnisse vor: Während bei Koppers et al. (2021, S. 144) der Anteil der Unfälle mit ruhendem Verkehr nach Markierung von Piktogrammen tendenziell abnimmt, zeigen Ferenchak und Marshall (2019, S. 142) eine Zunahme von Dooring-Unfällen nach der Markierung von Piktogrammen.

Hinsichtlich der Einflussgrößen hat vor allem die Verkehrsstärke des Rad- und Kfz-Verkehrs eine hohe Bedeutung. Dabei zeigt sich bei Untersuchungen, die multivariate Modelle verwenden, ein positiver degressiver Einfluss der Kfz- und der Radverkehrsstärke auf das Unfallgeschehen sowohl mit (Alrutz et al. 2015, S. 60; Schüller et al. 2020b, S. 65) als auch ohne Mischverkehrsbezug (Elvik und Goel 2019, S. 142 ff.). Das heißt, dass das Unfallgeschehen mit zunehmender Verkehrsstärke weniger stark ansteigt.

Darüber hinaus ist auch die Geschwindigkeit im Kfz-Verkehr (häufig beschrieben durch die zulässige Geschwindigkeit, da umfassende Daten zum tatsächlichen Geschwindigkeitsniveau selten vorliegen) vor allem im Bezug zur Führung des Radverkehrs im Mischverkehr als ein wesentlicher Einflussfaktor zu nennen. So wirkt sich eine zulässige Geschwindigkeit von < 50 km/h unfallreduzierend aus (u.a. Reid und Adams 2010, S. 24; Andersen et al. 2012, S. 10; Schober 2018, S. 88 ff.; Schüller et al. 2020b, S. 65). Bil et al. (2010, S. 1634) und Hummel und Kühn (2016, S. 15) stellen einen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit des Kfz-Verkehrs und Unfallschwere unabhängig von der Radverkehrsführungsform her, mit dem Resultat, dass das Risiko für Kopfverletzung und für tödliche Unfälle mit abnehmender Kfz-Geschwindigkeit abnimmt. Teschke et al. (2012, S. 2340) und Harris et al. (2013, S. 306) können zumindest mittelbar der Geschwindigkeit des Radverkehrs einen Einfluss auf das Unfallgeschehen nachweisen, da Straßen mit Gefälle einen unfallerhöhenden Einfluss haben.

Tab. 4-1 Datengrundlagen, methodische Aspekte und wesentliche Erkenntnisse (Ref. = Referenz; „+“ = unfallerhöhend; „-“ = unfallreduzierend) der analysierten Studien zum Unfallgeschehen

Studie	Untersuchungsraum	Untersuchungsgegenstand	Zielgröße	Methodik	Exposition	Unfallgeschehen Radverkehrsführungsform							Einflussfaktoren
						Kollektiv	MV50	MV30	SSF	Pikto	RFS	RW	
Alrutz (2009)	Deutschland (verschiedene Städte)	87 Strecken (ca. 111 km) verschiedene Führungsformen ⁷	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichte, Unfallrate	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]				Ref.		+	++	fehlende Sichtbeziehungen an AKP (+), Sicherheitstrennstreifen < 0,75 m (+)
Alrutz et al. (2015)	Deutschland (verschiedene Städte)	165 Strecken (ca. 90 km), 218 Knotenpunkte verschiedene Führungsformen ⁷	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichte, Unfallrate GLM (Generalized linear model) nur für Strecken	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]		Ref.		-		--	+	Radverkehrsstärke (+), Umfeldnutzung (+), Anschlussknotenpunkte (+)
Aurich et al. (2015)	Berlin, Deutschland	Straßennetz Berlin: 2.968 Strecken (ca. 1.025 km), 4.658 Knotenpunkte verschiedene Führungsformen ⁷	Unfälle Rf-Bet.	GLM (Generalized linear model)	Kfz [Kfz/24h]	UTyp AB UTyp RV UTyp LV	Ref. Ref. Ref.				+	+	Kfz-Verkehrsstärke (+), Umfeldnutzung (+), baulicher Mittelstreifen (-), ruhender Verkehr (+), Straßenbahngleise im Mischverkehr (+)
Bil et al. (2010)	Tschechien	alle polizeilich registrierten Unfälle 1995-2007	Unfälle Rf-Bet.	lineare Mehrfachregression	keine	Keine Ermittlung von Sicherheitsgraden						Kfz-Geschwindigkeit (+)	
Chen und Shen (2016)	Seattle, USA	Straßennetz Seattle verschiedene Führungsformen ⁷	Unfälle Rf-Bet.	GOL (Generalized ordered logit model), GAM (Generalized additive model)	keine	Keine Ermittlung von Sicherheitsgraden						zulässige Höchstgeschwindigkeit (+), Beteiligung linksabbiegender Kfz (+), Umfeldnutzung (-), Beschäftigungsdichte (-)	
Dietiker et al. (2012)	Schweiz (verschiedene Städte)	18 Streckenabschnitte Vorher: Mischverkehr Nachher: Schutzstreifen	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfallhergänge	keine		Ref.	0					-
Ferenchak und Marshall (2019), Ferenchak und Marshall (2016)	Chicago, USA	Straßennetz Chicago Vorher: Mischverkehr Nachher: Radfahrstreifen und Piktogramme	Unfälle Rf-Bet.	Negativ-Binomial-Regression	Radfahrende (aus Mobilitätsbefragung)		Ref.			+	++		ruhender Verkehr (+)
Harris et al. (2013), Harris et al. (2011)	Toronto und Vancouver, Kanada	690 verunfallte Radfahrende befragt	Unfälle Rf-Bet.	Cross-Over-Study, Logit-Modell	keine		Ref.		Ref.		-	--	Steigung/Gefälle (+), Kfz-Geschwindigkeit < 30 km/h (-)
Jensen (2008)	Kopenhagen, Dänemark	9 Strecken (inkl. Knotenpunkte) Vorher: Mischverkehr Nachher: Radwege, Radfahrstreifen	Unfälle Rf-Bet. und Fg-Bet.	Random-effect-model, GLM (Generalized linear model)	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]	Strecken: KP:	Ref. Ref.				- ++	+	-
Kaulen et al. (2013)	Deutschland (verschiedene Städte)	10 Strecken	Unfälle Rf-Bet.	Deskriptiv: Unfallzahl	keine		Ref.	0					-
Koppers et al. (2021)	Deutschland (verschiedene Städte)	14 Strecken Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichte, Unfallrate	Rad [Rf/24h]	Strecken: KP:	Ref. Ref.			+	-		-
Lusk et al. (2011)	Montreal, Kanada	12 Strecken Radwege, Mischverkehr	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfallrate	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]		Ref.					-	-
Munro (2012)	Victoria, Australien	Victoria (alle Unfälle mit ruhendem Verkehr)	Unfälle Rf-Bet. durch ruhenden Verkehr	deskriptiv: Unfallzahl	keine	Keine Ermittlung von Sicherheitsgraden						-	

⁷ Mittelbare Berücksichtigung der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr

Studie	Untersuchungsraum	Untersuchungsgegenstand	Zielgröße	Methodik	Exposition	Unfallgeschehen Radverkehrsführungsform							Einflussfaktoren
						Kollektiv	MV50	MV30	SSF	Pikto	RFS	RW	
Ohm et al. (2015)	Deutschland (verschiedene Städte)	268 km Strecken Mischverkehr und Schutzstreifen	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichte	keine		Ref.		+				Dichte Einmündungen und Zufahrten (+), ruhender Verkehr (+), Straßenbahn (+), Umfeldnutzung (+)
Pai (2011)	Großbritannien	alle Überhol-, Auffahr- und Dooring-Unfälle in Großbritannien	Überhol-, Auffahr- und Dooring-Unfälle Rf-Bet.	Mixed multinomial logit model	keine	Keine Ermittlung von Sicherheitsgraden							<u>Überhol-Unfälle</u> : außerorts (+), kreuzende/querende Rf (+), Beteiligung Bus (+); <u>Auffahr-Unfälle</u> : außerorts (+), kreuzende/querende Rf (+), Beteiligung Bus (+), Nässe (+), Dunkelheit (+); <u>Dooring-Unfälle</u> : Radfahrstreifen (+), innerorts (+), Einbahnstraße (+), Dunkelheit (-)
Reichenbach und Affolter (2003)	Schweiz (verschiedene Städte)	26 Strecken (19 innerorts) Mischverkehr	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfallzahl	keine	Keine Ermittlung von Sicherheitsgraden							-
Richter (2019)	Deutschland (verschiedene Städte)	143 Strecken (106 km) Schutz-, Radfahrstreifen	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichte, Unfallrate	Rad [Rf/24h]				Ref.		+		ruhender Verkehr (+), Breite RVA (-)
Schober (2018)	Wien, Österreich	65 Strecken verschiedene Führungsformen ⁷	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichte, Unfallrate	Rad [Rf/24h]		Ref.	++	+		+++	-	Kfz-Geschwindigkeit (+), Straßenbahngleise (+)
Schüller et al. (2020b)	Deutschland (verschiedene Städte)	136 Strecken Mischverkehr	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfallraten, GLM (Generalized linear model)	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]		Ref.	+					Verkehrsstärke Rad (+), Verkehrsstärke Kfz (+), Straßenbahngleise (+), Kfz-Geschwindigkeit (+), Dichte Knotenpunktarme (+), Fahrstreifenbreite (+)
Schüller et al. (2020a)	Deutschland (verschiedene Städte)	Unfälle durch ruhenden Verkehr in ausgewählten Gebieten	Unfälle durch ruhenden Verkehr	deskriptiv: Unfalldichte	keine	Keine Ermittlung von Sicherheitsgraden							enge Straßenräume (+), fehlende Sicherheitstrennstreifen (+)
Szeiler und Skoric (2017)	Österreich (verschiedene Städte)	10 Strecken Mischverkehr und Schutzstreifen	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfallzahl	keine	Keine Ermittlung von Sicherheitsgraden							fehlende Sicherheitstrennstreifen (+)
Teschke et al. (2016)	Toronto, Kanada	276 verunfallte Radfahrende befragt Unfälle in Verbindung mit Straßenbahngleisen	Unfälle Rf-Bet.	Multinomial logit model	Verkehrsleistung der Befragten [km]		Ref.				-		Verkehrsleistung Rad (-), ruhender Verkehr (+), linksabbiegende Rf beteiligt (+)
Teschke et al. (2014), Teschke et al. (2012)	Toronto und Vancouver, Kanada	690 verunfallte Radfahrende befragt (vgl. Harris et al. 2013)	Unfälle Rf-Bet.	Cross-Over-Studie, Logit-Modell	keine		Ref.		-	--			ruhender Verkehr (+), Steigung/Gefälle (+), Straßenbahngleise (+)
Zweibrücken und Känel (1999)	Schweiz (verschiedene Städte)	8 Strecken Mischverkehr und Schutzstreifen (davon 4 Strecken Vorher-Nachher)	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfallzahl	keine		Ref.	0					-

Neben der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit hat auch der ruhende Verkehr einen relevanten (unfall erhöhenden) Einfluss auf das Unfallgeschehen bei Mischverkehrsführungen. Das betrifft sowohl das bloße Vorhandensein von ruhendem Verkehr (Aurich et al. 2015, S. 87; Ohm et al. 2015, S. 42 ff.; Richter 2019, S. 53; Teschke et al. 2014, S. 6) als auch zu schmale oder gar fehlende Sicherheitsräume zu parkenden Kfz (Alrutz 2009, S. 86, Schüller et al. 2020a, S. 92).

Als weitere Einflussfaktoren werden fehlende Sichtbeziehungen an Anschlussknotenpunkten (Alrutz 2009, S. 114), eine hohe Anzahl an Anschlussknotenpunkten oder Grundstückszufahrten (Alrutz et al. 2015, S. 60; Ohm et al. 2015, S. 41; Schüller et al. 2020b, S. 65), das Vorhandensein von Straßenbahngleisen (Aurich et al. 2015, S. 87; Schober 2018, S. 84; Schüller et al. 2020b, S. 65; Teschke et al. 2016, S. 2), eine intensive Umfeld-/Randnutzung (Alrutz et al. 2015, S. 60; Aurich et al. 2015, S. 87; Chen und Shen 2016, S. 244), die Breite von Schutzstreifen (Richter 2019, S. 53) sowie die Fahrstreifenbreite (Schüller et al. 2020b, S. 65) ermittelt.

4.1.2 Radverkehrsführungsform

Hinsichtlich der Sicherheitsgrade der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr im Vergleich zu anderen Führungsformen lässt sich im nationalen Raum keine eindeutige Tendenz ableiten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Mischverkehrsführungen für grundsätzlich andere Anwendungsfälle (u. a. hinsichtlich der Verkehrsstärke; vgl. Kapitel 3.1) in Frage kommen als Radverkehrsanlagen. Zudem haben auch die Abgrenzung von Streckenabschnitten und Knotenpunkten sowie die betrachteten Unfallkollektive einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Der nationale Kenntnisstand beschränkt sich mit Ausnahme von Koppers et al. (2021), die die Wirkung von Piktogrammen auf der Fahrbahn untersuchen, auf die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Markierung sowie mit Schutzstreifen. Tab. 4-2 enthält einen Überblick der national (Ausnahme: Schober 2018, Österreich) ermittelten Unfallraten in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform.

Tab. 4-2 Überblick zu ermittelten Unfallraten in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform

Quelle	Unfallkollektiv	Unfallraten je Führungsform [$U/(10^6 \cdot R_f \cdot km)$]					
		Mischverkehr		Schutzstreifen	Piktogramme	Radfahrstreifen	Radwege
		30 km/h ¹	50 km/h ¹				
Alrutz (2009, S. 60)	$U_{Rf}(P,SS)$			3		5	6,5
Alrutz et al. (2015, S. 62)	$U_{Rf}(P)$	8,3		8,6		7,9	9,8
Koppers et al. (2021, S. 148)	$U_{Rf}(P)$	2,3			2,6		
Richter (2019, S. 54)	$U_{Rf}(P)$			3		6,4	
Schober (2018, S. 87 ff.)	$U_{Rf}(P,S)$	12,2	14,6	13,8		15,8	8
Schüller et al. (2020b, S. 58)	$U_{Rf}(P)$	7,6	10,3				

¹ zulässige Geschwindigkeit

Alrutz (2009, S. 60) stellen die Unfallraten von insgesamt 87 Streckenabschnitten mit verschiedenen Führungsformen des Radverkehrs (Schutzstreifen, Radfahrstreifen, Radweg) vergleichend gegenüber, mit dem Resultat, dass Streckenabschnitte mit Schutzstreifen ($3 U_{Rf}(P,SS)/(10^6 \cdot R_f \cdot km)$) gegenüber Radfahrstreifen ($5 U_{Rf}(P,SS)/(10^6 \cdot R_f \cdot km)$) und Radwegen ($6,5 U_{Rf}(P,SS)/(10^6 \cdot R_f \cdot km)$) die niedrigsten Unfallraten aufweisen.

Richter (2019, S. 54) kommen beim Vergleich von insgesamt 143 Streckenabschnitten mit Schutzstreifen und Radfahrstreifen auf ganz ähnliche Ergebnisse. So ergeben sich Unfallraten auf Streckenabschnitten mit Schutzstreifen von $3 U_{Rf}(P)/(10^6 \cdot R_f \cdot km)$ und auf Radfahrstreifen von $6,4 U_{Rf}(P)/(10^6 \cdot R_f \cdot km)$. Auch hinsichtlich der Unfallschwere weisen Radfahrstreifen (21,1 %) einen deutlich höheren Anteil an Unfällen mit schwerem Personenschaden auf, als Schutzstreifen (10,9 %). Innerhalb von Knotenpunkten weisen hingegen Schutzstreifen (15,5 %) einen höheren Anteil an Unfällen mit schwerem Personenschaden auf, als Radfahrstreifen (10,5 %).

Alrutz et al. (2015) kommen hingegen auf ein anderes Ranking: Auf Basis von 165 Streckenabschnitten wurden generalisierte lineare Modelle entwickelt, die neben der Radverkehrsstärke, der Umfeldnutzung und der Anzahl der

Anschlussknotenpunkte, die Radverkehrsführungsform als Einflussgröße berücksichtigen. Im Ergebnis sind Streckenabschnitte mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen unsicherer als Fahrradstraßen, Radfahrstreifen und gemeinsame Geh- und Radwege, aber sicherer als Radwege (Alrutz et al. 2015, S. 60). Der Mischverkehr ohne Markierungshilfen hat dabei im Vergleich zur Führung mit Schutzstreifen ein geringeres Unfallgeschehen vorzuweisen. Ein zusätzlicher Vergleich von Unfallraten kommt zu einer ähnlichen Tendenz, wenngleich die Unterschiede ($7,9$ bis $9,6 U_{Rf}(P)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$), mit Ausnahme der Fahrradstraßen ($1,9 U_{Rf}(P)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$), welche mit großem Abstand die geringsten Unfallraten aufweisen, eher gering sind (Alrutz et al. 2015, S. 62).

Schüller et al. (2020b, S. 58) ermittelten auf Basis 136 Streckenabschnitten im Vergleich zu den o.g. Untersuchungen die höchsten Unfallraten für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr im nationalen Raum sofern alle Streckenabschnitte einbezogen werden ($9,8 U_{Rf}(P)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$). In Abhängigkeit der zulässigen Geschwindigkeit ergeben sich mittlere Unfallraten von $7,6 U_{Rf}(P)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$ bei 30 km/h und $10,3 U_{Rf}(P)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$ bei 50 km/h.

Ohm et al. (2015, S. 33 ff.) ermitteln beim Vergleich der Unfalldichten von Streckenabschnitten ohne (257 km) und mit Schutzstreifen (11 km) höhere Werte für Streckenabschnitte mit Schutzstreifen. Allerdings ist auf Strecken ohne Schutzstreifen eine höhere Unfallschwere zu verzeichnen.

Kaulen et al. (2013, S. 42) können auf Basis eines Vorher-Nachher-Vergleiches von 10 Streckenabschnitten, auf denen Schutzstreifen markiert wurden (einseitig, alternierend, beidseitig), keinen Sicherheitsunterschied ableiten, da sowohl im Vorher- als auch im Nachher-Zeitraum keine Unfälle registriert wurden.

Koppers et al. (2021) untersuchen die Wirksamkeit von Fahrradpiktogrammen und Hinweisschildern zur Erhöhung der Aufmerksamkeit hinsichtlich von Radfahrenden auf der Fahrbahn auf Basis eines Vorher-Nachher-Vergleiches von 14 Streckenabschnitten (davon 1 Streckenabschnitt mit ausschließlich Beschilderung). Dabei werden sowohl Strecken mit Mischverkehr auf der Fahrbahn als auch Strecken mit nicht benutzungspflichtigen Radwegen berücksichtigt. Auf den Streckenabschnitten mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr hat sich nach der Markierung der Piktogramme bzw. Installation der Hinweisschilder die Unfallrate leicht erhöht (Koppers et al. 2021, S. 148; von $2,3$ auf $2,6 U_{Rf}(P)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$). Innerhalb der Knotenpunkte im Zuge der Streckenabschnitte hat sich die Unfallrate im Nachher-Zustand hingegen verringert (Koppers et al. 2021, S. 148; von $0,9$ auf $0,4 U_{Rf}(P)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$).

Schüller et al. (2020a) untersuchen ausschließlich Unfälle im Zusammenhang mit Parken innerhalb von ausgewählten Gebieten. Ein Vergleich der Unfalldichten zeigt, dass Radfahrstreifen ($3,1 U_{Rf/Fg}(P)/(km \cdot 3a)$) und die Führung im Mischverkehr ($2,3 U_{Rf/Fg}(P)/(km \cdot 3a)$) die höchsten Werte aufweisen, während Radwege ($1,9 U_{Rf/Fg}(P)/(km \cdot 3a)$) und Schutzstreifen ($1 U_{Rf/Fg}(P)/(km \cdot 3a)$) geringere Werte aufweisen (Schüller et al. 2020a, S. 95). Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass das Kollektiv der Schutzstreifen nur etwa 1 km umfasste.

Aurich et al. (2015) kommen auf Basis generalisierter linearer Modelle auf differenziertere Ergebnisse, indem Modelle für unterschiedliche Unfalltypen⁸ entwickelt wurden. Die Datengrundlage umfasst dabei das Berliner Straßennetz (2.968 Streckenabschnitte). Dabei hat sich gezeigt, dass hinsichtlich von Abbiege-Unfällen die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Markierung (Schutzstreifen und Piktogramme wurden nicht untersucht) gegenüber Radwegen und Radfahrstreifen sicherer ist, während hinsichtlich von Unfällen durch ruhenden Verkehr und Unfällen im Längsverkehr Radwege am sichersten sind (Aurich et al. 2015, S. 87).

Der Vergleich unterschiedlicher Führungsformen im internationalen Raum zeigt auf Streckenabschnitten in der Mehrzahl Sicherheitsvorteile von Radwegen gegenüber der Führung auf der Fahrbahn:

Jensen (2008) können die Tendenzen von Aurich et al. (2015) bestätigen: Dabei wurden 14 Streckenabschnitte in Kopenhagen (Dänemark), auf denen der Radverkehr im Mischverkehr geführt wurde, mit Radwegen und Radfahrstreifen ausgestattet. Der Vorher-Nachher-Vergleich zeigt, dass auf den Abschnitten mit Radwegen die

⁸ „Der Unfalltyp beschreibt die Konfliktsituation, in deren Folge es zum Unfall gekommen ist“ (FGSV 2012, S. 8).

Anzahl der Unfälle auf der Strecke um 13 % abgenommen, aber an Knotenpunkten um 24 % zugenommen haben (Jensen 2008, S. 9). Auf den Abschnitten mit Radfahrstreifen hat sich das Unfallgeschehen sowohl auf Streckenabschnitten (27 %) als auch an Knotenpunkten (57 %) erhöht (Jensen 2008, S. 12).

Lusk et al. (2011, S. 133) vergleichen jeweils 6 Streckenabschnitte mit Radwegen gegenüber der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr in Montreal (Kanada) mit dem Ergebnis, dass die Radwege ein geringeres relatives Risiko aufwiesen als die Referenzstrecken.

Schober (2018) untersuchte Strecken in Wien (Österreich). Generell weisen Radwege die geringsten ($8 U_{Rf}(P, S)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$) und Radfahrstreifen ($15,8 U_{Rf}(P, S)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$) die höchsten Unfallraten auf. Die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit einer $v_{zul} = 30$ km/h ($12,2 U_{Rf}(P, S)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$) ist gegenüber Schutzstreifen ($13,8 U_{Rf}(P, S)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$) und Mischverkehr bei $v_{zul} = 50$ km/h ($14,6 U_{Rf}(P, S)/(10^6 \cdot Rf \cdot km)$) am sichersten (Schober 2018, S. 87 ff.). Es ist aber zu berücksichtigen, dass nur Streckenabschnitte einbezogen wurden, auf denen mind. 1 Unfall mit Radverkehrsbeteiligung im Untersuchungszeitraum registriert wurde.

Beim Vergleich verschiedener Mischverkehrsführungen untereinander (ohne Markierung, mit Schutzstreifen, mit Piktogrammen) ergibt sich wiederum kein eindeutiges Bild:

Dietiker et al. (2012, S. 36) und Zweibrücken und Känel (1999, S. 64) können auf Basis eines Vorher-Nachher-Vergleiches von Streckenabschnitten mit und ohne Schutzstreifen in der Schweiz keine statistisch gesicherte Aussage ableiten, welche Führungsform sicherer ist.

Harris et al. (2011; 2013) und Teschke et al. (2012; 2014) befragten verunfallte Radfahrende in Krankenhäusern in Toronto und Vancouver (Kanada) und analysierten die Sicherheitswirkung unterschiedlicher Radverkehrsführungsformen auf Basis einer Cross-Over-Studie (Vergleich von Strecken mit Unfällen gegenüber Strecken ohne Unfälle). In beiden Untersuchungen wurde die gleiche Datenbasis an befragten Radfahrenden genutzt. Harris et al. (2013, S. 306 ff.) ermitteln, dass die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr (mit und ohne Piktogramme) am unsichersten im Vergleich zu anderen Führungsformen ist. Teschke et al. (2012; 2014) differenzieren zusätzlich nach Mischverkehr ohne und mit Piktogrammen, Straßenkategorien und dem Vorhandensein von ruhendem Verkehr mit dem Ergebnis, dass Mischverkehr mit Piktogrammen nur auf Hauptverkehrsstraßen mit parkenden Kfz sicherer sind, als ohne Markierung. Ohne parkende Kfz erreichen beide Mischverkehrsführungsformen ein ähnliches Sicherheitsniveau, allerdings unter dem von Radfahrstreifen (Teschke et al. 2012, S. 2340; Teschke et al. 2014, S. 6).

Ferenchak und Marshall (2016, 2019) untersuchten anhand des Straßennetzes Chicagos (USA) das Unfallgeschehen auf Streckenabschnitten mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Piktogramme (Vorher) sowie mit Piktogrammen und Radfahrstreifen (Nachher). Dabei hat sich gezeigt, dass die Abschnitte mit Piktogrammen den größten Anstieg der Verunglücktenrate aufweisen (Ferenchak und Marshall 2019, S. 141 ff.). Eine mögliche Erklärung dieses Ergebnisses könnte nach Ferenchak und Marshall (2019, S. 143) sein, dass sich mit der Markierung von Piktogrammen die subjektive Verkehrssicherheit bei gleichbleibender objektiver Verkehrssicherheit erhöht – ein ähnlicher Effekt, der laut den Autoren ebenfalls bei der Markierung von Fußgängerüberwegen zu beobachten ist. Im Gesamtranking sind die höchsten Verletzungsraten dennoch auf Abschnitten mit Radfahrstreifen zu verzeichnen.

4.1.3 Unfallkonstellationen

Ohne Unterscheidung nach Führungsformen kann ein großer Anteil des Radverkehrsunfallgeschehens Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfällen zugeordnet werden (u.a. Alrutz et al. 2015, S. 77; Bil et al. 2010, S. 1634; Schober 2018, S. 54; Schüller et al. 2020b, S. 49), was vor allem auf Anschlussknotenpunkte und Grundstückzufahrten zurückzuführen ist. Bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr haben sich darüber hinaus vor allem Doring⁹-Unfälle, Überholunfälle und Fahrnfälle auf Gleisen von Straßenbahnen als auffällig herausgestellt (u.a.

⁹ Zusammenstöße mit öffnenden Kfz-Türen.

Alrutz et al. 2015, S. 80; Ferenchak und Marshall 2019, S. 142; Koppers et al. 2021, S. 144; Pai 2011, S. 1230; Schüller et al. 2020b, S. 70; Szeiler und Skoric 2017, S. 3; Teschke et al. 2016, S. 6). Inwiefern unterschiedliche Mischverkehrsführungsformen auf die Unfallkonstellationen auswirken, wird im Folgenden dokumentiert:

Alrutz et al. (2015, S. 80) identifizieren auf Streckenabschnitten mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr Abbiege- und Einbiegen-Kreuzen-Unfälle, Unfälle im Längsverkehr (beim Überholen) sowie Dooring-Unfälle als auffällige Unfallkonstellationen – beim Vergleich zwischen Strecken mit und ohne Schutzstreifen zeigt sich, dass Dooring- und Einbiegen-Kreuzen-Unfälle bei beiden Führungsformen auffällig sind, während die Unfälle im Längsverkehr vor allem auf Strecken ohne Schutzstreifen registriert wurden. Abbiege-Unfälle sind auf Strecken mit Schutzstreifen anteilmäßig häufiger zu verzeichnen. Darüber hinaus zeigt sich, dass auf Strecken mit Schutzstreifen eher Unfälle beim Linksabbiegen (Linksabbiegender Kfz vs. entgegenkommende Radfahrende) und ohne Schutzstreifen eher Unfälle beim Rechtsabbiegen (Rechtsabbiegender Kfz vs. Geradeausfahrende Radfahrende) dokumentiert werden.

Alrutz (2009, S. 69) können die Ergebnisse teilweise bestätigen: So werden auf Strecken mit Schutzstreifen vermehrt Dooring-Unfälle (17 % des Unfallgeschehens) und eher selten Unfälle im Längsverkehr registriert. Hinsichtlich von Unfällen zwischen rechtsabbiegender Kfz und geradeausfahrenden Radfahrenden (12 % des Unfallgeschehens) wird allerdings auch für Strecken mit Schutzstreifen eine Auffälligkeit ermittelt.

Ohm et al. (2015, S. 49) ermitteln auch eine Auffälligkeit hinsichtlich von Unfällen beim Linksabbiegen (Linksabbiegender Kfz vs. entgegenkommende Radfahrende) auf Strecken mit Schutzstreifen gegenüber der nicht markierten Führung. Unfälle durch ruhenden Verkehr werden ebenfalls auf Strecken mit Schutzstreifen häufiger registriert. Einbiegen-Kreuzen-Unfälle auf der Fahrbahn sowie im Seitenraum (Gehweg) in Verbindung mit Grundstückzufahrten (vor allem mit Radfahrenden in falscher Richtung) sind hingegen auffälliger auf Strecken ohne Schutzstreifen.

Richter (2019, S. 48) ermitteln beim Vergleich von Strecken mit Schutz- und Radfahrstreifen eine besonders hohen Anteil der Unfälle durch ruhenden Verkehr auf Strecken mit Schutzstreifen (33 %) gegenüber Radfahrstreifen (10 %), wobei Dooring-Unfälle wiederum als generelles Problem erkannt werden. Längsverkehrsunfälle treten auf Schutzstreifen häufiger auf (19 %) als auf Strecken mit Radfahrstreifen.

In Koppers et al. (2021, S. 144) machen Unfälle durch ruhenden Verkehr 27 % der Unfälle auf der freien Strecke mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr aus. Nach der Markierung von Fahrrad-Piktogrammen auf der Fahrbahn hat sich dieser Anteil auf 0 % verringert, während der Anteil von Längsverkehrsunfällen und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle entsprechend gestiegen ist. Hinsichtlich der Interpretation ist allerdings zu berücksichtigen, dass im Vorher-Zeitraum 3 Unfälle durch ruhenden Verkehr in 3 Jahren und im Nachher-Zeitraum 0 Unfälle durch ruhenden Verkehr in 1 Jahr registriert wurden.

Ferenchak und Marshall (2019, S.142) kommen zu einem anderen Ergebnis: Die Analyse des Unfallgeschehens in Chicago zeigt, dass Dooring-Unfälle auf Radfahrstreifen und im Mischverkehr ohne Markierung zurückgingen, während sie auf den Strecken mit markierten Piktogrammen auf der Fahrbahn anstiegen.

Anhand eines Vorher-Nachher-Vergleiches von Streckenabschnitten in Kopenhagen zeigen Jensen (2008, S. 10), dass Unfälle durch ruhenden Verkehr durch die Anlage von Radwegen und Radfahrstreifen (Vorher: Mischverkehr) um 38 % reduziert werden können. Eine weitere Abnahme konnte hinsichtlich von Linksabbiege-Unfällen (Rad biegt ab) registriert werden (-41 %). Hingegen haben sich die Rechts- und Linksabbiege-Unfälle (Kfz biegt ab vs. entgegenkommende Radfahrende) im Vergleich zum Mischverkehr deutlich erhöht.

Pai (2011) analysieren mit Hilfe multivariater Modelle Überhol-, Auffahr- und Dooring-Unfälle in Großbritannien. Hinsichtlich von Dooring-Unfällen haben sich hierbei Strecken mit Radfahrstreifen als signifikant unfallerhöhend im Vergleich zu anderen Führungsformen ergeben. Begründet wird dies damit, dass Radfahrstreifen häufig zu nah an Anlagen für den ruhenden Verkehr markiert werden (Pai 2011, S. 1232 ff.).

Teschke et al. (2016, S. 7) befragten verunfallte Radfahrende in Krankenhäusern in Toronto (Kanada) und kamen zu dem Ergebnis, dass Gleisunfälle (Fahrerunfälle durch Befahren von Straßenbahngleisen) häufiger auf größeren Stadtstraßen mit parkenden Autos und ohne Radverkehrsanlagen auftreten. Die überwiegende Mehrheit der Unfälle war darauf zurückzuführen, dass sich aufgrund von Ausweichmanövern der Fahrradreifen im Gleis verfangen hatte (Teschke et al. 2016, S. 5).

Teschke et al. (2014, S. 6) ermittelten Auffälligkeiten hinsichtlich von Kollisionen mit parkenden Kfz, einschließlich Kfz-Türen auf Hauptverkehrsstraßen ohne Radverkehrsanlagen und mit parkenden Kfz am Fahrbahnrand. Zudem sind Unfälle auf Hauptverkehrsstraßen mit Straßenbahngleisen bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auffällig.

4.1.4 Einflussgrößen

Exposition

Die Verkehrsstärke der Radfahrenden sowie auch potentieller Beteiligter (Kfz und Gehende) hat einen elementaren Einfluss auf die Verkehrssicherheit. Denn je mehr Verkehrsteilnehmende sich auf bestimmten Infrastrukturelementen bewegen, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Unfälle auftreten – gleichzeitig können keine Unfälle auftreten, wenn sich keine Verkehrsteilnehmenden auf den entsprechenden Flächen bewegen. Allerdings sind hinsichtlich der Art des Einflusses der Verkehrsstärke auf das Unfallgeschehen unterschiedliche Effekte zu beobachten. So kann der Einfluss grundsätzlich positiv progressiv, proportional oder degressiv sein. Während die Verwendung von Unfallraten, wie sie häufig in nationalen Untersuchungen zur Anwendung kommt (Alrutz 2009; Alrutz et al. 2015; Koppers et al. 2021; Richter 2019; Schüller et al. 2020b), der Verkehrsstärke ein positiv proportionalen Einfluss auf das Unfallgeschehen unterstellt, kann dieser Einfluss mit Hilfe multivariater Modelle unter der Verwendung von Verteilungen aus der Exponentialfamilie präziser beschrieben werden. Dabei zeigt sich sowohl für die Rad- als auch Kfz-Verkehrsstärke ein positiv degressiver Einfluss auf das Unfallgeschehen – das heißt, dass das Unfallgeschehen mit zunehmender Verkehrsstärke unterproportional ansteigt (Alrutz et al. 2015, S. 60; Elvik und Goel 2019, S. 142 ff.; Schüller et al. 2020b, S. 65). Dieser Zusammenhang wird auch als „Safety-in-numbers“-Effekt bezeichnet (Elvik 2009; Elvik und Goel 2019). Dabei zeigen Elvik und Goel (2019, S. 142 ff.) in einer Meta-Studie, in der vorrangig Untersuchungen von Gebieten/Kommunen (makroskopisch) und Knotenpunkten (mikroskopisch) analysiert wurden, dass der „Safety-in-numbers“-Effekt für Radfahrende und Kfz weniger stark wirkt, als bei Gehenden und auf makroskopischer Ebene stärker wirkt, als auf mikroskopischer Ebene. Schepers et al. (2015, S. 264) schlussfolgern ebenfalls, dass ein hoher Anteil der Fahrradnutzung die Verkehrssicherheit insgesamt erhöhen kann, da einerseits weniger Menschen mit dem Auto fahren und eine hohe Radverkehrsstärke andererseits zu einer größeren Sensibilisierung der Kfz-Führenden führt.

Ein spezifischer Bezug zwischen der Verkehrsstärke und der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf Streckenabschnitten wird vor allem durch Schüller et al. (2020b), Alrutz et al. (2015), Alrutz (2009) und Ohm et al. (2015) hergestellt:

Schüller et al. (2020b, S. 65) können auf Basis Verallgemeinerter linearer Modelle sowohl der Rad- als auch der Kfz-Verkehrsstärke ein Einfluss auf das Radverkehrsunfallgeschehen quantifizieren. Mit Regressionskoeffizienten (Exponent der Verkehrsstärke) von 0,75 (Radverkehrsstärke) und 0,48 (Kfz-Verkehrsstärke) wird jeweils ein positiv degressiver Einfluss ermittelt, wobei die Radverkehrsstärke näher an einem proportionalen Einfluss (Regressionskoeffizient = 1) als die Kfz-Verkehrsstärke ist.

Alrutz et al. 2015, S. 60 erstellen ebenfalls ein Verallgemeinertes lineares Modelle für Streckenabschnitte, allerdings mit verschiedenen Radverkehrsführungsformen, wobei lediglich die Radverkehrsstärke als Exposition betrachtet wird. Dieser kann mit einem Regressionskoeffizienten von = 0,525 auch ein positiv degressiver Einfluss auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden. Zudem wird der Einfluss der Radverkehrsstärke in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform auf Basis einer linearen Einfachregression überprüft, mit dem Ergebnis, dass das Bestimmtheitsmaß bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr (0,67) am höchsten ist (Alrutz et al. 2015,

S. 58). Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass die Radverkehrsstärke bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr einen stärkeren Einfluss auf das Unfallgeschehen hat, als bei anderen Radverkehrsführungsformen.

Alrutz (2009, S. 58) weisen ebenfalls (auf Basis einer linearen Einfachregression) einen Einfluss der Radverkehrsstärke auf das Unfallgeschehen differenziert nach Strecken mit Schutzstreifen, Radfahrstreifen und Radwegen nach. Dabei wurde für Radwege ohne Benutzungspflicht (hier dürfen Radfahrende auch die Fahrbahn benutzen) das höchste Bestimmtheitsmaß (0,52) ermittelt. Das Bestimmtheitsmaß für Schutzstreifen liegt bei 0,45.

Sowohl Ohm et al. (2015, S. 37) als auch Alrutz (2009, S. 59) können der Kfz-Verkehrsstärke hingegen keinen Einfluss auf das Radverkehrsunfallgeschehen nachweisen. Während Alrutz (2009) Streckenabschnitte mit Schutzstreifen, Radfahrstreifen und Radwegen untersuchte, lagen bei Ohm et al. (2015) Streckenabschnitte mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen zugrunde.

Aurich (2012, S. 79 ff.) kann aufgrund fehlender Radverkehrsstärken lediglich den Einfluss der Kfz-Verkehrsstärke überprüfen, mit dem Ergebnis, dass je nach Unfalltyp Regressionskoeffizienten von 0,44 (Fahrerunfall mit der Beteiligung nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmender) und 0,85 (Abbiege-Unfall mit der Beteiligung nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmender) ermittelt wurden. Damit wird der Kfz-Verkehrsstärke auch ein positiv degressiver Einfluss unterstellt, wobei der Wert bei den Abbiege-Unfällen schon nahe an einem proportionalen Zusammenhang ist.

Einen etwas anderen Ansatz wählten Teschke et al. (2016, S. 6), die die individuelle Verkehrsleistung der Radfahrenden mit einbeziehen (Befragung zur Anzahl der Fahrten mit dem Rad im Jahr). Dabei zeigt sich, dass die Wahrscheinlichkeit in einen Unfall verwickelt zu sein steigt, je unerfahrener und weniger häufig Radfahrende das Fahrrad nutzen.

Geschwindigkeit

Dass die Geschwindigkeit grundsätzlich einen Einfluss auf Unfallzahl und –schwere hat, ist allein damit zu erklären, dass der Bremsweg im Bezug zur Geschwindigkeit exponentiell steigt. Vor allem hinsichtlich der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr wird die Geschwindigkeit als ein wesentlicher Einflussfaktor häufig genannt (u.a. Reid und Adams 2010, S. 24; Andersen et al. 2012, S. 10; Schüller et al. 2020b, S. 65). Schepers et al. (2015, S. 267) führen das hohe Radverkehrssicherheitsniveau in den Niederlanden auch auf eine konsequente Trennung zwischen Radverkehr und schnellem Kfz-Verkehr zurück. Hummel und Kühn (2016, S. 15) stellen unabhängig vom Kontext Führungsform fest, dass sich das Kopfverletzungsrisiko bei Radfahrenden „*ausnahmslos deutlich verringern*“ würde, wenn sich die Aufprallgeschwindigkeit des Pkw von 40 km/h auf 20 km/h reduziert.

In den meisten Untersuchungen wird der Einfluss der zulässigen Geschwindigkeit auf das Radunfallgeschehen überprüft (Bíl et al. 2010, Chen und Shen 2016, Schober 2018, Schüller et al. 2020b), da im Vergleich zur Berücksichtigung des tatsächlichen Geschwindigkeitsniveaus, wie bspw. bei Harris et al. (2013), eine höhere Datenverfügbarkeit gegeben ist. Bíl et al. (2010, S. 1634) zeigen auf Basis einer Analyse aller polizeilich registrierten Radverkehrsunfälle zwischen 1995 und 2007 in Tschechien, dass die Wahrscheinlichkeit als Radfahrende*r getötet zu werden am höchsten ist, wenn Kfz-Führende die zulässige Geschwindigkeit überschreiten (wobei die Information auf den Angaben in der Unfallanzeige basieren und nicht auf den tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten). Auch Chen und Shen (2016, S. 244) zeigen eine höhere Unfallschwere bei höheren zulässigen Geschwindigkeiten des motorisierten Verkehrs. Schober (2018, S. 88 ff.) und Schüller et al. (2020b, S. 65) können für Strecken mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr und einer zulässigen Geschwindigkeit von 30 km/h zudem einen reduzierenden Einfluss auf die Unfallrate nachweisen. Harris et al. (2013, S. 306) zeigt einen unfallreduzierenden Einfluss für Strecken, auf denen das tatsächliche Geschwindigkeitsniveau des Kfz-Verkehrs ≤ 30 km/h beträgt.

Neben der Geschwindigkeit des Kfz-Verkehrs kann auch die Geschwindigkeit der Radfahrenden einen Einfluss auf das Unfallgeschehen haben. Zumindest indirekt können sowohl Teschke et al. (2012, S. 2340) als auch Harris et al. (2013, S. 306) dies bestätigen, indem sie einen deutlich unfallerhöhenden Einfluss von Straßen mit Gefälle nachweisen. Auch Schepers et al. (2015, S. 268) weisen auf einen Zusammenhang zwischen einem niedrigen

Geschwindigkeitsniveau Radfahrender (durchschnittlich 16 km/h bis 18 km/h) und einem hohen Radverkehrssicherheitsniveau in den Niederlanden hin. Zum Vergleich: Alrutz et al. (2015, S. 46) ermitteln durchschnittliche Geschwindigkeiten Radfahrender in Deutschland je nach Führungsform zwischen 17 km/h und 21 km/h (im Mittel 18,6 km/h).

Ruhender Verkehr

In Kapitel 4.1.3 konnte bereits gezeigt werden, dass Unfälle durch ruhenden Verkehr (Dooring-Unfälle und Unfälle mit ein- und ausparkenden Fahrzeugen) eine wesentliche Unfallkonstellation bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr darstellen. Nach Andersen et al. (2012, S. 75) können Parkbeschränkungen entsprechend zu einem Rückgang der Unfallrate von ca. 20% bis 25 % führen, auch wenn sich dadurch die gefahrenen Geschwindigkeiten der Kfz erhöhen können. Darüber hinaus können eine Reihe von Untersuchungen nachweisen, dass das Vorhandensein von ruhendem Verkehr einen unfallerhöhenden Einfluss hat (Aurich et al. 2015, S. 87; Ohm et al. 2015, S. 42 ff.; Richter 2019, S. 53; Teschke et al. 2014, S. 6). Allerdings können häufig keine Aussagen zum Zusammenhang verschiedener Führungsformen des Radverkehrs im Mischverkehr und dem ruhenden Verkehr getroffen werden:

Sowohl Alrutz (2009) als auch Schüller et al. (2020a) kommen zu dem Ergebnis, dass fehlende Sicherheitstrennstreifen (bei Schutzstreifen) einen Einfluss auf das Unfallgeschehen haben. Dabei wurden nach Alrutz (2009, S. 86) vor allem bei Sicherheitstrennstreifen von $< 0,75$ m deutlich mehr Unfälle registriert, als wenn der Sicherheitsraum im entsprechenden Maß dimensioniert ist. Schüller et al. (2020a, S. 92) kommen darüber hinaus zu dem Schluss, dass sich fehlende Sicherheitstrennstreifen vor allem in Verbindung mit engen Straßenräumen negativ auf das Radverkehrsunfallgeschehen auswirken.

Ohm et al. (2015, S. 42 ff.) ermitteln beim Vergleich von Streckenabschnitten mit Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen höhere Unfalldichten, wenn ruhender Verkehr zugelassen ist. Unterschiede zwischen den Radverkehrsführungsformen sind dabei ebenso nicht abzuleiten, wie zwischen den Aufstellungsarten (Längs- oder Schrägparken).

Richter (2019, S. 53) weisen für Streckenabschnitte mit Schutzstreifen und angrenzenden Parkständen höhere Unfalldichten und -raten nach, als ohne Anlagen für den ruhenden Verkehr. Eine Analyse hinsichtlich des Vorhandenseins von Sicherheitstrennstreifen erfolgte nicht.

Weitere infrastrukturelle Einflussgrößen

Neben der Radverkehrsführungsform, der Exposition, der Geschwindigkeit sowie dem ruhenden Verkehr wurden weitere infrastrukturelle Merkmale gefunden, die einen Einfluss auf das Radverkehrsunfallgeschehen auf Streckenabschnitten mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr haben können:

Wie in Kapitel 4.1.3 gezeigt wird, sind neben Unfällen mit ruhendem Verkehr vor allem Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle sowie Alleinunfälle von Radfahrenden auf Streckabschnitten mit Straßenbahngleisen relevante Unfallkonstellationen. Entsprechend haben sowohl fehlende Sichtbeziehungen an Anschlussknotenpunkten (Alrutz 2009, S. 114) sowie generell eine hohe Anzahl an Anschlussknotenpunkten, Einmündungen und Zufahrten (Alrutz et al. 2015, S. 60; Ohm et al. 2015, S. 41; Schüller et al. 2020b, S. 65) einen unfallerhöhenden Einfluss. Darüber hinaus kann in einer Vielzahl von Untersuchungen dem Vorhandensein von Straßenbahngleisen ein unfallerhöhender Einfluss nachgewiesen werden (Aurich et al. 2015, S. 87; Schober 2018, S. 84; Schüller et al. 2020b, S. 65; Teschke et al. 2016, S. 2).

Zudem kann den folgenden Merkmalen ein Einfluss auf das Radverkehrsunfallgeschehen nachgewiesen werden:

- mehr Unfälle mit zunehmender Umfeldnutzung/ Geschäftsbesatz (Alrutz et al. 2015, S. 60; Aurich et al. 2015, S. 87; Chen und Shen 2016, S. 244)
- weniger Unfälle mit zunehmender Breite der Schutzstreifen (Richter 2019, S. 53).
- weniger Unfälle mit zunehmender Fahrstreifenbreite bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen (Schüller et al. 2020b, S. 65).

4.2 Verhalten

4.2.1 Erkenntnisse im Überblick

Tab. 4-3 zeigt die Datengrundlagen (Untersuchungsgegenstand), methodische Aspekte (Stichprobe, Maß der seitlichen Abstände) sowie wesentliche Erkenntnisse zur Akzeptanz (Nutzung Radverkehrsführungsform) und den seitlichen Abständen (Abstände zum Fahrbahnrand/zu parkenden Kfz, Überholabstände) der analysierten Studien. Dabei wurden hinsichtlich der Akzeptanz die Radverkehrsführungsformen Mischverkehr (MV), Schutzstreifen (SSF), Piktogramme (Pikto), Radfahrstreifen und Radwege (RW) berücksichtigt, wenn diese in den Untersuchungen neben den Mischverkehrsführungen betrachtet werden. Hinsichtlich der seitlichen Abstände wird hingegen nur die Führungsformen auf der Fahrbahn berücksichtigt. Während die Anteile der Nutzung der Radverkehrsführungsform gut vergleichbar sind, da diese hinsichtlich der Erhebung eindeutig sind, ist bei der Interpretation der seitlichen Abstände folgendes zu berücksichtigen: Innerhalb der Untersuchungen wird zum Teil zwischen beeinflussten (seitliche Abstände zum Fahrbahnrand/parkenden Kfz bei Überholung/ Überholabstände bei Gegenverkehr) und unbeeinflussten (seitliche Abstände zum Fahrbahnrand oder parkenden Kfz ohne Überholung/ Überholabstände ohne Gegenverkehr) Überholungen unterschieden, zum Teil aber auch nicht. Für die Übersicht in Tab. 4-3 werden alle Werte je Untersuchung gemittelt. Darüber hinaus liegen den analysierten Untersuchungen grundsätzlich zwei Maße zur Bestimmung der seitlichen Abstände zu Grunde (vgl. Tab. 4-3, Spalte „Maß“): Der Abstand zwischen dem Rad des Fahrrades und dem des Kfz/ Fahrbahnrand, im Folgenden bezeichnet als „Rad-Rad“ oder der Abstand zwischen dem äußersten Punkt des Fahrrades (Lenker oder Schulter der Fahrenden) sowie der äußersten Kante der Kfz (Außenspiegel), im Folgenden bezeichnet als „Außenkanten“. Dabei entspricht das Maß „Außenkanten“ vereinfacht dem Maß „Rad-Rad“ abzüglich 0,5 m (halbe Lenkerbreite = ca. 0,35 m und Außenspiegel = ca. 0,15 m, vgl. Schüller et al. 2020b, S. 36). Ausführliche Erläuterungen zu Interaktionen, Akzeptanz, seitlichen Abständen und Geschwindigkeiten sind in den Kapiteln 4.2.2 bis 4.2.5 zu finden. Die wesentlichen Erkenntnisse zum Verkehrsverhalten können wie folgt zusammengefasst werden:

Typische Interaktionen zwischen Radfahrenden und Kfz-Führenden bei der Führung im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen ergeben sich (analog zum Unfallgeschehen, vgl. Kapitel 4.1.3) vorrangig mit ein- und abbiegenden, haltenden und ein- und ausparkenden Kfz sowie aufgrund von Dooing-Situationen (Alrutz 2009, S. 46 ff.; Kaulen et al. 2013, S. 42 ff.; Richter 2019, S. 64; Schüller et al. 2020a, S. 144). Für den Vergleich zwischen Mischverkehr mit und ohne Piktogramme ermitteln Koppers et al. (2021, S. 54) im nationalen Raum einen Rückgang der Konfliktraten nach Markierung von Piktogrammen sowohl auf der Fahrbahn als auch im Seitenraum. Im internationalen Raum wird der Einfluss von Piktogrammen vor allem auf das Überholverhalten (Verhältnis zwischen überholenden und hinterherfahrenden Kfz) untersucht. Dabei zeigt die Mehrzahl der Untersuchungen, dass nach der Markierung von Piktogrammen der Anteil der Kfz die hinter Radfahrenden fahren, anstatt zu überholen, zugenommen hat (Brady et al. 2010, S. 15; Knoflacher 2014, S. 29 ff.; La Vega 2011, S. 28 ff.; Mills et al. 2010, S. 14). Wenn überholt wird, dann wird häufiger ein Fahrstreifenwechsel vollzogen (Brady et al. 2010, S. 15; La Vega 2011, S. 30; Vasilev et al. 2017, S. 1102). Zudem hat sich gezeigt, dass Radfahrende auf Abschnitten mit Piktogrammen während eines Überholmanövers seltener nach rechts ausweichen (Brady et al. 2010, S. 16 ff.; Daff 2013, S. 29; Hunter et al. 2010, S. 73 ff.).

Der Vergleich der Akzeptanz (Anteil der Nutzung der Führungsform) zwischen Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen zeigt relativ eindeutig, dass bei Vorhandensein von Schutzstreifen seltener auf den Gehweg ausgewichen wird, als im reinen Mischverkehr (Alrutz 2009, S. 44; Dietiker et al. 2012, S. 69; Kaulen et al. 2013, S. 45 ff.; Ohm et al. 2015, S. 63). Auch der Markierung von Piktogrammen kann in der Mehrzahl der Untersuchungen ein positiver Einfluss auf die Akzeptanz nachgewiesen werden (Birk et al. 2004, S. 12; Furth et al. 2011, S. 10; Hunter et al. 2010, S. 50; Koppers et al. 2021, S. 43 ff.; Pein et al. 1999, S. 3). Vergleicht man allerdings die Werte zwischen den Untersuchungen (siehe Tab. 4-3), zeigen sich für die Führung im Mischverkehr mit und ohne Piktogramme vergleichbare Anteile, bei relativ starker Streuung. Auch innerhalb der Untersuchung von Schüller et al. (2020b, S. 53) zeigen Strecken mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen eine starke Streuung der Akzeptanz, so dass die Vermutung nahe liegt, dass weitere Merkmale als

die Radverkehrsführungsform einen Einfluss haben. Schüller et al. (2020b, S. 56) können der Verkehrsstärke des Radverkehrs (zunehmend), der Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs (abnehmend), der zulässigen Geschwindigkeit = 50 km/h (abnehmend), der Umfeldnutzung (abnehmend) und dem Schwerverkehrsanteil (abnehmend) einen signifikanten Einfluss auf die Akzeptanz nachweisen. Hinsichtlich des Linksfahrens (in falsche Richtung) von Radfahrenden auf dem Gehweg, ergibt sich ebenfalls eine starke Streuung der Werte zwischen unterschiedlichen Streckenabschnitten, wobei keine klare Tendenz zwischen unterschiedlichen Mischverkehrsführungen abzuleiten ist. Sowohl Schüller et al. (2020b, S. 56 ff.) (quantitativ) als auch Alrutz (2009, S. 31) (qualitativ) ermitteln Einflussfaktoren für das Linksfahren von Radfahrenden. Dabei zeigt sich u.a. für die Verkehrsstärke Rad (abnehmend), die Verkehrsstärke Kfz (zunehmend), den Anteil Geschäftsbesatz (zunehmend) sowie für Straßenseiten von denen wichtige/stark frequentierte Netzabschnitte abzweigen (zunehmend) einen Einfluss.

Hinsichtlich der seitlichen Abstände zum Fahrbahnrand bzw. zu parkenden Kfz zeigt sich, dass diese im Mischverkehr ohne Markierungen auch im unbeeinflussten Zustand (Rad wird nicht von Kfz überholt) durchaus in einem kritischen Bereich ($< 0,75$ m, „Dooring-Zone“) liegen (u.a. Apasnore et al. 2017, S. 145; Koppers et al. 2021, S. 46 ff.; Ohm et al. 2015, S. 64 ff.; Reichenbach und Affolter 2003, S. 48 ff.; Schüller et al. 2020b, S. 75 ff.), was auch die Auffälligkeit hinsichtlich von Dooring-Unfällen (vgl. Kapitel 4.1.3) erklärt. Zur Wirkung von Schutzstreifen ergibt sich keine eindeutige Tendenz. So können sich die seitlichen Abstände zum Fahrbahnrand/zu parkenden Kfz im Vergleich zum Mischverkehr ohne Schutzstreifen leicht erhöhen (Dietiker et al. 2012, S. 67; Ohm et al. 2015, S. 64 ff.), keinen Einfluss haben (Kaulen et al. 2013, S. 52 ff.; van Houten und Seiderman 2005, S. 6 ff.¹⁰), oder die Position der Radfahrenden ausschließlich im Überholfall stabilisieren (geringeres Ausweichen nach rechts; Zweibrücken und Känel 1999, S. 48 ff.). In den genannten Untersuchungen wird aber nicht erwähnt, ob Sicherheitstrennstreifen zu parkenden Kfz berücksichtigt werden, womit zum Einfluss dieses Merkmals keine Aussagen getroffen werden (können). Es zeigt sich aber eine Tendenz, wonach Schutzstreifen mit ausreichender Breite ($> 1,50$ m; Szeiler und Skoric 2017, S. 4) die Fahrlinie der Radfahrenden durchaus in einem sicheren Raum stabilisieren können, da sich die seitlichen Abstände zum Fahrbahnrand/zu parkenden Kfz im Überholfall auf Schutzstreifen nicht so stark reduzieren, im Vergleich zum Mischverkehr ohne Schutzstreifen. Zur Wirkung von Piktogrammen zeigt sich im nationalen Raum kein Einfluss (Koppers et al. 2021, S. 46 ff.) und im internationalen Raum ein ausnahmslos erhöhender Einfluss auf die seitlichen Abstände zum Fahrbahnrand oder zum ruhenden Verkehr (Knoflacher 2014, S. 27; Birk et al. 2004, S. 10; Brady et al. 2010, S. 16 ff.; Daff 2013, S. 24 ff.; Furth et al. 2011, S. 10 ff.; Hunter et al. 2010, S. 73 ff.; Mills et al. 2010, S. 14 ff.; Pein et al. 1999, S. 4; Sando et al. 2014, S. 49 ff.). Im Mittel sind die seitlichen Abstände mit Piktogrammen etwa 0,1 m (beeinflusster Zustand) und 0,2 m (unbeeinflusster Zustand) größer, im Vergleich zum Mischverkehr ohne Piktogramme, wobei dies auch in Abhängigkeit zur Position der Piktogramme auf dem Fahrstreifen steht (u.a. Knoflacher 2014, S. 32; Hunter et al. 2010, S. 73 ff.).

Die mittleren seitlichen Überholabstände im Mischverkehr ohne Markierung weisen je nach untersuchten Abschnitten eine große Bandbreite auf (ca. 1,2 m bis 2,3 m; Apasnore et al. 2017, S. 145; Schüller et al. 2020b, S. 79 ff.), was zeigt, dass die Überholabstände von weiteren Merkmalen (u.a. Fahrbahnbreite, Geschwindigkeiten, parkenden Kfz, Position der Radfahrenden auf dem Fahrstreifen) abhängig sind (Apasnore et al. 2017, S. 146; Walker 2007, S. 420). Reichenbach und Affolter (2003, S. 46) weisen insbesondere für Abschnitte mit Fahrbahnbreiten zwischen 6,30 m und 6,50 m höhere Anteile von kritischen Überholungen nach (vgl. Kapitel 3.1). Der Vergleich zwischen Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen ergibt, dass sich die Überholabstände mit Schutzstreifen eher reduzieren (Dietiker et al. 2012, S. 67; Huemer et al. 2018, S. 10; Ohm et al. 2015, S. 63; Kaulen et al. 2013, S. 48 ff.; Langer 2016, S. 77; Zweibrücken und Känel 1999, S. 54 ff.). Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass sich Kfz-Führende an der Markierung orientieren und Schutzstreifen eine Separierung suggerieren, so dass das Verhalten weniger aufeinander angepasst wird.

¹⁰ Untersuchung von 1,50 m breiten Radfahrstreifen.

Tab. 4-3 Datengrundlagen, methodische Aspekte und wesentliche Erkenntnisse der analysierten Studien zum Verhalten

Studie	Untersuchungsraum	Untersuchungsgegenstand	Stichprobe	Anteil Nutzung Radverkehrsführungsform [%]					mittlere seitliche Abstände [m] (ungefähre Werte ¹¹)										
				MV	SSF	Pikto	RFS	RW	Maß	Fahrbahnrand/parkende Kfz				Überholen Kfz-Rad					
										MV	SSF	Pikto	RFS	MV	SSF	Pikto	RFS		
Alrutz (2009)r	Deutschland (verschiedene Städte)	18 Strecken verschiedene Führungsformen	Verfolgungsfahrten: 1.393 Rf		97		98	96											
Alrutz et al. (2015)	Deutschland (verschiedene Städte)	165 Strecken (ca. 90 km) verschiedene Führungsformen	Videomessungen: Akzeptanz: 108.677 Rf Geschwindigkeit: ca. 19.000 Rf	93	92		93	92											
Apasnore et al. (2017)	Ottawa, Kanada	6 Strecken Mischverkehr	Videomessungen: 563 Überholungen						Außenkanten					Ermittlung von Einflussgrößen					
Birk et al. (2004)	San Francisco, USA	6 Strecken Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Videomessungen: Vorher: 1.100 Rf; 1.000 Kfz Nachher: 1.300 Rf; 1.400 Kfz	93		95			Rad-Rad	1,0		1,2	0,8		1,4				
Brady et al. (2010)	Austin, USA	3 Strecken (4-streifig) Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Videomessungen: Vorher: 857 Überholungen Nachher: 541 Überholungen	Keine Differenzierung zwischen Aus- weichen auf den Gehweg und Aus- weichen auf freie Parkplätze					Rad-Rad	1,0		1,1							
Chuang et al. (2013)	Taoyuan, Taiwan	Straßennetz Taoyuan	Naturalistic-Cycling-Study: 34 Rf						Rad-Rad				1,6				1,6		
Daff (2013)	Melbourne, Australien	3 Strecken Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Videomessungen: Vorher: 466 Rf Nachher: 469 Rf						Rad-Rad	1,0		1,1							
Debnath et al. (2018)	Queensland, Australien (verschiedene Städte)	15 Strecken Verschiedene Führungsformen	Videomessungen: 1.846 Überholungen						Außenkanten				1,8				1,9		
													Ermittlung von Einflussgrößen						
Dietiker et al. (2012)	Schweiz (verschiedene Städte)	13 Strecken Vorher: Mischverkehr Nachher: Schutzstreifen	Videomessungen: keine Angabe	73	80				Rad-Rad	0,6	0,7		1,7	1,7					
Furth et al. (2011)	Salt Lake City, Long Beach und Brookline, USA	3 Strecken (2 x 4-streifig) Vorher: Mischverkehr Nachher: grüner Streifen mit Piktogrammen; Piktogramme mit gepunkteten Linien	Videomessungen: Vorher: 2.207 Rf Nachher: 2.730 Rf	57		65			k.A.	1,2		1,4							
Harkey und Stewart (1997)	Florida, USA	13 Strecken (3 außerorts) Mischverkehr und Radfahrstreifen	Videomessungen: 1.583 Interaktionen						Rad-Rad	0,3			0,7	1,4				1,2	
Huemer et al. (2018)	Deutschland	fiktive Strecken verschiedene Führungsformen	Simulationsstudie: 60 Proband*innen 1.440 Überholungen						k.A.				2,1	1,2				1,2	
Hunter et al. (2010), Fitzpatrick et al. (2011)	Cambridge, Chapel Hill und Seattle, USA	3 Strecken (1 x 4-streifig) Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Videomessungen: Vorher 1.374 Rf Nachher: 1.396 Rf	59		84			Rad-Rad	1,1		1,1	1,9		1,9				

¹¹ Es werden stets mittlere Werte zwischen beeinflussten (seitliche Abstände zum Fahrbahnrand/parkenden Kfz bei Überholung/ Überholabstände bei Gegenverkehr) und unbeeinflussten Situationen (seitliche Abstände zum Fahrbahnrand oder parkenden Kfz ohne Überholung/ Überholabstände ohne Gegenverkehr) angegeben, da nicht in allen Studien nach den beschriebenen Situationen differenziert wird. Zudem sind Werte zum Teil aus Diagrammen entnommen. Alle Werte wurden auf eine Dezimalstelle gerundet. Weitere Informationen sind den Kapiteln 4.2.3 und 4.2.4 zu entnehmen.

Studie	Untersuchungsraum	Untersuchungsgegenstand	Stichprobe	Anteil Nutzung Radverkehrsführungsform [%]					mittlere seitliche Abstände [m] (ungefähre Werte ¹¹)								
				MV	SSF	Pikto	RFS	RW	Maß	Fahrbahnrand/parkende Kfz				Überholen Kfz-Rad			
										MV	SSF	Pikto	RFS	MV	SSF	Pikto	RFS
Kaulen et al. (2013)	Deutschland (verschiedene Städte)	10 Streckenabschnitte Vorher: Mischverkehr Nachher: Schutzstreifen	Videomessungen: Vorher: 1.836 Rf Nachher: 1.687 Rf	34	42 ¹²				k.A.	0,7	0,7			1,3	1,2		
Knoflacher (2014)	Wien, Österreich	3 Strecken Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Videomessungen: Vorher: 1.460 Rf Nachher: 870 Rf						Rad-Rad	0,7		0,9		0,9		1,0	
Koppers et al. (2021)	Deutschland (verschiedene Städte 9)	14 Strecken Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Akzeptanz: k.A. Geschwindigkeit: k.A. seitliche Abstände: 6.082 Rf 3.193 Überholungen	50		60			Rad-Rad	0,7		0,7		1,0		1,1	
LaMondia und Duthie (2012)	Austin, USA	4 Strecken Piktogramme und hinweisende Beschilderung	Videomessungen: 673 Interaktionen						Rad-Rad	Ermittlung von Einflussgrößen							
La Vega (2011)	Los Angeles, USA	6 Strecken Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Videomessungen: 900 Interaktionen						Rad-Rad					Ref.		+0,1	
Langer (2016)	Dresden, Deutschland	5 Strecken Schutzstreifen	Messfahrten: 1.464 Überholungen						Außenkanten					1,4	1,2		
										Ermittlung von Einflussgrößen							
Love et al. (2012)	Baltimore, USA	Straßennetz Baltimore	Naturalistic-cycling-study: 5 Rf, 2 Monate, ca. 11 h, 586 Überholungen						Außenkanten					Ref.		+	++
Mehta et al. (2015)	Ontario, Kanada	2- und 4-streifige Strecken Mischverkehr und Radfahrstreifen	Messfahrten: 5.227 Überholungen						Außenkanten					1,3			1,5
Mills et al. (2010)	Austin, USA	2 Strecken (4-streifig) Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Videomessungen: Vorher: 288 Überholungen Nachher: 428 Überholungen	60		45			Rad-Rad	0,8		0,9		1,9		2,4	
Ohm et al. (2015)	Deutschland (verschiedene Städte)	40 Strecken Mischverkehr und Schutzstreifen	Videomessungen ca. 6.500 Rf 566 Überholungen	89	96				Rad-Rad	0,8	1,0			1,0	0,9		
Parkin und Meyers (2010)	Lancashire, Großbritannien (verschiedene Städte)	6 Strecken Mischverkehr und Radfahrstreifen	Messfahrten: 671 Überholungen						Rad-Rad					1,5			1,3
Pein et al. (1999)	Gainesville, USA	4 Strecken (entlang eines Straßenzuges) Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Videomessungen: Vorher: 913 Rf Nachher: 466 Rf	39		45			k.A.	0,5		0,6		1,8		1,9	
Reichenbach und Affolter (2003)	Schweiz (verschiedene Städte)	26 Streckenabschnitte (19 innerorts) Mischverkehr	Videomessungen: k.A.						Rad-Rad	0,6							
Richter (2019)	Deutschland (verschiedene Städte)	86 Strecken (32 km) Schutzstreifen und Radfahrstreifen	Videomessungen: 43.775 Rf						Außenkanten					Ref.			+

¹² Ein- und beidseitige Schutzstreifen

Studie	Untersuchungsraum	Untersuchungsgegenstand	Stichprobe	Anteil Nutzung Radverkehrsführungsform [%]					mittlere seitliche Abstände [m] (ungefähre Werte ¹¹)								
				MV	SSF	Pikto	RFS	RW	Maß	Fahrbahnrand/parkende Kfz				Überholen Kfz-Rad			
										MV	SSF	Pikto	RFS	MV	SSF	Pikto	RFS
Sando et al. (2014)	Florida, USA (verschiedene Städte)	6 Strecken Vorher: u.a. Mischverkehr Nachher: u.a. Piktogramme und Radfahrstreifen	Videomessungen: Vorher: 976 Rf Nachher: 492 Rf						Außenkanten	0,7		1,0	0,8	1,3		1,6	1,9
Schüller et al. (2020b)	Deutschland (verschiedene Städte)	20 Strecken Mischverkehr	Messfahrten und Videomessungen: Akzeptanz: 38.535 Rf, 2.528 Überholungen, 2.319 Abstände zum Fahrbahnrand	84					Außenkanten	0,5				1,7			
				Ermittlung von Einflussgrößen													
Shackel und Parkin (2014)	Liverpool, Großbritannien	Straßennetz Liverpool Mischverkehr und Radfahrstreifen	Messfahrten: 500 Überholungen						Rad-Rad					1,7			1,6
Szeiler und Skoric (2017)	Österreich (verschiedene Städte)	10 Streckenabschnitte Mischverkehr und Schutzstreifen	Videomessungen: 300 h Videomaterial						Außenkanten	qualitative Auswertung				qualitative Auswertung			
van Houten und Seiderman (2005)	Cambridge, USA	4 Strecken (entlang eines Straßenzuges) Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme und Radfahrstreifen	Videomessungen: ca. 4.500 Rf ca. 4.500 Kfz						Außenkanten	0,2		0,2	0,2				
Vasilev et al. (2017)	Levanger, Norwegen	1 Strecke Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme (+ weitere Maßnahmen)	Videomessungen: Vorher: 250 Rf Nachher: 1.517 Rf	68		66											
Walker (2007)	Salisbury und Bristol, Großbritannien	Straßennetz Salisbury und Bristol	Messfahrten: 320 km						Rad-Rad					Ermittlung von Einflussgrößen			

Piktogrammen wird im Vergleich zum Mischverkehr ohne Markierung nahezu ausnahmslos ein erhöhender Einfluss auf die seitlichen Überholabstände nachgewiesen (Birk et al. 2004, S. 10; Hunter et al. 2010, S. 73 ff.; Knoflacher 2014, S. 31; Koppers et al. 2021, S. 50; La Vega 2011, S. 24 ff.; Mills et al. 2010, S. 16; Pein et al. 1999, S. 5; Sando et al. 2014, S. 49). Dabei nahmen die Überholabstände mit Markierung von Piktogrammen im Mittel zwischen 0,1 m und 0,6 m zu.

Hinsichtlich der Geschwindigkeiten der Kfz kann abgeleitet werden, dass sowohl Schutzstreifen (Dietiker et al. 2012, S. 65; Kaulen et al. 2013, S. 41; Ohm et al. 2015, S. 66; Zweibrücken und Känel 1999, S. 47) als auch Piktogramme (Hunter et al. 2010, S. 73 ff.; Koppers et al. 2021, S. 42) einen leicht reduzierenden Einfluss auf das Geschwindigkeitsniveau haben. Der Fahrbahnbreite kann bei Mischverkehr ohne Markierung kein Einfluss auf das Kfz-Geschwindigkeitsniveau nachgewiesen werden (Reichenbach und Affolter 2003, S. 50, Schüller et al. 2020b, S. 74 ff.).

4.2.2 Interaktionen

Um Tendenzen zum verkehrssicherheitsrelevanten Verhalten abzuleiten, werden zusätzlich zur oder auch ersatzweise für die Analyse des Unfallgeschehens Verhaltensanalysen zu Interaktionen oder Konflikten durchgeführt. Dabei kommen sowohl Naturalistic Cycling Studies¹³ oder Vor-Ort-Beobachtungen definierter Abschnitte mit Hilfe von Kameras zur Anwendung.

Insbesondere die Naturalistic Cycling Studies liefern dabei einen Überblick über die relevanten Interaktionen Radfahrender, auch wenn Mischverkehrsführungen nur mittelbar berücksichtigt werden: Dabei kommen Johnson et al. (2010, S. 5) in Melbourne (Australien) und Werneke et al. (2015, S. 204) in Gothenburg (Schweden) zu dem Ergebnis, dass sich die Mehrzahl der Interaktionen zwischen Radfahrenden und Kfz an Knotenpunkten ereignet. Ein Ergebnis, das sich auch im Unfallgeschehen widerspiegelt (vgl. Kapitel 4.1.3). Darüber hinaus sind die Verursachenden in der Mehrzahl Kfz-Führende. Interessant dabei erscheint ein Ergebnis von Werneke et al. (2015, S. 204), wonach sich 90 % der Konflikte zwischen Radfahrenden und Kfz an Knotenpunkten mit Radfahrenden ereignen, die in der Annäherung vor Knotenpunkten auf dem Radweg fahren. Als Gründe werden Sichtverdeckungen (bspw. durch Gebäude und Bepflanzung) sowie eine ziemlich hohe Geschwindigkeit der Radfahrenden selbst (subjektive Einschätzung) genannt. Johnson et al. (2010, S. 5) differenzieren in ihrer Studie, welche in Melbourne (Australien) stattfand, zusätzlich nach konkreten Konstellationen, wobei sich gezeigt hat, dass die meisten Interaktionen beim Wechsel von Kfz auf den linken Fahrstreifen (40,7 %), zwischen linksabbiegenden Kfz und geradeausfahrenden Radfahrenden (16,6 %), bei Kreuzen Situationen (3,7 %) und zwischen Radfahrenden und öffnenden Kfz-Türen (Dooring, 3,7%) registriert werden. Schleinitz et al. (2014, S. 93) untersuchen den Einfluss der zunehmend genutzten Elektrofahrräder (E-Bikes oder Pedelecs) auf das sicherheitsrelevante Verhalten, wobei keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit von Konflikten festgestellt werden.

Einen unmittelbaren Mischverkehrsbezug stellen hingegen die Vor-Ort-Beobachtungen her. Dabei liegen im nationalen Raum, mit Ausnahme von Koppers et al. (2021), vor allem Erkenntnisse zu Strecken mit und ohne Schutzstreifen vor. Im Ergebnis ergeben sich kritische Situationen vorrangig mit ein- und abbiegenden, haltenden, ein- und ausparkenden Kfz sowie aufgrund von Dooring-Situationen (Alrutz 2009, S. 46 ff.; Kaulen et al. 2013, S. 42 ff.; Richter 2019, S. 64; Schüller et al. 2020a, S. 144). Deutliche Unterschiede zwischen den Radverkehrsführungsformen können dabei nicht ermittelt werden. Lediglich Kaulen et al. (2013) identifizieren die Mehrheit der Gefahrenstellen in der Nutzung des Seitenraums durch Radfahrende, welche durch eine mit Schutzstreifen gesicherte Führung reduziert werden könnten.

Schüller et al. (2020b, S. 76 ff.) untersuchen qualitativ Interaktionen zwischen Radfahrenden im Mischverkehr (ohne Markierung) und parkenden Fahrzeugen mit dem Ergebnis, dass Interaktionen vor allem mit ein- und ausparkenden Fahrzeugen sowie ein- und aussteigenden Kfz-Führenden entstehen. Innerhalb der Interaktionen versuchen

¹³ Dabei werden Radfahrende über einen definierten Zeitraum bei täglichen Fahrten beobachtet.

Radfahrende den Einfluss so gering wie möglich zu halten, indem sie eher seitlich ausweichen als dass die Geschwindigkeit reduziert wird.

Koppers et al. (2021, S. 54) untersuchen auf Basis eines Vorher-Nachher-Vergleiches die Wirkung von Piktogrammen und Hinweisbeschilderung auf 14 Streckenabschnitten. Dabei zeigt sich, dass die Konfliktrate sowohl auf der Fahrbahn als auch im Seitenraum nach Markierung der Piktogramme bzw. der Installation der Hinweisbeschilderung abnimmt, obwohl im Nachher-Zeitraum anteilig mehr Radfahrende auf der Fahrbahn fuhren (vgl. 4.2.3).

Im internationalen Raum wird die Wirkung von Piktogrammen auf der Fahrbahn und Hinweisbeschilderung vorrangig hinsichtlich des Verhältnisses zwischen überholenden und hinterherfahrenden Kfz sowie hinsichtlich von Ausweichmanövern Radfahrender beim Überholvorgang untersucht (Brady et al. 2010; Daff 2013; Hunter et al. 2010; Knoflacher 2014; La Vega 2011; LaMondia und Duthie 2012; Mills et al. 2010; Vasilev et al. 2017). Weitere Interaktions- oder Konfliktsanalysen, ähnlich wie sie im nationalen Raum durchgeführt werden, kommen kaum zur Anwendung. Die Mehrzahl der Untersuchungen stützen sich auf messbare Indikatoren wie die Akzeptanz (vgl. Kapitel 4.2.3) oder seitliche Abstände zum Fahrbahnrand, parkenden oder überholenden Kraftfahrzeugen (vgl. Kapitel 4.2.4).

Brady et al. (2010, S. 15), Knoflacher (2014, S. 29 ff.), La Vega (2011, S. 28 ff.) und Mills et al. (2010, S. 14) stellen bei Vorher-Nachher-Untersuchungen von zweistreifigen Strecken mit und ohne Piktogrammen auf der Fahrbahn fest, dass der Anteil von Kfz, die hinter Radfahrenden fahren anstatt zu überholen, nach der Markierung der Piktogramme zugenommen hat. Auch auf vierstreifigen Streckenabschnitten konnte dieser Effekt beobachtet werden – wenn überholt wurde, dann wurde ein Wechsel des Fahrstreifens vorgezogen (Brady et al. 2010, S. 15 ff., La Vega 2011, S. 30). Darüber hinaus konnten La Vega (2011, S. 28 ff.) einen signifikanten Rückgang von Hupen und anderen aggressiven Verhaltensweisen nach der Markierung der Piktogramme feststellen. Vasilev et al. (2017, S. 1102) kommen in einem Vorher-Nachher-Vergleich eines zweistreifigen Streckenabschnittes in Levanger (Norwegen) auf ein ähnliches Ergebnis: Die Überholvorgänge ohne Fahrstreifenwechsel haben nach Markierung von Piktogrammen von 38 % (n = 8) auf 3% (n = 3) abgenommen und es konnte beobachtet werden, dass mehr Kfz den Radfahrenden folgten (Anstieg von 19 % auf 56 %), ohne zu überholen – dabei ist die Aussagekraft neben der geringen Stichprobe vor allem dadurch eingeschränkt, da neben der Markierung von Piktogrammen weitere bauliche Maßnahmen (u.a. Reduzierung der Fahrbahnbreite) durchgeführt wurden und die Verkehrsstärke im Nachher-Zeitraum deutlich höher im Vergleich zum Vorher-Zeitraum ist.

LaMondia und Duthie (2012, S. 86 ff.) untersuchen ebenfalls auf Basis einer Vorher-Nachher Untersuchung in Austin (USA) die Wirkung von Piktogrammen und Hinweisbeschilderung auf 4 vierstreifigen Streckenabschnitten und können hingegen nur der Hinweisbeschilderung einen (reduzierenden) Einfluss auf die Zahl der Interaktionen zwischen Kfz und Radfahrenden nachweisen – die Markierung von Piktogrammen führt hingegen zu keiner Verhaltensänderung. Weitere Einflussfaktoren waren die Fahrstreifenbreite (mit zunehmender Fahrstreifenbreite weniger Interaktionen) sowie die zulässige Geschwindigkeit (mit zunehmender Geschwindigkeit zunehmende Zahl an Interaktionen). Daff (2013, S. 29) können auf Basis einer Vorher-Nachher-Untersuchung von 3 Streckenabschnitten in Melbourne (Australien) der Markierung von Piktogrammen auch keinen Einfluss auf das Verhältnis zwischen Kfz, die überholen und Kfz, die hinter Radfahrenden fahren, ableiten.

Hinsichtlich des Ausweichverhaltens von Radfahrenden können Brady et al. (2010, S. 16 ff.) und Hunter et al. (2010, S. 73 ff.) nach der Markierung von Piktogrammen feststellen, dass Radfahrende während eines Überholmanövers seltener ausweichen. Auch Daff (2013, S. 29) ermitteln einen Rückgang der Interaktionen, bei denen Radfahrende ihr Verhalten anpassen mussten. Mills et al. (2010, S. 18) verzeichnen hingegen einen Anstieg dieser Ereignisse.

Chuang et al. (2013, S. 38) stellen auf Basis einer Naturalistic-Cycling-Study in Taoyuan (Taiwan) fest, dass Radfahrende bei Vorhandensein eines Radfahrstreifens deutlich weniger Ausweichmanöver beim Überholvorgang durchführen (schneller werden, nach rechts ausweichen), als im Mischverkehr.

4.2.3 Akzeptanz

Nutzung Radverkehrsführungsform

Die Akzeptanz der Radverkehrsführungsform ist neben der objektiven und subjektiven Verkehrssicherheit ein Maß für die Attraktivität und Nutzbarkeit entsprechender Anlagen. In diesem Zusammenhang sind Unfälle von Radfahrenden auf dem Gehweg (insbesondere Einbiegen-Kreuzen-Unfälle an Grundstückzufahrten) vor allem bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr von Relevanz (vgl. Kapitel 4.1.3).

Bild 4-1 zeigt zur Einordnung die in der Literatur gefundenen Anteile der Radfahrenden, die die entsprechende Radverkehrsführung nutzen, differenziert nach unterschiedlichen Radverkehrsführungsformen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass je nach Untersuchung sowohl zwei- als auch vierstreifige Streckenabschnitte untersucht werden. Zudem enthält die Betrachtung der Piktogramme mit Ausnahme von Koppers et al. (2021) (Deutschland) und Vasilev et al. (2017) (Norwegen) ausschließlich Studien aus den USA. Es ist zusammenfassend festzustellen, dass der mittlere Anteil der Fahrbahnnutzung durch Radfahrende im Mischverkehr mit und ohne Piktogramme deutlich unter dem auf Strecken mit Schutz- und Radfahrstreifen liegt. Darüber hinaus weisen Strecken mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Piktogramme oder Schutzstreifen eine deutliche höhere Streuung im Vergleich zu Radfahrstreifen und Radwegen auf. Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass die starke Streuung im Bereich der Schutzstreifen vor allem durch die Ergebnisse von Kaulen et al. (2013, S. 45 ff.) beeinflusst sind, welche zum einen auch einseitige Schutzstreifen betrachten und zum anderen die mit Abstand geringsten Anteile der Nutzung von Schutzstreifen ermitteln. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen differenziert dargestellt.

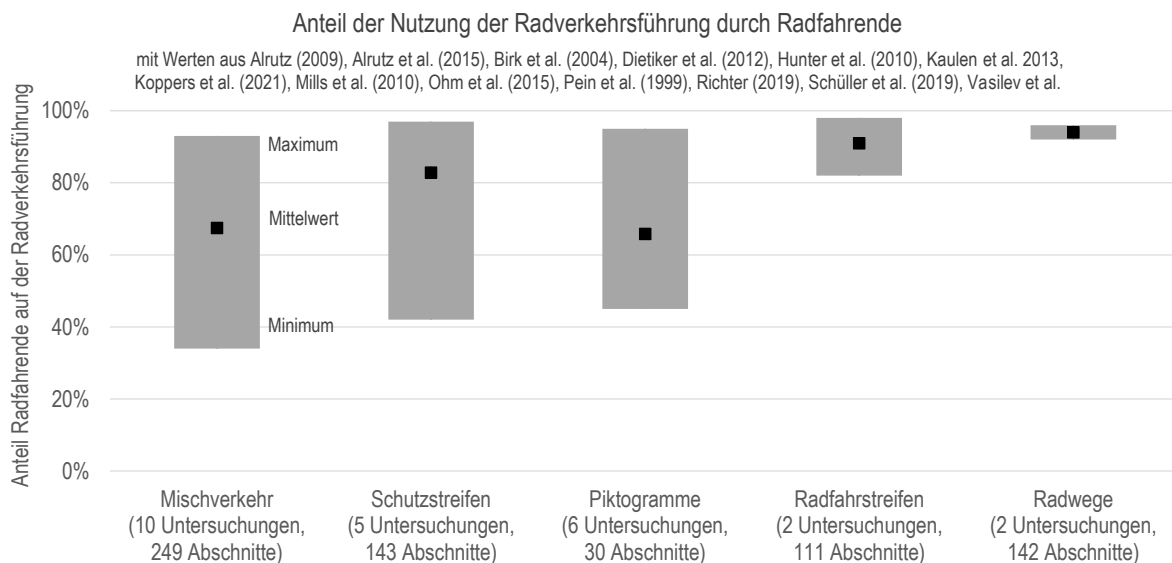


Bild 4-1 Anteil der Nutzung der Radverkehrsführung durch Radfahrende aus verschiedenen Quellen im Überblick

Die Erkenntnisse zur Akzeptanz des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen im nationalen Raum zeigen je nach Untersuchung eine relativ große Bandbreite¹⁴. So weisen Alrutz (2009, S. 44) der Führung mit Schutzstreifen (95% bis 99%) und Alrutz et al. (2015, S. 90) der Führung mit (92 %) und ohne Schutzstreifen (93 %) eine sehr hohe Akzeptanz nach – vergleichbar mit derer von Radfahrstreifen und Radwegen.

¹⁴ Bei der Interpretation der Ergebnisse im nationalen Raum ist zu berücksichtigen, dass nach § 2 Absatz 5 StVO Kinder bis zum vollendeten achten Lebensjahr mit Fahrrädern die Gehwege befahren müssen und bis zum vollendeten zehnten Lebensjahr benutzen dürfen. Kinder bis zum vollendeten achten Lebensjahr dürfen dabei von einer Aufsichtsperson mit dem Fahrrad auf dem Gehweg begleitet werden (vgl. Kapitel 2).

Richter (2019, S. 62) weisen hingegen der Führung mit Schutzstreifen (88 % bis 91 %) eine höhere Akzeptanz im Vergleich zu Radfahrstreifen (80 % bis 86 %) nach. Interessant ist dabei, dass die Akzeptanz mit zunehmender Breite der Schutzstreifen zunimmt.

Ohm et al. (2015, S. 63) weisen wiederum der Führung mit Schutzstreifen (94 % bis 98 %) eine höhere Akzeptanz nach, als Mischverkehr ohne Markierung (84 % bis 93 %). Neben der Breite der Schutzstreifen wird dabei (zumindest qualitativ) die Kfz-Verkehrsstärke als Einflussgröße erkannt, wobei die Akzeptanz mit abnehmender Kfz-Verkehrsstärke steigt.

Auch nach Kaulen et al. (2013, S. 45 ff.) kann die Akzeptanz der Radverkehrsführung auf der Fahrbahn durch Schutzstreifen um etwa 3 bis 14 % gesteigert werden. Bei beidseitigen Schutzstreifen ist dieser Effekt im Vergleich zur einseitigen oder alternierenden Variante größer.

Dietiker et al. (2012, S. 69) kamen in der Schweiz ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die Akzeptanz mit Schutzstreifen erhöht werden kann (von im Mittel 73 % auf 80 %).

Schüller et al. (2020b, S. 53) ermitteln für Strecken mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen oder Piktogramme einen Anteil der Fahrbahnnutzung zwischen 50 % und 95 %. Im Mittel über alle Streckenabschnitte ergibt sich ein Wert von 84 %. Aufgrund dieser großen Bandbreite liegt die Vermutung nahe, dass weitere Merkmale einen Einfluss auf die Akzeptanz besitzen. Schüller et al. (2020b, S. 56) erstellen auf Basis einer linearen Mehrfachregression (Voraussetzung: die Akzeptanz wurde als normal-verteilt angenommen) ein Akzeptanz-Modell, wobei der Radverkehrsstärke (zunehmend), der Kfz-Verkehrsstärke (abnehmend), der zulässigen Geschwindigkeit = 50 km/h (abnehmend), der Umfeldnutzung (abnehmend) und dem Schwerverkehrsanteil (abnehmend) ein signifikanter Einfluss auf die Akzeptanz nachgewiesen werden kann.

Auch Zweibrücken und Känel (1999, S. 62) erkennen qualitativ Einflüsse auf die Akzeptanz des Mischverkehrs: So können eine hohe Verkehrsbelastung im motorisierten Verkehr, eine geringe Breite der Schutzstreifen, ruhender Verkehr am Fahrbahnrand, eine geringe Fußverkehrsstärke sowie häufiger Schüler*innenverkehr die Akzeptanz reduzieren.

Die Auswirkungen von Piktogrammen auf der Fahrbahn und Hinweisbeschilderung im nationalen Raum untersuchen Koppers et al. (2021, S. 43 ff.). Im Ergebnis zeigt sich, dass der Anteil der Fahrbahnnutzung auf Strecken mit Mischverkehrsführung im Mittel ca. 50% und nach Umsetzung der Piktogrammketten im Mittel ca. 60% beträgt.

Im internationalen Raum zeigen sich durchaus unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Akzeptanz von Piktogrammen. So weisen

- Birk et al. (2004, S. 12) eine geringe Erhöhung bei ohnehin schon hoher Akzeptanz (von 93,5 % auf 95,8 %) auf zweistreifigen Straßen,
- Pein et al. (1999, S. 3) eine Erhöhung (von 39% auf 45 %) auf zweistreifigen Straßen sowie
- Hunter et al. (2010, S. 50) eine signifikante Erhöhung (von 59 % auf 84%) auf einem vierstreifigen Abschnitt

der Akzeptanz mit der Markierung von Piktogrammen nach. Auch Furth et al. (2011, S. 10) können der Markierung von Piktogrammen einen positiven Einfluss auf die Akzeptanz nachweisen, allerdings sind die Ergebnisse nur teilweise vergleichbar, da die Piktogrammketten auf einem grünen (Radfahr-) Streifen aufgebracht wurden.

Hingegen können Mills et al. (2010, S. 17 ff.) und Vasilev et al. (2017, S. 1101) keine Wirkung der Piktogramme auf die Akzeptanz nachweisen. Vasilev et al. (2017, S. 1101) führt dieses Ergebnis allerdings auf eine Schule in der Nähe zurück (vgl. Zweibrücken und Känel 1999, S. 62). Eine differenzierte Bewertung der Akzeptanz nach Altersgruppen zeigt, dass der Anteil der Fahrbahnnutzung bei den > 25-jährigen von 52 % auf 77 % gestiegen ist (Vasilev et al. 2017, S. 1101).

Die Untersuchung von Brady et al. (2010) ist auf Grund der gewählten Methodik schwieriger zu bewerten. Die Gehwegnutzung wird nicht separat dokumentiert, sondern als Ausweichmanöver gemeinsam mit dem Ausweichen

auf freie Parkplätze am Fahrbahnrand bewertet (Brady et al. 2010, S. 16 ff.). Dabei zeigt sich, dass die Ausweichmanöver von Radfahrenden mit Markierung von Piktogrammen im Mittel um etwa 4 % reduziert werden können.

Linksfahren

Neben der Akzeptanz als Anteil der Radfahrenden, die die Fahrbahn nutzen, birgt auch das Linksfahren (in falscher Richtung) von Radfahrenden auf dem Gehweg ein gewisses Gefahrenpotential (Ohm et al. 2015, S. 49 ff.).

Alrutz (2009, S. 27) ermitteln Anteile von im Mittel von etwa 7 % auf Streckenabschnitten mit Schutzstreifen. Diese Werte liegen unter denen von Strecken mit Radfahrstreifen (ca. 10 %) und mit Radwegen (ca. 20 %). Alrutz et al. (2015, S. 82) kommen auf ähnliche Ergebnisse: So liegen die Anteile auf Strecken mit Schutzstreifen bei 6 % und ohne Schutzstreifen bei 9 %. Beide Werte liegen deutlich unter denen von Radwegen (12 % bis 15 %) und sind mit denen von Radfahrstreifen (7 %) vergleichbar.

Schüller et al. (2020b, S. 54 ff.) ermitteln für Strecken mit Mischverkehr ohne Markierung Anteile von linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg von im Mittel 8 %, während Koppers et al. (2021, S. 45 ff.) zeigen, dass die Nutzung linker Gehwege durch Radfahrende nach der Markierung von Piktogrammen auf der Fahrbahn um im Mittel 13 % gesenkt werden konnte.

Allerdings zeigen die Erhebungen von Alrutz (2009, S. 27), Schüller et al. (2020b, S. 54 ff.) und Koppers et al. (2021, S. 45 ff.) auch, dass eine relativ große Streuung der Werte zwischen den Untersuchungsstrecken vorliegt, was die Vermutung nahe legt, dass neben der Führungsform weitere Merkmale den Anteil linksfahrender Radfahrender beeinflusst. Schüller et al. (2020b, S. 56 ff.) ermitteln auf Basis einer linearen Mehrfachregression die folgenden Einflussgrößen für das Linksfahren von Radfahrenden auf dem Gehweg: Radverkehrsstärke (abnehmend), Kfz-Verkehrsstärke (zunehmend), Anteil Geschäftsbesatz (zunehmend), beidseits parkende Fahrzeuge (abnehmend). Alrutz (2009, S. 31) ermitteln auf Basis einer qualitativen Analyse, dass das Befahren linker Gehwege vor allem auf Straßenseiten,

- die Radfahrenden Umwege ersparen,
- von denen wichtige bzw. stark frequentierte Netzabschnitte abzweigen und
- auf denen sich wichtige punktuelle Zielpunkte (bspw. Einzelhandel) befinden,

beobachtet werden kann.

Im internationalen Raum, wo vor allem die Wirkung von Piktogrammen auf der Fahrbahn untersucht wird, zeigen sich wiederum unterschiedliche Ergebnisse. Während Brady et al. (2010, S. 19 ff.), Hunter et al. (2010, S. 51 ff.) und Pein et al. (1999, S. 3) eine Abnahme von linksfahrenden Radfahrenden nach Markierung von Piktogrammen verzeichnen, können Birk et al. (2004, S. 11 ff.) und Mills et al. (2010, S. 17 ff.) keine Veränderungen ableiten.

4.2.4 Seitliche Abstände

Dieses Kapitel umfasst sowohl die seitlichen Überholabstände zwischen Radfahrenden und Kfz als auch die Abstände der Radfahrenden zum Fahrbahnrand bzw. zu parkenden Fahrzeugen. Während die Abstände zu parkenden Kfz am Fahrbahnrand eine hohe Relevanz hinsichtlich des Unfallgeschehens bei Mischverkehrsführungen besitzen (vgl. Dooring-Unfälle und Unfälle mit ein- und ausparkenden Kfz, Kapitel 4.1.3), wirken sich die Überholabstände (in Verbindung mit der Anzahl der Überholungen) vermutlich eher auf die Akzeptanz (Abnahme bei hoher Kfz-Verkehrsstärke, vgl. Kapitel 4.2.3) und damit ggf. auch auf die subjektive Sicherheit der Radfahrenden (vgl. Kapitel 4.3.2) aus.

Fahrbahnrand und parkende Kfz

Schüller et al. (2020b, S. 75 ff.) ermitteln auf Basis von Verhaltensanalysen an 20 Streckenabschnitten mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr seitliche Abstände zu parkenden Kfz für unbeeinflusste Radfahrende

von im Mittel etwa 0,45 m (Außenkanten). Dabei kann der Fahrbahnbreite, der zulässigen Geschwindigkeit sowie dem Vorhandensein von Straßenbahngleisen kein Einfluss nachgewiesen werden.

Apasnore et al. (2017, S. 145) kommen auf Basis einer Analyse von Streckenabschnitten mit Mischverkehr ohne Markierungen in Kanada auf Werte in einer ähnlichen Größenordnung: Sie ermitteln Abstände (Außenkanten) von im Mittel 0,57 m zum Fahrbahnrand und 0,35 m zu parkenden Fahrzeugen, wobei das geringere Maß zu parkenden Fahrzeugen auf einen Streckenabschnitt zurückzuführen ist, der neben parkenden Fahrzeugen am Fahrbahnrand eine sehr geringe Fahrstreifenbreite sowie sehr hohe Verkehrsstärke aufzuweisen hat, auch wenn der Fahrbahnbreite grundsätzlich kein signifikanter Einfluss auf die Abstände nachgewiesen wird. Hingegen zeigt sich hinsichtlich der Anzahl der Fahrstreifen ein Einfluss: So beträgt der seitliche Abstand zum Fahrbahnrand auf vierstreifigen Straßen durchschnittlich 0,61 m.

Reichenbach und Affolter (2003, S. 48 ff.) kommen in der Schweiz auf deutliche geringe Abstände zum Fahrbahnrand (keine Abschnitte mit ruhendem Verkehr im Kollektiv), differenzieren aber zusätzlich nach unbeeinflussten (Radfahrende werden nicht überholt) und beeinflussten Zustand (Radfahrende werden überholt). Die ermittelten Abstände (Rad-Rad) betragen für den unbeeinflussten Zustand 0,60 bis 0,70 m und für den beeinflussten Zustand ca. 0,40 m bis 0,55 m.

Vorrangig im deutschsprachigen Raum steht des Weiteren der Vergleich zwischen Streckenabschnitten mit und ohne Schutzstreifen im Fokus, wobei sich keine eindeutige Tendenz abzeichnet. Zum Vergleich werden auch internationale Studien berücksichtigt, die die Auswirkungen von Radfahrstreifen auf die seitlichen Abstände untersuchen. Einschränkend ist zu erwähnen, dass in den Untersuchungen nicht erwähnt wird, ob Sicherheitstrennstreifen zu parkenden Fahrzeugen markiert wurden, womit zum Einfluss dieses Merkmals keine Aussagen getroffen werden (können).

Ohm et al. (2015, S. 64 ff.) zeigen ohne Differenzierung nach beeinflussten und unbeeinflussten Fällen, dass der seitliche Abstand zu parkenden Kfz (Rad-Rad) auf Abschnitten mit Schutzstreifen (1,00 m) höher ist, als auf Strecken ohne Schutzstreifen (0,80 m). Auch Dietiker et al. (2012, S. 67) kommen bei der Betrachtung von 2 Streckenabschnitten ohne ruhendem Verkehr in der Schweiz zu dem Ergebnis, dass sich die seitlichen Abstände mit Schutzstreifen leicht erhöht haben (von im Mittel 0,59 m auf 0,69 m). Harkey und Stewart (1997, S. 116 ff.) untersuchen 13 Streckenabschnitte ohne ruhenden Verkehr in Florida (USA) und ermitteln ebenfalls geringere seitlichen Abstände zum Fahrbahnrand (Rad-Rad) bei Radfahrenden im Mischverkehr (0,34 m) im Vergleich zu Radfahrstreifen (0,64 m).

Kaulen et al. (2013, S. 52 ff.) kommen, sofern man lediglich die Abschnitte des Vorher-Nachher-Vergleiches betrachtet, auf ein anderes Ergebnis: So sind sowohl hinsichtlich der Abstände zum Fahrbahnrand (ohne Schutzstreifen: 0,67m, mit Schutzstreifen: 0,65 m, keine Angabe zu den Bezugskanten der Messung), als auch zum ruhenden Verkehr (nur 1 Streckenabschnitt, ohne Schutzstreifen: 0,86m, mit Schutzstreifen 0,85 m, keine Angabe zu den Bezugskanten der Messung) keine Unterschiede ableitbar. Auch van Houten und Seiderman (2005, S. 6 ff.) können auf Basis eines Vorher-Nachher-Vergleiches in Cambridge (USA) keine Veränderungen der mittleren seitlichen Abstände nach Markierung eines 1,50 m breiten Radfahrstreifens ableiten.

Zweibrücken und Känel (1999, S. 48 ff.) betrachten 2 Streckenabschnitte ohne ruhenden Verkehr, differenzieren aber nach seitlichen Abständen unbeeinflusster (ohne Überholung) und beeinflusster (mit Überholung) Radfahrender. Dabei ist festzustellen, dass sich die seitlichen Abstände mit Schutzstreifen (keine Angabe zu den Bezugskanten der Messung) unbeeinflusst leicht reduzieren (von im Mittel 0,74 m auf 0,71 m) während diese in Fällen mit Überholung (von im Mittel 0,50 m auf 0,61 m) leicht vergrößert werden. Zweibrücken und Känel (1999, S. 48) benennen darüber hinaus noch die Breite der Schutzstreifen als Einflussgröße, denn während sich die seitlichen Abstände auf schmalen Schutzstreifen (1,15 m) reduzieren, bleiben sie auf den breiteren Schutzstreifen (1,25 m bzw. 1,30 m) in etwa konstant. Szeiler und Skoric (2017, S. 4) weisen der Breite des Schutzstreifens ebenfalls einen Einfluss auf die seitlichen Abstände zu parkenden Kfz nach, obwohl sie generell feststellen, dass auf Abschnitten mit Schutzstreifen drei Viertel aller Radfahrenden innerhalb der Doring-Zone (0,75m) fahren.

Differenziert zeigt sich, dass sich Radfahrende bei Schutzstreifenbreiten von 1,50 m in der Dooring-Zone bewegen, während sie bei Schutzstreifenbreiten von 1,75 gerade noch außerhalb der Dooring-Zone fahren.

Koppers et al. (2021, S. 46 ff.) untersuchten den Einfluss von Piktogrammen auf der Fahrbahn auf die seitlichen Abstände (Rad-Rad) zum Fahrbahnrand bzw. zu parkenden Kfz (7 von 14 betrachteten Streckenabschnitten mit ruhendem Verkehr) und kommen zu dem Ergebnis, dass es keinen Unterschied zwischen der markierten und nicht markierten Mischverkehrsführung gibt. Die ermittelten Abstände betragen durchschnittlich 0,9 m (unbeeinflusst) bzw. 0,5 m (beeinflusst) und liegen hinsichtlich der unbeeinflussten Abstände in den von Schüller et al. (2020b, S. 75 ff.) ermittelten Größenordnungen (zieht man für die halbe Lenkerbreite und Außenspiegel der Kfz 0,5 m ab).

Im Gegensatz zu Koppers et al. (2021) weisen die analysierten Untersuchungen im internationalen Raum Piktogrammen auf der Fahrbahn ausnahmslos einen erhöhenden Einfluss auf die seitlichen Abstände der Radfahrenden zum Fahrbahnrand oder zum ruhenden Verkehr nach (Knoflacher 2014, S. 27; Birk et al. 2004, S. 10; Brady et al. 2010, S. 16 ff.; Daff 2013, S. 24 ff.; Furth et al. 2011, S. 10 ff.; Hunter et al. 2010, S. 73 ff.; Mills et al. 2010, S. 14 ff.; Pein et al. 1999, S. 4; Sando et al. 2014, S. 49 ff.). Im Mittel erhöhen sich die seitlichen Abstände mit Piktogrammen etwa um 0,1 m (beeinflusster Zustand) und 0,2 m (unbeeinflusster Zustand).

Zudem zeigt sich auch ein Einfluss der Lage der Piktogramme. Werden diese in größerem Abstand zu parkenden Kfz oder zum Fahrbahnrand markiert, sind auch größere seitliche Abstände der Radfahrenden zu verzeichnen (u.a. Knoflacher 2014, S. 32; Hunter et al. 2010, S. 73 ff.).

LaMondia und Duthie (2012, S. 86) analysieren zudem weitere Einflussfaktoren für seitlich Abstände Radfahrender auf Basis eines geordneten Probit-Modells. Demnach haben neben dem Vorhandensein von Piktogrammen

- die Anzahl der Fahrstreifen (reduzierend),
- das Vorhandensein von parkenden Kfz (erhöhend),
- Verkehrsstärke (erhöhend),
- eine zunehmende zulässige Geschwindigkeit (erhöhend) sowie
- Kfz und Radfahrende fahren in einer Reihe (erhöhend) bzw. Kfz und Radfahrende fahren parallel (reduzierend)

einen Einfluss. Dass sich mit zunehmender Verkehrsstärke die seitlichen Abstände vergrößern erscheint nicht plausibel, wird aber durch LaMondia und Duthie (2012, S. 86) damit begründet, dass mit zunehmendem Verkehrsaufkommen der Verkehr gleichmäßiger wird, was es Radfahrenden wiederum erleichtert, sich in den Verkehr einzufügen und sich dort zu behaupten. Ebenfalls widersprüchlich ist, dass einerseits eine höhere Geschwindigkeit die seitlichen Abstände erhöht aber andererseits häufiges Überholen bzw. Nebeneinanderfahren von Kfz und Radfahrenden die seitlichen Abstände reduziert, da niedrige Geschwindigkeiten u.a. bewirken, dass das Nebeneinanderfahren von Kfz und Radfahrenden reduziert wird. LaMondia und Duthie (2012, S. 86) begründen dieses Ergebnis damit, dass Radfahrende bei höheren Geschwindigkeiten mehr Platz benötigen um sich auf Veränderungen der Fahrbahn oder andere Beeinträchtigungen einstellen zu können und deshalb mit größerem seitlichen Abstand fahren.

Überholabstände

Schüller et al. (2020b, S. 79 ff.) ermitteln für 10 Streckenabschnitte mit Mischverkehr ohne Markierungen Überholabstände im Mittel zwischen 1,20 m und 2,00 m (im Mittel 1,66 m, Außenkanten). Dabei wurde etwa in einem Drittel der Überholungen (37 %) der gesetzlich geforderte Mindestabstand von 1,50 m nicht eingehalten (vgl. Kapitel 2).

Apasnore et al. (2017, S. 145) kommen bei einer Analyse von 563 Überholungen an 6 Streckenabschnitten mit Mischverkehr in Ottawa (Kannada) auf ähnliche Größenordnungen (mittlere Überholabstände zwischen 1,24 und 2,34 m, Außenkanten) und können darüber hinaus auf Basis einer linearen Mehrfachregression den folgenden Merkmalen einen signifikanten Einfluss auf die Überholabstände nachweisen (Apasnore et al. 2017, S. 146):

- Fahrbahnbreite (erhöhend)
- Anzahl der Fahrstreifen (erhöhend)
- Geschwindigkeit Radfahrende (reduzierend) und Geschwindigkeit Kfz (erhöhend)
- Steigung (erhöhend)
- parkenden Fahrzeugen (reduzierend)

Reichenbach und Affolter (2003, S. 46) können ebenfalls der Fahrbahnbreite einen Einfluss auf die seitlichen Überholabstände nachweisen, allerdings im Gegensatz zu Apasnore et al. (2017) keinen linearen: So ist der Anteil kritischer Überholabstände ($< 1,20$ m bei $v_{zul} = 50$ km/h und $< 1,10$ m bei $v_{zul} = 30$ km/h) auf Streckenabschnitten mit einer Fahrbahnbreite von 6,30 m bis 6,50 m (zwischen 22 % und 51 %) mit Abstand am größten. Bei Fahrbahnbreiten ab 6,70 m und unter 6,30 m ist der Anteil kritischer Überholungen deutlich geringer (jeweils maximal 7 %).

Walker (2007, S. 420) kommen auf Basis von Messfahrten in Großbritannien auf das Ergebnis, dass sich die Überholabstände vergrößern, je näher Radfahrende am Fahrbahnrand fahren.

Der Vergleich zwischen Überholabständen bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen wurde vorrangig im deutschsprachigen Raum untersucht. Zum Vergleich wurden wie im Bereich der Abstände zum Fahrbahnrand/parkenden Fahrzeuge auch internationale Studien berücksichtigt die neben dem Mischverkehr auch Radfahrstreifen einbeziehen:

Ohm et al. (2015, S. 63), Kaulen et al. (2013, S. 48 ff.) und Langer (2016, S. 77) ermitteln, dass die Überholabstände mit Schutzstreifen im Mittel etwa um 0,1 m geringer sind, als im Mischverkehr. Die Überholabstände erreichen dabei Werte zwischen ca. 0,9 m und ca. 1,4 m (Außenkanten). Langer (2016, S. 67) kann dabei der Verkehrsstärke, dem Schwerverkehrsanteil sowie dem Vorhandensein von Gegenverkehr einen signifikant reduzierenden Einfluss auf die Überholabstände nachweisen. Auch Zweibrücken und Känel (1999, S. 54 ff.) können der Markierung von Schutzstreifen ein reduzierenden Einfluss nachweisen. So verringern sich die Überholabstände nach Markierung von Schutzstreifen für die Fälle ohne Gegenverkehr leicht und für die Fälle mit Gegenverkehr deutlich (um 0,17 m). Dietiker et al. (2012, S. 67) können ebenfalls feststellen, dass sich die Überholabstände an 2 von 3 betrachteten Streckenabschnitten mit der Markierung von Schutzstreifen leicht reduzieren (zwischen 0,05 m und 0,08 m).

Szeiler und Skoric (2017, S. 6) ermitteln in Österreich, dass bei 80 % der Überholvorgänge von Radfahrenden auf Schutzstreifen der erforderliche Sicherheitsabstand (1,50 m) nicht eingehalten wird (Außenkanten).

Richter (2019, S. 66 ff.) ermitteln auf Strecken mit Schutzstreifen geringere minimale Überholabstände (0,12 m, Außenkanten) als bei Radfahrstreifen (0,29 m, Außenkanten). Insgesamt wird bei 48,3 % aller 6.340 bei Überholvorgängen gemessenen Kfz ein Überholabstand von 1,50 m unterschritten.

Huemer et al. (2018, S. 10) können die bisher dargestellten Ergebnisse auf Basis einer Simulationsstudie mit 60 Proband*innen bestätigen: So sind die durchschnittlichen Überholabstände bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr im Vergleich zu Schutzstreifen und Radfahrstreifen am höchsten. Bei Radfahr- oder Schutzstreifen unterschritten etwa 82 % bis 84 % und im Mischverkehr etwa 25 % der Überholungen einen Sicherheitsabstand von 1,50 m (keine Angabe zu den Bezugskanten der Messung). Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass das Vorhandensein einer Mittelmarkierung zu niedrigeren und eine zunehmende Fahrstreifenbreite zu höheren Überholabständen führt.

Im internationalen Raum kann zum Vergleich der Überholabstände von Abschnitten mit Radfahrstreifen und Mischverkehr keine eindeutige Tendenz abgeleitet werden: Während Chuang et al. (2013, S. 38) (Taiwan), Debnath et al. (2018, S. 139) (Australien) und Mehta et al. (2015, S. 12) (Kanada) für Strecken mit Radfahrstreifen im Vergleich zum Mischverkehr größere Überholabstände (um etwa 0,1 m bis 0,2 m) ermitteln, kommen Harkey und Stewart (1997, S. 117) (USA), Parkin und Meyers (2010, S. 163) und Shackel und Parkin (2014, S. 104) (Großbritannien) für Strecken mit Mischverkehr ohne Markierung auf größere Überholabstände (um etwa 0,2 m).

Dabei können Debnath et al. (2018, S. 140) auf Basis eines Logit-Modells unabhängig von der Radverkehrsführungsform der zulässigen Geschwindigkeit < oder > 60 km/h (erhöhenden), kurvenreichen Straßenabschnitten (erhöhend) und der Fahrstreifenbreite (reduzierend) einen signifikanten Einfluss hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit von Unterschreitungen des Mindestüberholabstandes nachweisen.

Shackel und Parkin (2014, S. 104) können für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr zudem ableiten, dass die Überholabstände bei Vorhandensein einer Mittelmarkierung geringer sind im Vergleich zu Straßen ohne Mittelmarkierung.

Den Einfluss von Piktogrammen auf der Fahrbahn auf die Überholabstände wird im nationalen Raum von Koppers et al. (2021) untersucht. Dabei zeigt sich, dass sich die Überholabstände mit Markierung der Piktogramme in allen Fällen (unbeeinflusst, mit entferntem Gegenverkehr, mit direktem Gegenverkehr) um im Mittel etwa 0,1 m vergrößert haben (Koppers et al. 2021, S. 50).

Dieses Ergebnis kann im internationalen Raum durch Birk et al. (2004, S. 10), Hunter et al. (2010, S. 73 ff.), Knoflacher (2014, S. 31), La Vega (2011, S. 24 ff.), Mills et al. (2010, S. 16), Pein et al. (1999, S. 5) und Sando et al. (2014, S. 49) bestätigt werden. Dabei nahmen die Überholabstände mit Markierung von Piktogrammen im Mittel zwischen 0,1 m und 0,6 m zu.

Love et al. (2012, S. 453) kommen auf Basis einer Naturalistic-Cycling-Study sowohl hinsichtlich von Radfahrstreifen als auch von Piktogrammen auf andere Ergebnisse: So werden auf Radfahrstreifen im Vergleich zum Mischverkehr mit und ohne Piktogramme die größten Überholabstände ermittelt. Auf Radfahrstreifen wurden keine Überholungen mit einem Abstand von < 1,00 m (Außenkanten) registriert. Im Mischverkehr ohne Markierungen betragen 17 % und mit Piktogrammen 23 % der Überholabstände < 1,00 m. Unabhängig davon kommen auch Love et al. (2012, S. 453) zu dem Ergebnis, dass die Überholabstände mit zunehmender Fahrstreifenbreite zunehmen (vgl. Apasnore et al. 2017, S. 146; Debnath et al. 2018, S. 140).

4.2.5 Geschwindigkeiten

Geschwindigkeiten Kfz

Im Zentrum der Betrachtung von Geschwindigkeiten des Kfz-Verkehrs stehen bei den analysierten Untersuchungen

- das generelle Geschwindigkeitsniveau auf Strecken mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Markierung (Schüller et al. 2020b, Reichenbach und Affolter 2003),
- die Analyse des Einflusses von Markierung (Schutzstreifen, Piktogramme) auf das Geschwindigkeitsniveau (Dietiker et al. 2012; Hunter et al. 2010; Kaulen et al. 2013; Koppers et al. 2021; Ohm et al. 2015; Zweibrücken und Känel 1999) sowie
- die Analyse von Überholgeschwindigkeiten (Dietiker et al. 2012; Huemer et al. 2018; Shackel und Parkin 2014) und ggf. Einflüsse darauf,

im Fokus. Schüller et al. (2020b, S. 74 ff.) ermitteln für 15 Untersuchungsstrecken (Mischverkehr), dass die mittleren Geschwindigkeiten bei 75 % der Strecken unter 50 km/h liegt. Die v_{85} -Geschwindigkeit liegt hingegen im Mittel bei 55 km/h. Zudem wird festgestellt, dass das Geschwindigkeitsniveau auf vierstreifigen Abschnitten höher ist, als auf zweistreifigen. Der Fahrbahnbreite sowie der Umfeldnutzung kann kein Einfluss auf die mittleren Geschwindigkeiten nachgewiesen werden. Der Geschwindigkeit kann wiederum kein Einfluss auf seitlichen Abstände der Radfahrenden zu parkenden Kfz nachgewiesen werden.

Reichenbach und Affolter (2003, S. 50) ermitteln ebenfalls, dass die v_{85} -Geschwindigkeit bei fast allen Untersuchungsstrecken > 50 km/h ist. Einen Einfluss der Fahrbahnbreite auf das Geschwindigkeitsniveau können sie ebenfalls nicht ableiten. Allerdings wurde festgestellt, dass das Geschwindigkeitsniveau mit zunehmender Zentrums Lage der Untersuchungsstrecken in den Kommunen abnimmt.

Der Vergleich zwischen Streckenabschnitten mit und ohne Schutzstreifen ergibt grundsätzlich ein geringeres Geschwindigkeitsniveau auf Strecken mit Schutzstreifen (Dietiker et al. 2012, S. 65; Kaulen et al. 2013, S. 41; Ohm et al. 2015, S. 66; Zweibrücken und Känel 1999, S. 47). Während Kaulen et al. (2013, S. 41) und Zweibrücken und Känel (1999, S. 47) auf Basis von Vorher-Nachher-Vergleichen eine deutliche Reduzierung des Geschwindigkeitsniveaus mit Markierung von Schutzstreifen von 3-4 km/h ableiten, ermitteln Ohm et al. (2015, S. 66) und Dietiker et al. (2012, S. 65) lediglich eine geringe Reduzierung (im Mittel um 1 km/h).

Zur Wirkung von Piktogrammen auf die Kfz-Geschwindigkeiten kommen sowohl Koppers et al. (2021, S. 42) als auch Hunter et al. (2010, S. 73 ff.) auf Basis von Vorher-Nachher-Vergleichen zu dem Ergebnis, dass sich das Geschwindigkeitsniveau mit Markierung der Piktogramme im Mittel um ca. 2 km/h reduziert hat.

Die Analysen zu Überholgeschwindigkeiten von Huemer et al. (2018, S. 21) und Shackel und Parkin (2014, S. 104) ermitteln sowohl die Fahrstreifenbreite (zunehmend) als auch das Vorhandensein einer Mittelmarkierung (zunehmend) als Einflussfaktoren. Shackel und Parkin (2014, S. 104) ermitteln zudem, dass bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 30 mph (48,2 km/h) die Überholgeschwindigkeiten auf Strecken mit Mischverkehr ohne Mittelmarkierung unter denen auf Strecken mit Radfahrstreifen liegen – bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 20 mph (32,2 km/h) gibt es hinsichtlich dessen keine Unterschiede.

Geschwindigkeiten Radfahrende

Alrutz et al. (2015, S. 43 ff.) zeigen auf Basis von Geschwindigkeitsmessungen von ca. 19.000 Radfahrenden, dass die mittleren Geschwindigkeiten auf Strecken mit Mischverkehr ohne Schutzstreifen (19,3 km/h), mit Schutzstreifen (19,5 km/h) sowie auf Strecken mit Radfahrstreifen (19,3 km/h) auf einem Niveau liegen. Radfahrende auf Fahrradstraßen (18,2 km/h) sowie auf Radwegen (17 km/h bis 18,1 km/h) weisen geringere mittlere Geschwindigkeiten auf. Differenziert nach den Fahrradtypen erreichen Radfahrende mit Rennrädern (24,5 km/h) oder Mountainbikes (20,5 km/h) die höchsten mittleren Geschwindigkeiten. Hinsichtlich des Alters erreichen Radfahrende in der Altersgruppe 18 bis 24 Jahre die höchsten mittleren Geschwindigkeiten (20,4 km/h). Schleinitz et al. (2014, S. 80) ermitteln, dass Pedelec²⁵¹⁵-Nutzende im Mittel ca. 2 km/h und Pedelec⁴⁵¹⁶-Nutzende im Mittel ca. 8 km/h schneller sind, als Radfahrende mit Fahrrädern ohne elektronische Unterstützung.

4.3 Subjektive Verkehrssicherheit und Präferenzen

4.3.1 Erkenntnisse im Überblick

Tab. 4-3 zeigt die Datengrundlagen (Untersuchungsgegenstand), methodische Aspekte (Stichprobe, Methode zur Bestimmung der präferierten Radverkehrsführungsform), wesentliche Erkenntnisse zur subjektiven Sicherheit/präferierten Radverkehrsführungsform sowie in den Befragungen behandelte Verhaltensaspekte. Hinsichtlich der präferierten Radverkehrsführungsformen wird grundsätzlich nach Studien zum Sicherheitsgefühl (subjektive Sicherheit) und Studien zu präferierten Routen unterschieden. Grundsätzlich werden analog zur Analyse der Studien zum Unfallgeschehen (vgl. Kapitel 4.1.1) die Radverkehrsführungsformen Mischverkehr bei $v_{zul} = 50$ km/h (MV50), Mischverkehr bei $v_{zul} = 30$ km/h (MV30), Schutzstreifen (SSF), Piktogramme (Pikto), Radfahrstreifen (RFS) und Radwege (RW) berücksichtigt. Die Wirkrichtung auf die subjektive Sicherheit/präferierte Route wird durch „+“ = erhöhte subjektive Sicherheit/eher präferierte Route und „-“ = reduzierte subjektive Sicherheit/weniger präferierte Route immer ausgehend von den Mischverkehrsführungen als Referenz (Ref.) dargestellt. Ausführliche Erläuterungen zu den präferierten Radverkehrsführungsformen sowie zu den in Befragungen behandelten Verhaltensweisen sind in Kapitel 4.3.2 bzw. 4.3.3 zu finden. Die wesentlichen Erkenntnisse zur subjektiven Verkehrssicherheit und den Präferenzen können wie folgt zusammengefasst werden:

Sowohl im nationalen (Alrutz 2009, S. 93; Anke et al. 2020, S. 50; FixMyCity 2020; Hardinghaus und Cyganski 2019, S. 13) als auch internationalen Raum (Chataway et al. 2014, S. 39 ff.; Christmas 2010, S. 60 ff.; Damant-

¹⁵ Pedelec²⁵ unterstützen beim Treten bis 25 km/h (Schleinitz et al. 2014, S. 12).

¹⁶ Pedelec⁴⁵ unterstützen beim Treten bis 45 km/h (Schleinitz et al. 2014, S. 12).

Sirois et al. 2014, S. 1164; Dill und McNeil 2013, S. 14 ff.; Manton et al. 2016, S. 143 ff.; Rossetti et al. 2018, S. 262; Winters und Teschke 2010, S. 45) zeigt sich die deutliche Tendenz, dass Radfahrende eine Radverkehrsanlage gegenüber der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr bevorzugen. Eine weitere Differenzierung nach Typen von Radfahrenden ergibt, dass selbstbewusste und engagierte Radfahrende das Fahren auf der Fahrbahn (ggf. mit Radfahrstreifen oder unterstützender Infrastruktur) und vorsichtige, interessierte und besorgte Radfahrende eher eine vom Kfz-Verkehr getrennte Führung (Radwege) bevorzugen (Christmas 2010, S. 60 ff.; Damant-Sirois et al. 2014, S. 1164; Dill und McNeil 2013, S. 14 ff.; Hardinghaus und Cyganski 2019, S. 14; Rossetti et al. 2018, S. 262).

Bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr haben vor allem die zulässige Geschwindigkeit, die Kfz-Verkehrsstärke sowie das Vorhandensein von parkenden Kfz am Fahrbahnrand einen (negativen) Einfluss auf die subjektive Sicherheit (Chataway et al. 2014, S. 39; FixMyCity 2020, Abschnitt 4; Schüller et al. 2020b, S. 82 ff.). Das Radfahren im Mischverkehr wird zwar mit zunehmender Erfahrung der Radfahrenden als weniger belastend empfunden, stellt allerdings vor allem für Anfänger*innen und vorsichtige Radfahrende ein Barriere dar (O'Connor und Brown 2010, S. 55 ff.). Aus Sicht der Kfz-Führenden sollten Radfahrende lieber im Seitenraum oder auf einer Radverkehrsanlage fahren (Christmas 2010, S. 59; Schüller et al. 2020b, S. 82 ff.). Zum Einfluss von Schutzstreifen zeigt sich, dass diese zwar situativ in unübersichtlichen Situationen hilfreich sein können und Radfahrende Markierungslösungen durchaus befürworten, die subjektive Sicherheit auf Schutzstreifen generell aber eher nur als mäßig wahrgenommen wird (Dietiker et al. 2012, S. 59; Richter 2019, S. 70; Szeiler und Skoric 2017, S. 7). Zum Einfluss von Piktogrammen ergibt sich, dass diese die subjektive Sicherheit von der Mehrzahl der Radfahrenden im Vergleich zur nicht markierten Mischverkehrsführung erhöht (Birk et al. 2004, S. 15; Koppers et al. 2021, S. 69 ff.; van Houten und Seiderman 2005, S. 11 ff.; Vasilev et al. 2017, S. 1103).

Aspekte der Befragungen von Verhaltensweisen thematisieren u. a. Vermeidungsverhalten, Gründe für Störempfinden gegenüber Radfahrenden und aggressivem Verhalten zwischen Radfahrenden und Kfz-Führenden sowie den Einfluss von markierten Fahrradpiktogrammen. Dabei zeigt sich, dass Radfahren im Mischverkehr vor allem von älteren oder selten fahrenden Radfahrenden gemieden wird (Chataway et al. 2014, S. 38 ff.). Ein Grund für aggressives Verhalten von Kfz-Führenden gegenüber Radfahrenden ist ein eher negatives Bild, was Kfz-Führende von Radfahrenden haben – dieses ist vor allem von Einstellungsfehlern (häufige Regelmisachtung, fehlende Rücksicht für andere Verkehrsarten) geprägt (Christmas 2010, S. 9; Schüller et al. 2020b, S. 166). Zudem ermitteln Piatkowski et al., S. 144 ff. (2017), dass die Wahrscheinlichkeit für aggressives Verhalten sinkt, je mehr die Befragten selbst Radfahren. Kaplan et al. (2019, S. 56) führen aggressives Verhalten auf Angst der Kfz-Führenden vor Interaktionen mit Radfahrenden bzw. die Bewältigung Jener zurück.

Zum Einfluss der Piktogramme auf das Verhalten zeigt sich, dass sich im nationalen Raum der Anteil der Radfahrenden, die angeben die Fahrbahn nach Markierung der Piktogramme mittig zu nutzen, im Vergleich zum Mischverkehr ohne Markierung nur geringfügig zugenommen hat (Koppers et al. 2021, S. 88). Im internationalen Raum geben hingegen größere Anteil der befragten Radfahrenden (etwa 30 % bis 50 %) an, die Fahrstreifen mit Piktogrammen mittig zu befahren (Birk et al. 2004, S. 15; Furth et al. 2011, S. 11; Vasilev et al. 2017, S. 1101). Zudem waren die befragten Radfahrenden zu nennenswerten Anteilen der Meinung, dass sich Kfz-Führende mit Piktogrammen rücksichtsvoller verhalten (Birk et al. 2004, S. 16; Vasilev et al. 2017, S. 1103).

Tab. 4-4 Datengrundlagen, methodische Aspekte und wesentliche Erkenntnisse der analysierten Studien zu Befragungen

Studie	Untersuchungsraum	Untersuchungsgegenstand	Stichprobe	Subjektive Sicherheit/präferierte Radverkehrsführungsform							Verhaltensaspekte	
				Methode	Kollektiv	MV50	MV30	SSF	Pikto	RFS		RW
Alrutz (2009)	Deutschland (verschiedene Städte)	8 Strecken verschiedene Führungsformen	Vor-Ort-Befragung: 770 Rf	subjektive Sicherheit				Ref.		++	+	
Anke et al. (2020)	Deutschland	verschiedene Führungsformen	Online-Befragung: 10.294 Befragte	subjektive Sicherheit		Ref.		+		++	+++	
Birk et al. (2004)	San Francisco, USA	6 Strecken Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Vor-Ort-Befragung: 103 Rf 23 Kfz	subjektive Sicherheit		Ref.			+			Einfluss von Piktogrammen auf seitliche Abstände, Fahrverhalten von Kfz
Chataway et al. (2014)	Kopenhagen, Dänemark und Brisbane, Australien	Mischverkehr	Online Befragung: 894 Befragte (75 % aus Brisbane)	subjektive Sicherheit		Ref.				+		Gründe für Vermeidung von Abschnitten mit Mischverkehr
Christmas (2010)	London, Großbritannien	Mischverkehr	Workshops: 62 Teilnehmende	subjektive Sicherheit	selbstbewusste Rf vorsichtige Rf	Ref. Ref.		+		+	+	Gründe für Störungsempfinden ggü. Rf
Daff (2013)	Melbourne, Australien	3 Strecken Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Vor-Ort-Befragung: 86 Rf	subjektive Sicherheit		Ref.			o			Bedeutung und Interpretation der Piktogramme
Damant-Sirois et al. (2014)	Montreal, Kanada	verschiedene Führungsformen	Online-Befragung: 2.004 Befragte	subjektive Sicherheit	engagierte Rf Freizeit-Rf	Ref. Ref.				o	+	
Dietiker et al. (2012)	Schweiz (verschiedene Städte)	5 Strecken Vorher: Mischverkehr Nachher: Schutzstreifen	Vor-Ort-Befragung: 211 Rf Telefoninterviews: 211 Befragte	subjektive Sicherheit		Ref.		o				
Dill und McNeil (2013)	Portland, USA	verschiedene Führungsformen	Telefoninterviews: 902 Befragte	subjektive Sicherheit	interessierte & besorgte Rf (nach Geller 2006)	Ref.				+	++	
FixMyCity (2020)	Deutschland	verschiedene Führungsformen	Online-Befragung: 21.401 Befragte (19.109 aus Berlin)	subjektive Sicherheit		Ref.	+			++	++	
Furth et al. (2011)	Salt Lake City, Long Beach und Brookline, USA	3 Strecken (2 x 4-streifig) Vorher: Mischverkehr Nachher: grüner Streifen mit Piktogrammen; Piktogramme mit gepunkteten Linien	Vor-Ort-Befragung: 20 Rf 14 Kfz									Einfluss von Piktogrammen auf seitliche Abstände, Fahrverhalten von Kfz
Hardinghaus und Cyganski (2019)	Deutschland	verschiedene Führungsformen	Online-Befragung: 4.463 Befragte	präferierte Route	häufig Rad fahrende selten Rad fahrende	Ref. Ref.	++ ¹⁷ +++ ¹⁷			+ ¹⁸ ++ ¹⁸	o	
Høye et al. (2016)	Oslo, Norwegen	1 Strecke Vorher: Mischverkehr Nachher: Mischverkehr mit hinweisender Beschilderung	Vor-Ort-Befragung: Vorher: 170 Rf, 156 Kfz Nachher: 141 Rf; 246 Kfz									Einfluss von hinweisender Beschilderung auf Akzeptanz, seitliche Abstände, Geschwindigkeiten
Kaplan et al. (2019)	Israel	Mischverkehr	Online-Befragung: 474 Befragte									Gründe für aggressives Verhalten ggü. Rf

¹⁷ verkehrsberuhigte Bereiche¹⁸ Dargestellt ist die Bewertung für Radfahrstreifen nach FGSV 2010a. Mit baulichen Maßnahmen separierte Radfahrstreifen („geschützte Radfahrstreifen“) werden von allen Führungsformen am besten bewertet.

Studie	Untersuchungsraum	Untersuchungsgegenstand	Stichprobe	Subjektive Sicherheit/präferierte Radverkehrsführungsform								Verhaltensaspekte	
				Methode	Kollektiv	MV50	MV30	SSF	Pikto	RFS	RW		
Koppers et al. (2021)	Deutschland (verschiedene Städte)	9 Strecken Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme	Vor-Ort-Befragung: 3.236 Befragte Online-Befragung: 49 Befragte postalische Befragung: 1.798 Befragte	subjektive Sicherheit		Ref.				+			Einfluss von Piktogrammen auf Akzeptanz, seitliche Abstände, Geschwindigkeiten
Manton et al. (2016)	Galway, Irland	verschiedene Führungsformen	Befragung auf Großveranstaltungen und auf dem Campus 104 Befragte	präferierte Route		Ref.					+	++	
O'Connor und Brown (2010)	Victoria, Australien	Mischverkehr	qualitative Interviews: 32 Befragte	subjektive Sicherheit	Qualitative Bewertung								
Piatkowski et al. (2017)	international	Mischverkehr	Online-Befragung: 17.851 Befragte										Gründe für aggressives Verhalten ggü. Rf
Richter (2019)	Deutschland (verschiedene Städte)	86 Strecken (32 km) Schutzstreifen und Radfahrstreifen	Vor-Ort-Befragung: 1.370 Rf	subjektive Sicherheit				Ref.			+		
Rossetti et al. (2018)	Santiago, Chile	verschiedene Führungsformen	Vor-Ort- und Online- Befragung: 1.966 Befragte	präferierte Route	furchtlose Rf vorsichtige Rf	Ref. Ref.					+ + ¹⁹ + ₂₀	+ ++	
				subjektive Sicherheit		Ref.					+ ₂₀	++	
Schüller et al. (2020b)	Deutschland (verschiedene Städte)	20 Strecken Mischverkehr	Vor-Ort-Befragung: 208 Rf 204 Kfz	subjektive Sicherheit	kein Vergleichskollektiv								Gründe für Störungsempfinden ggü. Rf
Schüller et al. (2020a)	Deutschland (verschiedene Städte)	ausgewählte Strecken	Vor-Ort-Befragung: 70 Rf	subjektive Sicherheit	Bezug ausschließlich auf parkende Kfz								Einfluss des ruhenden Verkehrs, Vermeidung von Routen
Szeiler und Skoric (2017)	Österreich (verschiedene Städte)	10 Streckenabschnitte Mischverkehr und Schutzstreifen	Vor-Ort-Befragung: 1.100 Befragte	subjektive Sicherheit		Ref.		+					
van Houten und Seiderman (2005)	Cambridge, USA	4 Strecken (entlang eines Straßenzuges) Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme und Radfahrstreifen	Vor-Ort-Befragung: Vorher: 117 Rf, 129 Kfz Nachher: 123 Rf, 120 Kfz	subjektive Sicherheit		Ref.				+	++		
Vasilev et al. (2017)	Levanger, Norwegen	1 Strecke Vorher: Mischverkehr Nachher: Piktogramme (+ weitere Maßnahmen)	Vor-Ort- und Online- Befragung: 153 Rf 182 Kfz	subjektive Sicherheit		Ref.				+			Einfluss von Piktogrammen auf seitliche Abstände, Fahrverhalten von Kfz
Winters und Teschke (2010)	Metro Vancouver, Kannada	verschiedene Führungsformen	Online-Befragung und Telefoninterviews: 1.402 Befragte	präferierte Route		Ref.	+++ ¹⁷			+	++	++++	

¹⁹ Mit baulichen Maßnahmen separierte Radfahrstreifen („geschützte Radfahrstreifen“) wurden sicherer bewertet als Radfahrstreifen.

²⁰ Mit baulichen Maßnahmen separierte Radfahrstreifen („geschützte Radfahrstreifen“) wurden sicherer bewertet als Radfahrstreifen, aber unsicherer als Radwege.

4.3.2 Präferierte Radverkehrsführungsform

Die analysierten Studien zu präferierten Radverkehrsführungsformen unterscheiden sich grundsätzlich nach Befragungen

- zum Sicherheitsgefühl (subjektive Sicherheit) und/oder zum Komfort auf unterschiedlichen Radverkehrsführungsformen (Alrutz 2009, Anke et al. 2020, Chataway et al. 2014, Christmas 2010, Damant-Sirois et al. 2014, Dill und McNeil 2013, FixMyCity 2020) sowie
- zu präferierten Routen aus vorgegebenen hypothetischen Routen u.a. in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform (sog. Stated Preference-Experimente: Hardinghaus und Cyganski 2019, Manton et al. 2016, Rossetti et al. 2018, Winters und Teschke 2010).

Dabei ergibt sich sowohl national (Alrutz 2009, S. 93; Anke et al. 2020, S. 50; FixMyCity 2020; Hardinghaus und Cyganski 2019, S. 13) als auch international (Chataway et al. 2014, S. 39 ff.; Christmas 2010, S. 60 ff.; Damant-Sirois et al. 2014, S. 1164; Dill und McNeil 2013, S. 14 ff.; Manton et al. 2016, S. 143 ff.; Rossetti et al. 2018, S. 262; Winters und Teschke 2010, S. 45) die eindeutige Tendenz, dass Radfahrende eine Radverkehrsanlage (vorzugsweise Radwege und Radfahrstreifen) gegenüber der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr präferieren bzw. als sicherer empfinden. Christmas (2010, S. 60 ff.), Damant-Sirois et al. (2014, S. 1164), Dill und McNeil (2013, S. 14 ff.) (USA), Hardinghaus und Cyganski (2019, S. 14) und Rossetti et al. (2018, S. 262) differenzieren zusätzlich nach unterschiedlichen Typen von Radfahrenden und kommen zu dem Resultat, dass selbstbewusste und engagierte Radfahrende das Fahren auf der Fahrbahn bevorzugen (ggf. mit Radfahrstreifen oder unterstützender Infrastruktur, die ihr Recht die Fahrbahn zu nutzen verdeutlicht). Vorsichtige, interessierte und besorgte Radfahrende wünschen sich eher eine vom Kfz-Verkehr baulich getrennte Führung (Radwege) – eine Führung des Radverkehrs im Mischverkehr wird nur in verkehrsberuhigten Bereichen (in Wohnstraßen oder bei geringen Kfz-Geschwindigkeiten) bevorzugt. Anke et al. (2020, S. 50) können hingegen keine größeren Unterschiede zur präferierten Radverkehrsführungsform unterschiedlicher Radfahrtypen ableiten – so werden von allen Radfahrtypen erst Radwege und dann Radfahrstreifen gegenüber der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr (mit und ohne Schutzstreifen) bevorzugt. Rossetti et al. (2018, S. 262) ermitteln zusätzlich Einflussfaktoren auf das Sicherheitsempfinden Radfahrender mit dem Resultat, dass sich geringe Geschwindigkeiten im Kfz-Verkehr, die Breite der Radverkehrsanlage und das nicht Vorhandensein von Bussen als positive Einflussfaktoren herausgestellt haben.

Eine spezifischen Bezug zur Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Markierungslösungen stellen vor allem FixMyCity (2020), Schüller et al. (2020b), Chataway et al. (2014) und O'Connor und Brown (2010) her:

FixMyCity (2020, Abschnitt 4) zeigen, dass das Sicherheitsempfinden im Mischverkehr je nach zulässiger Geschwindigkeit (höher bei $v_{zul} = 30$ km/h) und Vorhandensein von parkenden Kfz (höher ohne parkende Kfz) variiert.

Schüller et al. (2020b, S. 82 ff.) ermitteln auf Basis von Vor-Ort-Befragungen von 208 Radfahrenden, dass die (illegale) Gehwegnutzung durch Radfahrende zu 60 % durch den Beweggrund geprägt ist, dass das Fahren auf der Fahrbahn als unsicher erachtet wird. Diese Unsicherheit wird durch die Befragten mit einer hohen Kfz-Verkehrsstärke sowie Interaktionen mit parkenden bzw. ab- und einbiegenden Kraftfahrzeugen begründet. Als weitere Beweggründe wird das Erreichen von Quellen oder Ziele, das Ausweichen von Straßenbahngleisen sowie ein zu eng empfundener Querschnitt genannt. Radfahrende, die die Fahrbahn nutzen, gaben als Beweggründe die Regelkonformität, die Vermeidung von Interaktion mit Gehenden sowie eine bessere Oberfläche an. Die ebenfalls durchgeführte Befragung von 204 Kfz-Führenden ergibt ein widersprüchliches Ergebnis. Zwar fühlen sich nur wenige Kfz-Führende durch Radfahrende auf der Fahrbahn gestört, dennoch wünscht sich jede*r zweite Kfz-Führende, dass Radfahrende bei beengten Verhältnissen auf dem Gehweg fahren sollen. Auf ein ähnliches Ergebnis kommen auch Christmas (2010, S. 59): Die in dieser Studie befragten Kfz-Führenden sahen den Hauptvorteil von Radwegen darin, dass sie Radfahrende „aus dem Weg schaffen“.

Chataway et al. (2014, S. 39) ermitteln, dass die Anzahl der Fahrstreifen sowie das Vorhandensein von Parkplätzen am Fahrbahnrand einen negativen Einfluss auf die subjektive Sicherheit von Radfahrenden im Mischverkehr hat. Darüber hinaus zeigt sich, dass sich die befragten Radfahrenden grundsätzlich sicherer fühlen, wenn ein Radfahrstreifen zur Verfügung steht.

O'Connor und Brown (2010) führten qualitative Interviews mit 32 Freizeitradfahrenden zur Einschätzung des Radfahrens im Mischverkehr auf der Fahrbahn durch. Die Befragten räumen zwar Sicherheitsbedenken ein, sahen jedoch hinsichtlich der Verkehrssicherheit kein wesentliches Hindernis für die Fortsetzung des Radfahrens im Mischverkehr. Vielmehr nahmen Radfahrende eine ihnen gegenüber feindseligen Stimmung wahr (O'Connor und Brown 2010, S. 55). Darüber hinaus stellen O'Connor und Brown (2010, S. 55 ff.) fest, dass das Radfahren im Mischverkehr mit zunehmender Erfahrung der Radfahrenden als weniger belastend eingeschätzt wird. Zusammenfassend wird geschlussfolgert, dass die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr vor allem für Radfahranfänger*innen eine potenziell starke Barriere darstellt.

Dietiker et al. (2012), Richter (2019) und Szeiler und Skoric (2017) führten Befragungen zum Einfluss von Schutzstreifen auf das Sicherheitsempfinden durch. Dabei kommen Dietiker et al. (2012, S. 59) zu dem Ergebnis, dass grundsätzlich kaum wahrnehmbare Veränderungen mit der Markierung von Schutzstreifen abgeleitet werden können, auch wenn sie in unübersichtlichen Verhältnissen situativ das Sicherheitsgefühl erhöhen können. Als Gründe für das Unsicherheitsgefühl beim Fahren im Mischverkehr auf der Fahrbahn wurden Rücksichtslosigkeit der Kfz-Führenden sowie zu geringe Überholabstände genannt. Zudem lösten Busse und Lkw Gefährdungsgefühle bei den befragten Radfahrenden aus. Analog zu den o.g. Erkenntnissen zu den präferierten Führungsformen, wurden die Schutzstreifen von den Radfahrenden als Alibilösung bezeichnet und stattdessen Radwege gefordert. Ein interessantes Ergebnis zeigte zudem die Befragung der Kfz-Führenden: Die Kfz-Führenden gaben an, dass sie bei dem Vorhandensein von Schutzstreifen zu aufmerksameren und langsameren Fahren angeregt werden. Die gleichzeitig durchgeführten Messungen (vgl. Kapitel 4.2.4 und 4.2.5) konnten dies aber nicht bestätigen.

Szeiler und Skoric (2017, S. 7) kommen hinsichtlich des Sicherheitsempfindens auf ein ähnliches Ergebnis: Zwar befürworten Radfahrende grundsätzlich das Vorhandensein von Bodenmarkierungen, gleichzeitig fühlen sich Radfahrende ebenso wie Kfz-Führende aber nur mäßig sicher.

Bei Richter (2019) stand der Vergleich zwischen Radfahr- und Schutzstreifen im Fokus. Die Vor-Ort-Befragungen von 1.370 Radfahrenden ergab, dass Radfahrstreifen als sicherer wahrgenommen werden, als Schutzstreifen. Vor allem Schutzstreifen mit Breiten unter 1,50 m wurden als unsicher erachtet (Richter 2019, S. 71). Grundsätzlich werden breite Radfahrstreifen und Schutzstreifen jeweils von 86 % bzw. 88 % der Befragten regelmäßig genutzt, während dieser Anteil bei schmalen Anlagen nur bei je 72 % liegt (Richter 2019, S. 70). Als Gründe für fehlende Akzeptanz wurde von 50 % der Radfahrenden, die den Seitenraum nutzen, Sicherheitsbedenken genannt. Darüber hinaus gaben etwas mehr als 10 % der Radfahrenden auf Schutzstreifen an, diese aufgrund von auf dem Schutzstreifen haltenden und fahrenden Kfz nicht zu nutzen (Richter 2019, S. 70).

Zur Wirkung von Piktogrammen auf der Fahrbahn im nationalen Raum führten Koppers et al. (2021, S. 69 ff.) umfangreiche Befragungen (Vor-Ort, postalisch und Online) von insgesamt 5.038 Personen durch. Ganz generell zeigt sich, dass die Markierung von Piktogrammen von der Mehrzahl der Befragten als sinnvoll erachtet wird, wobei die Maßnahmen vor ihrer Umsetzung als sinnvoller eingeschätzt wurden (70 % der Befragten), als hinterher (58 % der Befragten). Dies wird damit begründet, dass die Befragten Maßnahmen in der Theorie erst einmal befürworten. Danach hätten sich die Befragten eher andere Maßnahmen, wie bspw. separate Radverkehrsanlagen gewünscht. Unabhängig davon hat sich das Sicherheitsempfinden der Radfahrenden von 3,1 auf 3,4 (1 = nicht sicher bis 5 = sehr sicher) erhöht. Neben dem o.g. Wunsch von separaten Radverkehrsanlagen wurde auch die Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit als Verbesserungsmaßnahme genannt.

Im internationalen Raum kommen Birk et al. (2004, S. 15) und Vasilev et al. (2017, S. 1103) zur Wirkung von Piktogrammen auf ähnliche Ergebnisse, auch wenn bei Vasilev et al. (2017) zu berücksichtigen ist, dass neben der Markierung der Piktogramme weitere Maßnahmen (Verengung der Fahrbahn, Reduzierung der v_{zul}) auf dem

untersuchten Streckenabschnitt umgesetzt wurden. Etwa zwei Drittel der in beiden Untersuchungen befragten Radfahrenden sind der Meinung, dass die Markierungen ihr Sicherheitsgefühl erhöhen. Zudem zeigen Vasilev et al. (2017, S. 1103), dass 60% der Befragten eine positive Veränderung hinsichtlich des Verhaltens der Kfz-Führenden gegenüber den Radfahrenden wahrnahmen. Vasilev et al. (2017, S. 1103) befragten darüber hinaus auch Kfz-Führende mit dem Resultat, dass etwa 60 % der Befragten eine Verbesserung des Verkehrsflusses wahrnehmen und etwa 70 % der Meinung sind, dass die Markierung der Piktogramme die Verkehrssicherheit erhöht.

Auch van Houten und Seiderman (2005, S. 11 ff.) können zeigen, dass sich Radfahrende mit Markierungen auf der Fahrbahn wohler fühlen als ohne, wobei Radfahrstreifen besser bewertet werden, als Piktogramme.

Im Gegensatz dazu kommen Daff (2013, S. 35) zu dem Ergebnis, dass etwas mehr als die Hälfte der Befragten (54%) der Meinung sind, dass die Markierung von Piktogrammen keinen Einfluss auf die Verkehrssicherheit hat.

4.3.3 Verhaltensweisen

Innerhalb dieses Kapitels werden Untersuchungen dokumentiert, die Befragungen zu Verhaltenseinschätzungen von Radfahrenden und Kfz-Führenden bei unterschiedlichen Mischverkehrsführungen durchgeführt haben. Grundsätzlich gehören dazu Befragungen

- zum Einfluss von parkenden Kfz (Schüller et al. 2020a),
- zum Vermeidungsverhalten (Schüller et al. 2020a; Chataway et al. 2014),
- zu Gründen für Störepfinden gegenüber Radfahrenden und aggressivem Verhalten zwischen Radfahrenden und Kfz-Führenden (Christmas 2010; Kaplan et al. 2019; Piatkowski et al. 2017; Schüller et al. 2020b) sowie
- zur Bedeutung von Fahrradpiktogrammen/ hinweisender Beschilderung und zum Einfluss derer auf das Verhalten der Radfahrenden sowie auf die Wahrnehmung von Interaktionen zwischen Radfahrenden und Kfz (Koppers et al. 2021; Birk et al. 2004; Furth et al. 2011; Høye et al. 2016; Vasilev et al. 2017).

Schüller et al. (2020a) untersuchen den Einfluss von ruhendem Verkehr auf das Verhalten von Radfahrenden auf Abschnitten mit Mischverkehr aber auch auf Radwegen. Da lediglich 70 Radfahrende befragt wurden, sind die Ergebnisse eher qualitativ zu bewerten. Es hat sich gezeigt, dass die Mehrzahl der befragten Radfahrenden mit erhöhter Aufmerksamkeit fahren, wenn parkenden Kfz am Fahrbahnrand vorhanden sind, und etwa die Hälfte mit erhöhtem seitlichen Abstand zu parkenden Kfz fährt. Dass Radfahrende Routen aufgrund von parkenden Kfz meiden, kann nicht festgestellt werden (Schüller et al. 2020a, S. 166).

Chataway et al. (2014, S. 38 ff.) stellen auf Basis von Online-Befragungen in Brisbane und Kopenhagen fest, dass vor allem das Alter und die Häufigkeit des Radfahrens einen Einfluss darauf hat, ob das Radfahren im Mischverkehr gemieden wird: So wird das Radfahren im Mischverkehr vor allem von älteren Radfahrenden, die häufig das Auto oder den ÖPNV nutzen, und Radfahrenden, die eher selten fahren, gemieden. Ein geringes Vermeidungsverhalten konnte hinsichtlich von erfahrenen Radfahrenden (> 3 Jahre regelmäßige Nutzung oder > 60 h/Monat) festgestellt werden.

Christmas (2010) versuchten auf Basis von Workshops (qualitativ) Gründe für das Störungsempfinden von Kfz-Führenden gegenüber von Radfahrenden auf der Straße zu ermitteln. Dabei zeigt sich, dass die meisten der Teilnehmenden ein ausgeprägtes Verständnis für Kfz-Führende haben, weil sie selbst auch Auto fahren. Im Gegensatz dazu besteht bei den meisten Kfz-Führenden ein eher negatives Bild von Radfahrenden. Dieses Bild ist vor allem von Einstellungsfehlern (häufige Regelmisachtung, fehlende Rücksicht für andere Verkehrsarten) gekennzeichnet. Gründe hierfür werden darin gesehen, dass Radfahrende kein Fahrtraining machen müssen, keine Fahrerlaubnis benötigen, nicht versichert sein müssen und keine Straßensteuern zahlen (Christmas 2010, S. 9). Auf ein ähnliches Ergebnis kommen auch Schüller et al. (2020b, S. 84 ff.): Auf die Frage warum sich Kfz-Führende von Radfahrenden gestört fühlen, antworten die meisten Befragten, dass sich Radfahrende nicht an die Regeln halten. Als weitere Gründe wurden eine geringe Geschwindigkeit der Radfahrenden, fehlender Platz, das

„zu weite“ Linksfahren auf dem Fahrstreifen sowie das Rechtsüberholen von Radfahrenden in der Annäherung von Knotenpunkten genannt.

Piatkowski et al. (2017) untersuchen Gründe von aggressivem Verhalten bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr, indem die Befragten (Online-Befragung) ihre Reaktion auf 3 fiktive Szenarien (Radfahrende halten nicht an einem Stopp-Schild, Radfahrende fahren mittig auf einem Fahrstreifen, Radfahrende fahren in der falschen Richtung in einer Einbahnstraße) einschätzen sollen. Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Wahrscheinlichkeit auf aggressives Verhalten ggü. den in den Szenarien beschriebenen Radfahrenden sinkt, je mehr die Befragten selbst Rad fahren. Darüber hinaus korrelieren aggressive Reaktionen damit, wie man sich selbst in den gezeigten Situationen verhält. Die Verhaltensnormen sind somit signifikant von den eigenen Erfahrungen geprägt. Im Einzelnen konnte gezeigt werden, dass die Nichtbefolgung von Regeln, das Tragen eines Helmes sowie das mittig auf dem Fahrstreifen fahren, die Wahrscheinlichkeit auf aggressive Reaktionen erhöht (Piatkowski et al. 2017, S. 144 ff.).

Eine interessante Erklärung für aggressives Verhalten von Kfz-Führenden gegenüber Radfahrenden liefern Kaplan et al. (2019, S. 56). So kann aggressives oder wütendes Fahren von Kfz-Führenden als maladaptive Bewältigungsstrategie auch auf Angst zurückgeführt werden. Demnach könnte ein Ansatz für die Verbesserung des sozialen Klimas bzw. zur Reduzierung der Dissonanz zwischen Radfahrenden und Kfz-Führenden im Mischverkehr sein, zu kommunizieren, dass auch Kfz-Führende ängstlich (hinsichtlich von Interaktionen mit Radfahrenden) sind. Zur Akzeptanz der Mischverkehrsführung von Radfahrenden ermitteln Kaplan et al. (2019, S. 55 ff.) einen Zusammenhang zu den Selbstkonzepten der Befragten, welche neben der Sicht auf sich selbst auch dadurch beeinflusst wird, wie die Radfahrenden glauben, dass die Kfz-Führenden sie wahrnehmen: Glauben die Radfahrenden, dass sie als verletzlich wahrgenommen werden, so fühlen sie sich auch selbst eher verletzlich und waren weniger geneigt im Mischverkehr zu fahren. Glauben Radfahrende hingegen, dass sie als durchsetzungsfähig wahrgenommen werden, nehmen sie sich selbst durchsetzungsfähiger wahr und sind in der Folge eher geneigt im Mischverkehr zu fahren. Kaplan et al. (2019, S. 56) schlussfolgern, dass für die Erhöhung der Akzeptanz von Mischverkehrsführungen neben infrastrukturellen Maßnahmen auch das soziale Klima, beeinflusst durch die Selbstkonzepte, erhöht werden sollte.

Auf ein ähnliches Ergebnis kommen auch Høye et al. (2016). Die in dieser Pilotstudie evaluierte hinweisende Beschilderung zur gemeinsamen Benutzung der Straße von Radfahrenden und Kfz sollte nicht nur die Akzeptanz erhöhen bzw. die Führungsform verdeutlichen, sondern auch ein positives (freundlich und durchsetzungsfähig) Bild von Radfahrenden vermitteln. Die Vor-Ort Befragungen innerhalb dieser Vorher-Nachher-Untersuchung ergibt, dass weniger Radfahrende ein schlechtes Gewissen haben, andere zu behindern, weniger Radfahrende negative Reaktionen von Kfz-Führenden erlebten, weniger Radfahrende zu dicht überholt werden und mehr Radfahrende Kfz-Führende als rücksichtsvoll wahrnahmen. Hinsichtlich der Kfz-Führenden zeigt sich, dass weniger Kfz-Führende über Probleme beim Überholen von Radfahrenden berichten, mehr Kfz-Führende Radfahrende als rücksichtsvoll wahrnahmen und mehr Kfz-Führende hinter Radfahrenden fahren anstatt sie zu überholen (Høye et al. 2016, S. 4 ff.).

Zur Bedeutung von Fahrradpiktogrammen auf das Verhalten der Radfahrenden im nationalen Raum ermitteln die Vor-Ort-Befragungen von Koppers et al. (2021), dass sich zwar der Anteil der Radfahrenden verringert die „oft“ oder „immer“ auf dem Gehweg fahren (Koppers et al. 2021, S. 88), die Mehrzahl der befragten Radfahrenden allerdings angeben, dass sich das Flächenwahlverhalten nach der Markierung der Piktogramme nicht verändert hat (Koppers et al. 2021, S. 91). Der Anteil der Radfahrenden, die angeben, den Fahrstreifen mittig zu nutzen, erhöhte sich leicht (Koppers et al. 2021, S. 88). Die Geschwindigkeiten und Überholabstände der Kfz-Führenden empfinden die Radfahrenden sowohl vor als auch nach der Markierung der Piktogramme als etwas zu schnell und zu gering (Koppers et al. 2021, S. 102 ff.). Ein etwas anderes Ergebnis zeigen die postalische und die Online-Befragung: So berichtet ein Großteil der Befragten, dass sie keine Veränderung der Position der Radfahrenden auf dem Fahrstreifen feststellen können. Allerdings nehmen 17 % der Befragten eine Reduzierung der Geschwindigkeiten der Kfz seit dem Aufbringen der Piktogramme wahr (Koppers et al. 2021, S. 102 ff.).

Auf etwas andere Ergebnisse kommen Birk et al. (2004), Furth et al. (2011) und Vasilev et al. (2017) im internationalen Raum. 33 % der bei Birk et al. (2004, S. 15) und etwa die Hälfte der Befragten Radfahrenden bei Vasilev et al. (2017, S. 1101), geben an, den Fahrstreifen nach Markierung der Piktogramme mittig zu befahren. Bei Furth et al. (2011, S. 11) geben etwa 40 % der Radfahrenden an, ermutigt zu werden mittig auf dem Fahrstreifen zu fahren. Zudem sind 35 % der befragten Radfahrenden von Birk et al. (2004, S. 16) der Meinung, dass die Markierung das Fahrerverhalten der Kfz-Führenden verbessert – bei Vasilev et al. (2017, S. 1103) beträgt dieser Anteil etwa 60 %. Außerdem hat sich der Anteil der Radfahrenden verringert (von 41 % auf 28 %), die angeben, mit zu geringem Abstand von Kfz überholt zu werden (Vasilev et al. 2017, S. 1103). Die Befragungen von Kfz-Führenden durch Vasilev et al. (2017, S. 1103) können dieses Ergebnis insofern stützen, dass drei Viertel der Kfz-Führenden der Aussage zustimmen, Radfahrende erst überholen zu können, wenn kein Gegenverkehr vorliegt. Furth et al. (2011, S. 12) können ebenfalls zeigen, dass Kfz-Führende (zumindest in ihrer Wahrnehmung) nach Markierung der Piktogramme rücksichtsvoller Überholen (50 % der Befragten).

Daff (2013, S. 36) befragten zur Bedeutung und Interpretation der Piktogramme mit dem Resultat, dass 37 % der Befragten die Bedeutung der Piktogramme darin sahen, die Kfz-Führenden auf Radfahrende auf der Straße hinzuweisen. Im Allgemeinen werden die Piktogramme als eine Maßnahme gesehen, die das Recht von Radfahrenden auf der Fahrbahn stärken.

4.4 Schlussfolgerungen & Forschungsfragen

Die Literaturanalyse zum Unfallgeschehen hat gezeigt, dass Mischverkehrsführungen nicht generell unsicherer sind, als andere Radverkehrsführungsformen. Bei der Interpretation sind allerdings zwei Aspekte zu berücksichtigen: Zum einen kommen die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen grundsätzlich in anderen verkehrlichen Situationen zur Anwendung als Schutzstreifen, Radfahrstreifen oder Radwege (vgl. Kapitel 3.1). Zum anderen unterscheidet sich in unterschiedlichen Untersuchungen die Abgrenzung zwischen Streckenabschnitten und Knotenpunkten bzw. die betrachteten Unfallkollektive. Dabei zeichnet sich die Tendenz ab, dass Radverkehrsunfälle bei Mischverkehrsführungen vor allem eine andere Struktur aufweisen. Hinsichtlich der Sicherheitswirkung unterschiedlicher Mischverkehrsführungen (ohne Markierung, mit Schutzstreifen, mit Piktogrammen) lässt sich schlussfolgern, dass

- ein valider Vergleich zwischen den Sicherheitsgraden der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Abgrenzungen zwischen Knotenpunkten und Streckenabschnitten sowie unterschiedlicher Unfallkollektive auf Basis der vorhandenen Studien nicht möglich ist.
- zum Einfluss von Piktogrammen im nationalen Raum lediglich eine Untersuchung vorliegt, welche aufgrund unterschiedlicher Abgrenzungen und Methodik (Vorher-Nachher-Vergleich) nur bedingt mit anderen Untersuchungen vergleichbar ist.

Das Unfallgeschehen wird abgesehen von den Radverkehrsführungsformen von einer Reihe weiterer gestalterischer Aspekte beeinflusst. Neben der Verkehrsstärke des Rad- und Kfz-Verkehrs, welcher im nationalen Raum vor allem durch die häufige Verwendung von Unfallraten ein proportionaler Einfluss auf das Unfallgeschehen unterstellt wird, sind die zulässige Geschwindigkeit, ruhender Verkehr, Sicherheitsräume zu parkenden Kfz, die Dichte von Anschlussknotenpunkten oder Grundstückszufahrten, das Vorhandensein von Straßenbahngleisen, eine intensive Umfeld-/Randnutzung sowie die Breite der Fahr- und Schutzstreifen zu nennen. Mit Ausnahme von Schüller et al. (2020b) wurden die Einflussgrößen in anderen Untersuchungen mit konkretem Mischverkehrsbezug qualitativ auf Basis von deskriptiven Analysen ermittelt. Auf Basis des Kenntnisstandes ist zu schlussfolgern, dass

- eine vollständige Beschreibung des Unfallgeschehens unterschiedlicher Mischverkehrsführungen mit Berücksichtigung der Verkehrsstärke sowie mehrerer potentiell sicherheitsrelevanter Infrastruktureigenschaften die Anwendung multivariater statistischer Verfahren notwendig macht.

- die Rad- und Kfz-Verkehrsstärke einen positiv degressiven Einfluss auf das Unfallgeschehen hat, welcher sich nur auf Basis multivariater Modelle unter der Verwendung von Verteilungen aus der Exponentialfamilie präziser beschreiben lässt.
- der Einfluss der Fahrbahnbreite bei Mischverkehr ohne Markierung bisher nicht vor dem Hintergrund der Vorgaben aus FGSV (2010a, S. 22) und FGSV (2006, S. 83) hinsichtlich der kritischen Fahrbahnbreiten zwischen 6,00 m und 7,00 m (vgl. Kapitel 3.1) beschrieben wird.
- der Einfluss von Sicherheitstrennstreifen zu parkenden Kfz (vor allem bei Schutzstreifen) bisher nicht quantitativ bestimmt wurde.
- der nationale Kenntnisstand zum Einfluss von Piktogrammen auf die Verkehrssicherheit keine weiteren Einflussgrößen berücksichtigt.

Der Kenntnisstand zum Verhalten hat ergeben, dass bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr Interaktionen von Radfahrenden, analog zu den Erkenntnissen zum Unfallgeschehen, vorrangig mit ein- und abbiegenden, haltenden und ein- und ausparkenden Kfz sowie aufgrund von Dooring-Situationen auftreten. Die seitlichen Abstände zu parkenden Kfz/zum Fahrbahnrand (Außenkanten) liegen bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen in einem kritischen Bereich ($< 0,75$ m, „Dooring-Zone“). Zur Wirkung von Piktogrammen zeigt sich fast ausnahmslos die Tendenz, dass sich die seitlichen Abstände vergrößern (um etwa 0,1 m bis 0,2 m). Die Überholabstände sind auf Schutzstreifen gegenüber Mischverkehr ohne Markierung geringer, was darauf zurückgeführt werden kann, dass sich Kfz-Führende an der Markierung orientieren. Piktogrammen wird wiederum nahezu ausnahmslos ein erhöhender Einfluss auf die Überholabstände nachgewiesen (um etwa 0,1 m bis 0,6 m). Ein wesentlicher Aspekt vor dem Hintergrund der Attraktivierung des Radverkehrs ist, ob und unter welchen Bedingungen Mischverkehrsführungen von einem hohen Anteil Radfahrender akzeptiert wird. Die Analyse des Kenntnisstandes zeigt für die Akzeptanz der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen oder Piktogramme eine sehr große Streuung. Daraus ist zu schlussfolgern, dass

- die Akzeptanz von Mischverkehrsführungen neben den unterschiedlichen Führungsformen von weiteren Merkmalen beeinflusst wird.
- eine multivariate Analyse zur Akzeptanz bisher nur für die Führung im Mischverkehr ohne Markierung vorliegt.
- die Ermittlung von Einflussgrößen auf die Akzeptanz auch entscheidende Hinweise für die Attraktivierung von unterschiedlichen Mischverkehrsführungen geben kann.

Die Analyse der Befragungen hat gezeigt, dass Radfahrende prinzipiell Radverkehrsanlagen präferieren bzw. als sicherer empfinden. Die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr wird nach vorliegendem Kenntnisstand nur in Wohnstraßen oder bei geringen Kfz-Geschwindigkeiten von der Mehrzahl als sicher empfunden. Hinsichtlich von Schutzstreifen hat sich gezeigt, dass Radfahrende Markierungslösungen zwar durchaus befürworten, die subjektive Sicherheit auf Schutzstreifen generell aber eher nur als mäßig wahrgenommen wird. Piktogramme auf der Fahrbahn können zum einen das Sicherheitsempfinden der Radfahrenden erhöhen und zum anderen Kfz-Führende zu rücksichtsvollerem Verhalten veranlassen. Als weitere Einflussfaktoren auf die subjektive Sicherheit bei Mischverkehrsführungen haben sich vor allem die zulässige Geschwindigkeit, das Vorhandensein von parkenden Kfz und die Kfz-Verkehrsstärke ergeben. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass

- die subjektive Sicherheit von Merkmalen beeinflusst wird, die auch hinsichtlich des Unfallgeschehens und der Akzeptanz eine Relevanz besitzen.
- die Erkenntnisse zur subjektiven Sicherheit und präferierten Radverkehrsführungsformen bei der Ableitung von Empfehlungen zur Gestaltung akzeptierter und sicherer Mischverkehrslösungen herangezogen werden sollten.

Aus dem dokumentierten Kenntnisstand sowie der abgeleiteten Schlussfolgerungen ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie ist die objektive Verkehrssicherheit unterschiedlicher Mischverkehrsführungen (ohne Markierung, mit Schutzstreifen, mit Piktogrammen) unter Berücksichtigung der Exposition sowie weiterer signifikanter Einflussgrößen zu bewerten?
- Welchen Einfluss haben kritische Profile (Fahrbahnbreite = 6,00 m bis 7,00 m) bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen (vor dem Hintergrund der Vorgaben aus FGSV (2010a) und FGSV (2006)) sowie Sicherheitstrennstreifen auf Abschnitten mit Schutzstreifen auf das Unfallgeschehen?
- Wie ist die Akzeptanz unterschiedlicher Mischverkehrsführungen (ohne Markierung, mit Schutzstreifen, mit Piktogrammen) unter der Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen zu bewerten?
- Welche Erkenntnisse für eine sichere und akzeptierte Führung des Radverkehrs im Mischverkehr lassen sich zusammenfassend ableiten, wobei gleichzeitig Aspekte der subjektiven Sicherheit berücksichtigt werden?

5 DATEN

5.1 Infrastruktur

5.1.1 Untersuchungsabschnitte

Da innerhalb vorliegender Untersuchung unterschiedliche Radverkehrsführungsformen der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr im Fokus stehen, werden Abschnitte der freien Strecke betrachtet. Inwiefern diese von Knotenpunkten abgegrenzt werden, wird in Kapitel 5.1.2 erläutert. Zur Beantwortung der in Kapitel 4.4 abgeleiteten Forschungsfragen wurden Daten aus vier unterschiedlichen Forschungsprojekten (Schüller et al. 2020b; Ohm et al. 2015; Richter 2019; Koppers et al. 2021) zur Verfügung gestellt, die innerhalb vorliegender Arbeit vereinheitlicht, plausibilisiert und anschließend zusammenfassend ausgewertet werden. Im Resultat liegen der Untersuchung Daten von insgesamt 207 Streckenabschnitten aus 24 Städten zugrunde, die sich wie folgt aufteilen:

- 147 Streckenabschnitte mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne visuelle Abgrenzungen (Schüller et al. 2020b)
- 13 Streckenabschnitte mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne visuelle Abgrenzungen und 15 Streckenabschnitte mit Schutzstreifen (Ohm et al. 2015)
- 24 Streckenabschnitte mit Schutzstreifen (Richter 2019) sowie
- 8²¹ Streckenabschnitte mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr und der Markierung von Piktogrammen ohne nicht benutzungspflichtige Radwege (Koppers et al. 2021)

Die Vorauswahl der Untersuchungsabschnitte erfolgte in allen Untersuchungen über Anfragen bei Kommunen. Nachfolgend wurden die Untersuchungsabschnitte nach den in Tab. 5-1 dargestellten Kriterien ausgewählt. Maßgebend waren dabei vor allem die Radverkehrsführungsform, die Straßenklasse, die Bedeutung des Abschnittes für den Radverkehr, die nutzbare Fahrbahnbreite sowie eine Mindestlänge der Abschnitte. Tab.-A 2 (siehe Anlage 2) enthält alle Untersuchungsabschnitte im Überblick unter Angabe der für die Auswahl relevanten Kriterien sowie der DTV-Werte für Rad-, Kfz- und Fußverkehr (vgl. Kapitel 5.2.1 bis 5.2.4).

Tab. 5-1 Kriterien für die Auswahl der Untersuchungsabschnitte in Schüller et al. (2020b), Ohm et al. (2015), Richter (2019) und Koppers et al. (2021)

Unter- suchung	Kriterien Auswahl Untersuchungsabschnitte					
	Führungsform	Straßenklasse	Bedeutung Radverkehr	nutzbare Fahrbahnbreite ²²	Streckenlänge	Weitere Kriterien
Schüller et al. (2020b, S. 22 ff.)	Mischverkehr	Hauptverkehrsstraße (innerorts)	Vorrangrouten für den Radverkehr/ Teil des Radverkehrsnetzes	zweistreifig: 5,00 m bis 8,00 m vierstreifig: 5,50 m bis 7,00 m (je Richtungsfahrbahn)	≥ 150 m	Lage im Netz geringe Längsneigung hohe Nachfrage Radverkehr
Ohm et al. (2015, S. 27 ff.)	Mischverkehr Schutzstreifen	Hauptverkehrsstraße (innerorts)	-	zweistreifig: 6,00 m bis 8,50 m vierstreifig: 5,50 m bis 7,00 m (je Richtungsfahrbahn)	-	Breite Schutzstreifen parkende Kfz 5.000 bis 9.999 Kfz/24 h und ≥ 10.000 Kfz/24 h
Richter (2019, S. 39)	Schutzstreifen	-	-	-	≥ 200 m	-
Koppers et al. (2021, S. 22 ff.)	Piktogramme	Hauptverkehrsstraße oder Sammelstraße (innerorts)	Vorrangrouten für den Radverkehr/ Teil des Radverkehrsnetzes	ein- oder zweistreifige schmale Querschnitte: 5,80 m bis 7,20 m ²³	≥ 300 m	keine Gleise parkende Kfz 2.000 bis 20.000 Kfz/24h

²¹ 3 der 8 Abschnitte weisen jeweils auf einer Straßenseite Piktogramme und Schutzstreifen auf. Diese können innerhalb der Unfallanalyse nicht berücksichtigt werden, da gesamte Querschnitte betrachtet werden (vgl. Kapitel 5.3 und 8.2). Die Analyse der Akzeptanz erfolgt differenziert nach den einzelnen Straßenseiten (vgl. Kapitel 5.2.1 und 7.1).

²² Ohne Flächen für den ruhenden Verkehr.

²³ Eine konkrete Vorgabe hinsichtlich der Breiten ist durch Koppers et al. 2021 nicht dokumentiert. Hier dargestellt ist die Bandbreite der in vorliegender Untersuchung berücksichtigten Abschnitte.

5.1.2 Räumliche Abgrenzung

Die Untersuchungsabschnitte der unterschiedlichen Untersuchungen sowie entsprechende Merkmale zur Charakterisierung derer, wurden in einer GIS-Datenbank hinterlegt, aufbereitet und plausibilisiert. Dabei wurde für alle Untersuchungsabschnitte in Anlehnung an Schüller et al. (2020b, S. 23) eine Mindestlänge von 150 m vorausgesetzt (vgl. Tab. 5-1). Das wird damit begründet, dass das Unfallgeschehen auf sehr kurzen Streckenabschnitten auch bei geringer absoluter Unfallanzahl in Relation zur Streckenlänge stark überschätzt werden kann, was wiederum zu Problemen in der statistischen Modellschätzung führen kann. Für die weitere räumliche Abgrenzung sind vor allem zwei Aspekte relevant:

- Homogenität der Streckenabschnitte hinsichtlich infrastruktureller und betrieblicher Merkmale
- Abgrenzung Knotenpunkte und Abschnitte der freien Strecke

Die Homogenität der Streckenabschnitte ist von hoher Relevanz um Aussagen zur Wirkung von Infrastrukturmerkmalen auf die Akzeptanz und Verkehrssicherheit treffen zu können. In Anlehnung an Aurich et al. (2012, S. 57 ff.), Aurich (2012, S. 51 ff.) und Schüller et al. (2020b, S. 23) erfolgt die Definition homogener Streckenabschnitte anhand der folgenden Merkmale, welche sich innerhalb eines Untersuchungsabschnittes nicht unterscheiden sollten:

- Radverkehrsführungsform (Mischverkehr, Schutzstreifen, Piktogramme)
- Vorhandensein von ruhendem Verkehr (einseitig, beidseitig, nicht vorhanden)
- Anzahl der Fahrstreifen
- Breite der Fahrbahn
- zulässige Geschwindigkeit (50 km/h, 30 km/h, temporär 30 km/h)
- Straßenbahngleise (vorhanden, nicht vorhanden)
- bauliche Mitteltrennung (vorhanden, nicht vorhanden)

Durch die Abgrenzung der Untersuchungsabschnitte von Knotenpunkten werden grundsätzlich drei Aspekte berücksichtigt:

- Unterschiedliche Unfallcharakteristik an Knotenpunkten im Vergleich zu Strecken (vgl. Kapitel 4.1.3)
- relevante Veränderung der Verkehrsstärke an Hauptverkehrsstraßenknotenpunkten
- Einfluss von Hauptverkehrsstraßenknotenpunkten auf das Unfallgeschehen angrenzender Streckenabschnitte

Da sich an Hauptverkehrsstraßenknotenpunkten (Knotenpunkt zwischen 2 Hauptverkehrsstraßen) die Verkehrsstärke entlang eines Straßenzuges deutlich verändert, wurden die Untersuchungsabschnitte (unabhängig von den o.g. Merkmalen) an diesen begrenzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Hauptverkehrsstraßenknotenpunkte einen nachweisbaren unfallerhöhenden Einfluss auf das Unfallgeschehen angrenzender Streckenabschnitte besitzt (u.a. Aurich et al. 2012, S. 65; Baier et al. 2007, S. 16; Berger 2008, S. 56 ff.). Dies ist damit zu begründen, dass im Annäherungsbereich von Hauptverkehrsstraßenknotenpunkten Fahrstreifenwechsel und Haltevorgänge zunehmen und damit im Vergleich zur freien Strecken auch die Konfliktpunkte zunehmen. Weitere Einflussfaktoren im Bereich von Annäherungsbereichen sind die Änderung des Querschnittes durch Addition von Abbiegefahrstreifen oder Haltestellen des ÖPNV. Aus diesem Grund werden die Untersuchungsabschnitte bereits am Annäherungsbereich (Längenausdehnung = 50 m) von Hauptverkehrsstraßenknotenpunkten begrenzt (siehe Bild 5-1).

Zur Vermeidung zu kurzer Längen der Untersuchungsabschnitte werden die Untersuchungsabschnitte an Anschlussknotenpunkten (Knotenpunkte zwischen einer Hauptverkehrsstraße und einer Straße im Nebennetz) nicht abgegrenzt (vgl. Bild 5-1). Um dennoch die unterschiedliche Unfallcharakteristik an Knotenpunkten zu berücksichtigen, wird die Anzahl der Anschlussknotenpunkte sowie der zuführenden Zufahrten als Merkmal der Untersuchungsabschnitte berücksichtigt (vgl. Kapitel 5.1.3).

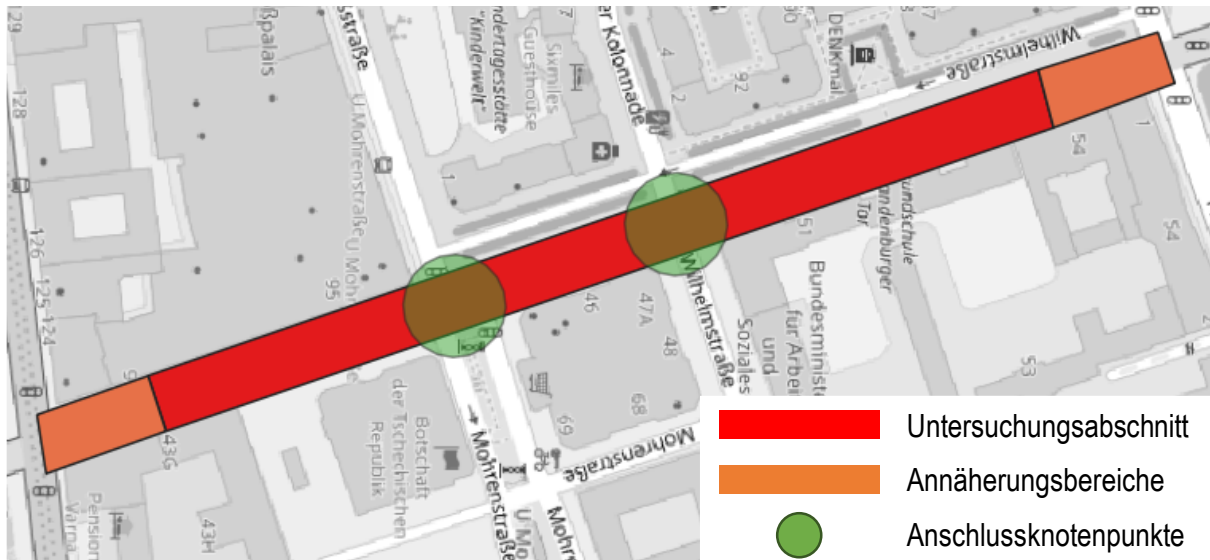


Bild 5-1 Beispiel räumliche Abgrenzung Untersuchungsabschnitte (eigene Darstellung; Kartengrundlage: Openstreetmap)

5.1.3 Erhobene Merkmale

Aufbauend auf dem dokumentierten Kenntnisstand zu den technischen Regelwerken und Empfehlungen (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2) und zum aktuellen Forschungsstand (vgl. Kapitel 4.1.1; 4.2.1; 4.3.1 und 4.4) sowie in Anlehnung an Schüller et al. (2020b, S. 23) wurden für alle Untersuchungsstrecken die in Tab. 5-2 dargestellten Merkmale in der angegebenen Einheit bzw. Ausprägung erhoben. Tab. 5-2 enthält zudem Informationen zum Messniveau (vgl. Kapitel 6.1), zur Erhebung sowie die entsprechende Referenz zum Kenntnisstand. Grundlage bildeten vor allem die von Schüller et al. (2020b, S. 23) erhobenen Daten, welche die meisten Infrastrukturmerkmale bereits enthielten. Im Rahmen der Zusammenführung und Plausibilisierung der Daten (vgl. Kapitel 5.1.1) wurden insbesondere für die Untersuchungsabschnitte aus Ohm et al. (2015), Richter (2019) und Koppers et al. (2021) Infrastrukturdaten vollständig oder teilweise nacherhoben. Einen Überblick welche Infrastrukturdaten im Rahmen vorliegender Untersuchung nacherhoben wurden, zeigt Anlage 3). Zudem wurden für alle Untersuchungsabschnitte die folgenden Merkmale vollständig neu erhoben:

- Länge des ruhenden Verkehrs (L_{RV}): Der Kenntnisstand zur Forschung hat gezeigt, dass vor allem dem Vorhandensein von ruhendem Verkehr ein Einfluss auf das Unfallgeschehen nachgewiesen wird (siehe Kapitel 4.1.4). Allerdings wird in den dokumentierten Untersuchungen nicht differenziert, über welche Länge sich der ruhende Verkehr erstreckt, so dass in der Folge nur die Empfehlung abgeleitet werden kann, dass ruhender Verkehr bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr nicht verträglich ist. Um ggf. differenziertere Einflüsse abzuleiten, wird auf Basis dieses Merkmals der Zusammenhang zwischen Anteil des ruhenden Verkehrs im Vergleich zur Gesamtlänge des Abschnittes und dem Unfallgeschehen geprüft.
- Mögliche Gründe für Anordnung v_{zul} nach § 45. Abs. 9, Punkt 6: U.a. durch Schüller et al. (2020b, S. 64) wird gezeigt, dass Ergebnisse hinsichtlich der Sicherheitswirkung einer v_{zul} von 30 km/h nicht immer eindeutig interpretierbar sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine v_{zul} von 30 km/h neben den in § 45. Abs. 9, Punkt 6 aufgeführten Bedingungen auch angeordnet wird, wenn eine Gefahrenlage (bspw. eine signifikant erhöhte Unfallrate gegenüber ähnlichen Abschnitten) nachweisbar ist (vgl. Kapitel 2). Das bedeutet wiederum, dass die Sicherheitswirkung einer v_{zul} von 30 km/h für solche Strecken nicht abgebildet werden kann, da vermutlich weitere ortsspezifische Merkmale zu einem erhöhten Unfallgeschehen führen. Um diesen Einfluss näherungsweise auszuschließen, wurde erhoben, ob im unmittelbaren Umfeld des Untersuchungsabschnittes Kindergärten, -tagesstätten, Schulen, Alten- und Pflegeheimen oder Krankenhäuser vorhanden sind.
- Länge bewirtschafteter Grünflächen (L_{GR}): Der Umfeldfaktor nach Schüller (2010, S. 80) wird um diese Merkmal erweitert, da davon ausgegangen wird, dass Ziele wie Spielplätze, Parks und Friedhöfe ebenfalls das Aufkommen nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmender beeinflusst (siehe Anlage 4).

Tab. 5-2 Erhobene Infrastrukturmerkmale im Überblick

Merkmal	Codierung	Einheit	Ausprägung	Messniveau	Art der Erhebung	Bemerkung zur Erhebung	Referenz Kenntnisstand
nutzbare Fahrbahnbreite	B _{FB}	m	-	metrisch	Vor-Ort (stichprobenhaft) Luftbildanalyse	Breite zwischen ruhendem Verkehr oder Schutzstreifen (wenn vorhanden)	Kapitel 3.1 Kapitel 4.1.4
Anzahl Fahrstreifen	N _{FS}	-	-	metrisch	Vor-Ort (stichprobenhaft) Luftbildanalyse	-	Kapitel 3.1 Kapitel 4.1.4
Radverkehrsführungsform	R _{VF}	-	0: Mischverkehr 1: Piktogramme (beidseitig) 2: SSF einseitig 3: SSF beidseitig	nominal	Informationen von Städten und Kommunen (vgl. Schüller et al. 2020b, Ohm et al. 2015, Richter 2019, Koppers et al. 2021)	-	Kapitel 4.1.2 Kapitel 4.2.3
Breite Schutzstreifen	B _{SSF}	m	-	metrisch	Informationen von Städten und Kommunen (vgl. Ohm et al. 2015, Richter 2019)	-	Kapitel 4.1.2 Kapitel 4.2.3
Breite Sicherheitsraum zum ruhenden Verkehr	B _{RVFSich}	m	-	metrisch	Vor-Ort (stichprobenhaft) Luftbildanalyse	Breite Sicherheitsraum markiert bei Schutzstreifen, Abstand Mitte Piktogramm zu Fahrbahnrand/parkenden Kfz	Kapitel 4.1.2
Ruhender Verkehr	r _V	-	0: kein r _V 1: einseitig 2: einseitig alternierend 3: beidseitig	nominal	Vor-Ort (stichprobenhaft) Luftbildanalyse	Vorhandensein von ruhendem Verkehr	Kapitel 4.1.4
Art der Anordnung des ruhenden Verkehrs	r _V -Art	-	0: kein r _V 1: Längs 2: Schräg 3: Senkrecht 4: Längs/Schräg 5: Längs/Senkrecht	nominal	Vor-Ort (stichprobenhaft) Luftbildanalyse	-	Kapitel 4.1.4
Lage des ruhenden Verkehrs	Lage _{rV}	-	0: kein 1: Fahrbahn 2: Fahrbahn markiert 3: Fahrbahn baulich 4: Seitenraum 5: Fahrbahn/Seitenraum (Zeichen 315 StVO)	nominal	Vor-Ort (stichprobenhaft) Luftbildanalyse	grundsätzliche Unterscheidung nach ruhendem Verkehr auf Fahrbahnniveau oder im Seitenraum (Trennung mit Bord), ruhender Verkehr auf der Fahrbahn kann ohne weitere Maßnahmen, mit markierten oder baulich (bspw. unterschiedliche Oberflächen, vorgezogene Seiträume) angelegten Flächen realisiert werden	Kapitel 4.1.4
Länge ruhender Verkehr	L _{rV}	m	-	metrisch	Luftbildanalyse	Länge auf dem Untersuchungsabschnitt für die Ermittlung eines Anteils	bisher nicht berücksichtigt
Breite Gehweg	B _{GW}	m	-	metrisch	Vor-Ort (stichprobenhaft) Luftbildanalyse	-	Kapitel 4.2.3
zulässige Geschwindigkeit	v _{zul}	km/h	0: 50 km/h 1: 40 km/h 2: 30 km/h, 22-6 Uhr 3: 30 km/h, 6-18 Uhr 4: 30 km/h	nominal	Vor-Ort, Informationen von Städten und Kommunen (vgl. Schüller et al. 2020b, Ohm et al. 2015, Richter 2019, Koppers et al. 2021), OSM	-	Kapitel 4.1.4 Kapitel 4.2.3
mögliche Gründe für Anordnung v _{zul} nach § 45. Abs. 9, Punkt 6	§ 45. Abs. 9	-	0: nein 1: ja	nominal	OSM	Kindergärten, -tagesstätten, Schulen, Alten- und Pflegeheimen oder Krankenhäuser mit Zugang zum Untersuchungsabschnitt	bisher nicht berücksichtigt
Verkehrszeichen Gehweg	VZ _{GW}	-	0: Gehweg 1: Gehweg "Radverkehr frei", einseitig 2: Gehweg "Radverkehr frei", beidseitig	nominal	Vor-Ort, Informationen von Städten und Kommunen (vgl. Schüller et al. 2020b, Ohm et al. 2015, Richter 2019, Koppers et al. 2021),	Zusatzzeichen 1022-10 StVO	Kapitel 4.2.3

Merkmal	Codierung	Einheit	Ausprägung	Mess-niveau	Art der Erhebung	Bemerkung zur Erhebung	Referenz Kenntnisstand
Mitteltrennung	MT	-	0: keine 1: markiert 2: baulich	nominal	Luftbildanalyse	Mitteltrennung zwischen den Fahrtrichtungen	Kapitel 3.1
Gleise im Mischverkehr	Gleise	-	0: nein 1: ja	nominal	Luftbildanalyse	Gleise auf dem rechten Fahrstreifen	Kapitel 4.1.4
Anzahl Bushaltestellen	N _{BusHST}	-	-	metrisch	Luftbildanalyse	differenziert erhoben nach Haltestellentyp (Fahrbahnrand, Kap, Bucht)	bisher kein nachweisbarer Einfluss auf Unfallzahl und Akzeptanz
Anzahl Straßenbahnhaltestellen	N _{StrabHST}	-	-	metrisch	Luftbildanalyse	differenziert erhoben nach Haltestellentyp (Fahrbahnrand, Fahrbahn mit und ohne Zeitinsel, Mittellage, überfahr-bares Kap, Seitenlage)	bisher kein nachweisbarer Einfluss auf Unfallzahl und Akzeptanz
Anzahl Anschlussknotenpunkte Lichtsignalanlage	N _{AKP,LSA}	-	-	metrisch	Luftbildanalyse	lichtsignalgeregelte Anschlussknotenpunkte	Kapitel 4.1.4
Anzahl Anschlussknotenpunkte Vorfahrtzeichen	N _{AKP,VZ}	-	-	metrisch	Luftbildanalyse	vorfahrtzeichengeregelte Anschlussknotenpunkte	Kapitel 4.1.4
Anzahl Knotenpunktarme	N _{KPA}	-	-	metrisch	Luftbildanalyse	Summe aller zuführenden Straßen an Anschlussknotenpunkten auf dem Untersuchungsabschnitt	Kapitel 4.1.4
Anzahl Querungsanlagen	N _{QA}	-	-	metrisch	Luftbildanalyse	differenziert nach Fahrbahnteiler, Fußgänger-LSA, Fußgängerüberweg	bisher kein nachweisbarer Einfluss auf Unfallzahl und Akzeptanz
Anzahl Grundstückszufahrten Wohnen	N _{Zf, W}	-	-	metrisch	Luftbildanalyse	Grundstückszufahrten für ausschließlich private Nutzung	Kapitel 4.1.4
Anzahl Grundstückszufahrten Geschäftlich	N _{Zf, G}	-	-	metrisch	Luftbildanalyse	bspw. Supermärkte, Tankstellen, öffentliche Parkplätze	Kapitel 4.1.4
Länge Streckenabschnitt	L _{ges}	m	-	metrisch	Luftbildanalyse	-	Exposition
Länge Wohnbebauung	L _W	m	-	metrisch	Luftbildanalyse	Randnutzung für Hochrechnung Radverkehrszählung (siehe Kapitel 5.2.2) und Ermittlung Umfeldfaktor (siehe Anlage 4)	Kapitel 4.1.4
Länge Wohnbebauung mit Geschäftsbesatz	L _{WG}	m	-	metrisch	Luftbildanalyse	Randnutzung für Hochrechnung Radverkehrszählung (siehe Kapitel 5.2.2) und Ermittlung Umfeldfaktor (siehe Anlage 4)	Kapitel 4.1.4
Länge Geschäftsbesatz	L _G	m	-	metrisch	Luftbildanalyse	Randnutzung für Hochrechnung Radverkehrszählung (siehe Kapitel 5.2.2) und Ermittlung Umfeldfaktor (siehe Anlage 4)	Kapitel 4.1.4
Länge sonstige gewerbliche Nutzung	L _{SO}	m	-	metrisch	Luftbildanalyse	Randnutzung für Ermittlung Umfeldfaktor (siehe Anlage 4)	Kapitel 4.1.4
Länge bewirtschaftete Grünflächen (Parks, Spielplätze, Friedhöfe)	L _{GR}	m	-	metrisch	Luftbildanalyse	Randnutzung für Ermittlung Umfeldfaktor (siehe Anlage 4)	bisher nicht berücksichtigt
Umfeldfaktor	UF	-	-	metrisch	Luftbildanalyse	Ermittlung aus erhobener Randnutzung (siehe Anlage 4)	Kapitel 4.1.4 Kapitel 4.2.3

5.2 Verkehrsstärke

5.2.1 Erhebung

Wie Kapitel 4.1.4 zeigt, haben sowohl die Rad- als auch die Kfz-Verkehrsstärke einen Einfluss auf das Radverkehrsunfallgeschehen. Zudem sind zur Ermittlung der Akzeptanz die Verkehrsstärke des Radverkehrs differenziert nach Fahrtrichtung und Flächennutzung (Fahrbahn, Gehweg) von elementarer Bedeutung. Die Verkehrsstärke des Fußverkehrs kann wiederum einen Einfluss auf die Gehwegnutzung von Radfahrenden haben (Zweibrücken und Känel 1999, S. 62).

Die Erhebung der Rad-, Kfz- und Fußverkehrsstärken auf den Untersuchungsabschnitten von Schüller et al. (2020b) und Ohm et al. (2015) erfolgte auf Basis von Videomessungen. Bei Richter (2019) erfolgte die Erhebung der Rad- und Kfz-Verkehrsstärke ebenfalls auf Basis von Videomessungen – Fußverkehrsstärken wurden nicht erhoben. Koppers et al. (2021) erhoben Rad- und Fußverkehrsstärken auf Basis von Videomessungen, Kfz-Verkehrsstärken mit Hilfe eines Seitenradars.

Für die Untersuchungsabschnitte aus Schüller et al. (2020b) und Richter (2019) wurden die Zählzeiten mit Zustimmung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) bzw. der Unfallforschung der Versicherer (UDV) zur Verfügung gestellt. Hinsichtlich der Untersuchungsabschnitte aus Ohm et al. (2015) und Koppers et al. (2021) wurden zum Teil Nacherhebungen notwendig, wie im Folgenden dokumentiert wird:

- Für die Untersuchungsabschnitte von Koppers et al. (2021) wurden die Zählzeiten mit Ausnahme von 3 Streckenabschnitten zur Verfügung gestellt. Die Verkehrsstärken dieser 3 fehlenden Abschnitte wurden auf Basis von Videomessungen nacherhoben und ausgewertet.
- Innerhalb der Untersuchung von Ohm et al. (2015) stand vor allem die Erhebung des Verkehrsverhaltens im Fokus, so dass zum Teil Zählzeiten aus lediglich 1-stündigen Zeiträumen oder nur einer Fahrtrichtung vorlagen – Fußverkehrsstärken wurden von Ohm et al. (2015) nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund wurde das von Ohm et al. (2015) erhobene Videomaterial im Rahmen dieser Arbeit für 3-stündigen Auswertezwischenräume und unter Berücksichtigung der Fußverkehrsstärke erneut ausgewertet.
- Für 2 Untersuchungsabschnitte aus Ohm et al. (2015) lagen keine Unfalldaten aus dem entsprechenden Erhebungsjahr vor. Um diese Abschnitte vor dem Hintergrund aktueller Unfallzahlen (vgl. Kapitel 5.3) berücksichtigen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit Nacherhebungen (Videomessungen) durchgeführt.

Im Resultat liegen der vorliegenden Untersuchung die Verkehrsstärken der unterschiedlichen Verkehrsarten wie folgt vor:

- Radverkehrsstärken differenziert nach Fahrtrichtung und Flächennutzung (Fahrbahn, Gehweg) für 207 Untersuchungsabschnitte
- Kfz-Verkehrsstärken differenziert nach Fahrtrichtung für 207 Untersuchungsabschnitte
- Fußverkehrsstärken differenziert nach Straßenseite für 183 Untersuchungsabschnitte

Tab. 5-3 zeigt die Auswertezwischenräume der Verkehrsstärkeerhebungen der einzelnen Untersuchungen im Überblick. Alle Zählungen wurden außerhalb von Schulferien und an Werktagen durchgeführt. Aufgrund des Forschungsgegenstandes (der Fokus lag auf der Analyse des Verkehrsverhaltens) sind bei Ohm et al. (2015, S. 54) unterschiedliche Zeiträume hinsichtlich der Tageszeit zu verzeichnen. Schüller et al. (2020b, S. 28) und Richter (2019, k. A. im Bericht) definierten einheitliche Zähl- und Auswertezwischenräume. Auch durch Koppers et al. (2021, S. 26) wurden die Rad- und Fußverkehrsstärken einheitlich zwischen 6 und 19 Uhr und Kfz-Verkehrsstärken in 12- bis 22-stündigen Zeiträumen erhoben, wobei im Rahmen dieser Arbeit analog zu Schüller et al. (2020b, S. 31) der jeweils 3-stündige Zeitraum zwischen 15 und 18 Uhr (mit Ausnahme der Nacherhebung) ausgewertet wurde. Die Fußverkehrsstärken wurden zum Teil für ganze 3-Stunden-Zwischenräume aber auch für Kurzzeitzählungen von viermal 15 Minuten (in einem vierstündigen Zeitraum) erhoben. Das Hochrechnungsverfahren für Fußverkehrszählungen

von Roßmerkel (2017a, S. 61 ff.) zeigt sowohl bei durchgängigen 3-Stunden-Zählungen als auch bei 4 Viertelstunden-Zählungen ähnliche Fehlerwerte (siehe Anlage 6, Tab.-A 6).

Um die unterschiedlichen Auswerteziträume zu vereinheitlichen und der Modellierung des Unfallgeschehens (vgl. Kapitel 6.3.2) eine entsprechende Datengrundlage gegenüberzustellen (Betrachtung des Unfallgeschehens für ganzjährige Zeiträume), wurden die Zählzeiten auf Basis von Hochrechnungsverfahren auf den durchschnittlich täglichen Verkehr (DTV) hochgerechnet (siehe Kapitel 5.2.2 bis 5.2.4).

Tab. 5-3 Auswerteziträume zur Erhebung der Verkehrsstärken bei Schüller et al. (2020b, S. 28), Ohm et al. (2015, S. 54), Richter (2019, k. A. im Bericht) und Koppers et al. (2021, S. 26)

Untersuchung	Auswerteziträume					
	Jahre	Monate	Wochentage	Tageszeit		
				Radverkehrsstärke	Kfz-Verkehrsstärke	Fußverkehrsstärke
Schüller et al. (2020b, S. 28)	2016 2017	April bis Oktober	Montag bis Donnerstag	13-16 Uhr (1 Abschnitt) 15-18 Uhr 16-19 Uhr (2 Abschnitte)	13-16 Uhr (1 Abschnitt) 15-18 Uhr 16-19 Uhr (2 Abschnitte)	13-16 Uhr (1 Abschnitt) 15-18 Uhr 1.+2.+3.+4. Viertelstunde: 14-18 Uhr; 15-19 Uhr; 16-20 Uhr
Ohm et al. (2015, S. 54)	2012 2013 2019 ²⁵	Mai bis September	Montag bis Freitag	8-11 Uhr 9-12 Uhr 10-13 Uhr 12-15 Uhr 13-16 Uhr 14-17 Uhr 15-18 Uhr	8-11 Uhr 9-12 Uhr 10-13 Uhr 12-15 Uhr 13-16 Uhr 14-17 Uhr 15-18 Uhr	8-11 Uhr 9-12 Uhr 10-13 Uhr 12-15 Uhr 13-16 Uhr 14-17 Uhr 15-18 Uhr 1.+2.+3.+4. Viertelstunde: 8-12 Uhr; 13-17 Uhr; 14-18 Uhr
Richter (2019, k. A. im Bericht)	2017 2018	März bis November	Montag bis Donnerstag	11-19 Uhr	11-19 Uhr	nicht erhoben
Koppers et al. (2021, S. 26)	2017 2019 ²⁵	April bis September	Dienstag bis Donnerstag	15-18 Uhr ²⁴ 8-11 Uhr ²⁵ (1 Abschnitt)	15-18 Uhr ²⁶ 8-11 Uhr ²⁵ (1 Abschnitt)	15-18 Uhr ²⁴ 8-11 Uhr ²⁵ (1 Abschnitt)

5.2.2 Hochrechnung Radverkehrsstärke

Zur Hochrechnung der Radverkehrsstärken wurde das Verfahren nach Schiller et al. (2011) verwendet. Dieses Verfahren beinhaltet grundsätzlich eine Hochrechnung mit einem Excel-Tool sowie ein vereinfachtes Verfahren. Das vereinfachte Verfahren welches hinsichtlich der einzelnen Hochrechnungsfaktoren transparenter ist, verlangt 4-stündige oder 8-stündige Zählungen und konnte deshalb nicht zur Anwendung kommen. Die Hochrechnung mit dem Excel-Tool von Schiller et al. (2011) ist hingegen bereits für 1-Stunden-Zählungen anwendbar, verlangt aber deutlich differenziertere Eingangsparameter, welche im Folgenden vorgestellt und deren Umgang in vorliegender Arbeit erläutert wird:

- Nutzungsstrukturen im Umfeld der Zählstelle (Stadtzentrum/Sonstiger Stadtteil/Stadtrand oder dörfliche Struktur): Einordnung erfolgte nach einer qualitativen Einschätzung der Stadtstruktur.
- Nutzungsdichte bzw. -mischung im Umfeld der Zählstelle (Angabe von Anteilen zwischen geringe Nutzungsdichte, Radverkehrsanlage mit vorwiegender Verbindungsfunktion (0 %) /sehr hohe Nutzungsdichte mit vorwiegender Aufenthalts- und/oder Erledigungsfunktion (100 %)): Die Ermittlung dieses Anteils erfolgte näherungsweise auf Basis des Anteils an Geschäftsbesatz entlang des Untersuchungsabschnittes (vgl. Tab. 5-2).
- Wohnstandorte im Umfeld der Zählstelle (Angabe von Anteilen: keine Wohnungen als Quelle oder Ziel (0 %) /reines Wohngebiet (100 %)): Die Ermittlung dieses Anteils erfolgte näherungsweise auf Basis des Anteils an Wohnbebauung entlang des Untersuchungsabschnittes (vgl. Tab. 5-2).

²⁴ Erhoben wurde insgesamt von 6 bis 19 Uhr. Analog zu den Zählungen von Schüller et al. 2020b wurde ein dreistündiger Zeitraum von 15-18 Uhr ausgewertet.

²⁵ Eigene Erhebung

²⁶ Erhoben wurden unterschiedliche Zeiträume von 12 bis 22 Stunden je Abschnitt. Analog zu den Zählungen von Schüller et al. 2020b und zur Vereinheitlichung wurde ein dreistündiger Zeitraum von 15-18 Uhr ausgewertet.

- Touristischer Verkehr (Angabe von Anteilen: Untersuchungsabschnitt ist Teil einer touristischen Radroute und vorherrschende Richtung des touristischen Verkehrs): Hierzu lagen keine Angaben vor. Zudem unterliegt die Abschätzung des Anteils aufgrund von Überlagerungen mit dem Alltagsverkehr einer hohen Komplexität. Zudem wurde von Schiller et al. (2011, Leitfaden, S. 24) angemerkt, dass „*insbesondere bei touristischen Radrouten innerhalb bebauter Gebiete, auf denen auch Alltagsverkehr stattfindet, ...*“ die Gefahr besteht, „*... den Anteil des touristischen Radverkehrs zu überschätzen.*“ Aus diesen Gründen wurde dieser Anteil einheitlich auf 0 % gesetzt.
- Alltägliches Freizeitverkehr (Angabe von Anteilen: 100 % Freizeitradverkehr/ 100 % Alltagsradverkehr und vorherrschende Richtung): Alltägliches Freizeitverkehr wird nach Schiller et al. (2011, Leitfaden, S. 25) definiert als Verkehr, „*... der innerhalb eines Tages an der eigenen Wohnung beginnt und wieder endet.*“ Da für die Untersuchungsabschnitte keine Informationen darüber vorlagen, wurden die Ergebnisse der Mobilitätsbefragung SrV 2018 zugrunde gelegt (Gerike et al. 2020). Da nicht alle Städte, in denen die Untersuchungsabschnitte liegen, Teil des SrV waren, wurden zum Teil eigene Zuordnungen zur Zentralität, Stadtgröße und Topografie getroffen. Die entsprechenden Anteile wurden auf alle Untersuchungsabschnitte innerhalb einer Stadt angewandt. Die zur Hochrechnung verwendeten Anteile zum Freizeitradverkehr nach Gerike et al. (2020) sind in Tab.-A 5, Anlage 5 dokumentiert.
- Zwecke des Alltagsverkehrs (Angabe von Anteilen differenziert nach den Wegezwecken (Arbeiten/ Lernen/ Studieren/ Einkaufen/ Sonstiges)): Da hierzu keine näheren Informationen vorlagen, wurden die Standardeinstellungen des Excel-Tools verwendet.
- Zähltag: Innerhalb des Excel-Tools wird damit der Tagtyp in Abhängigkeit des Wochentages bestimmt.
- Ferien: Sofern der Zähltag innerhalb von Semesterferien lag (alle Zählungen fanden außerhalb von Schulferien statt), wurden die Anteile dieser Zwecke des Alltagsverkehrs durch das Excel-Tool auf „0“ gesetzt.
- Wetter (trocken oder nur geringer Niederschlag/ regnerisch, Niederschlag): Diese Angaben wurden entsprechend den Wetterbedingungen am Zähltag getroffen.
- Zählintervalle (Angabe der Stunden-Intervalle im Zählzeitraum): Die Zählzeiten wurden in einem darauffolgenden Schritt entsprechend in Form der einzelnen Stunden-Intervalle in das Excel-Tool eingegeben.
- Ausgabe (DTV Radverkehrssaison, trocken/ Radverkehrssaison, alle Tage/ gesamtes Jahr): Da auf Basis des DTV das Analyse-Modell des Unfallgeschehens des gesamten Jahres erfolgt, wird für die folgenden Auswertungen der DTV des gesamten Jahres zugrunde gelegt.

5.2.3 Hochrechnung Fußverkehrsstärke

Zur Hochrechnung der Fußverkehrszählungen wurde das im nationalen Raum aktuellste Hochrechnungsverfahren für Fußverkehrszählungen nach Roßmerkel (2017a) bzw. Roßmerkel (2017b) und Roßmerkel (2021) angewandt. Grundlage für die von Roßmerkel (2017a), Roßmerkel (2017b) und Roßmerkel (2021) vorgeschlagenen Hochrechnungsfaktoren bildeten Zählungen an 22 unterschiedlichen Querschnitten. Ältere Hochrechnungsverfahren im nationalen Raum bspw. nach Heidemann (1976) oder Maier (1984) sind aufgrund verschiedener Veränderungen (bspw. Arbeitszeiten oder Ladenöffnungszeiten) nicht auf die heutige Zeit übertragbar. Das Verfahren nach Roßmerkel (2017a, S. 61 ff.) differenziert neben dem Tagesgang allerdings nicht nach Jahres- und Wochengang oder nach Ferienzeiten (Schulferien, Semesterferien), weshalb durch den Autor angemerkt wird, dass die empfohlenen Hochrechnungsfaktoren nur für Zählungen an Normalwerktagen in Wochen ohne Feiertage oder Schulferien sowie in den Monaten April bis August gelten (Zählzeiträume der dem Verfahren zugrundeliegenden Erhebungen). Trotz dieser Einschränkungen wird dieses Verfahren im Rahmen vorliegender Arbeit genutzt, da es im nationalen Raum das einzig aktuelle und generalisierbare Hochrechnungsverfahren für Fußverkehrszählungen darstellt. Für die Hochrechnung der in Tab. 5-3 dargestellten Zählzeiträume wurden die in Tab.-A 6, Anlage 6 dokumentierten Hochrechnungsfaktoren verwendet.

5.2.4 Hochrechnung Kfz-Verkehrsstärke

Das aktuellste nationale Hochrechnungsverfahren für Zählungen des Kfz-Verkehrs innerorts wurde durch Arnold et al. (2008) entwickelt. Arnold et al. (2008) empfehlen dabei die Zähltage Dienstag bis Donnerstag und geben, vor allem zur Gewährleistung einer einfachen Handhabbarkeit, Hochrechnungsfaktoren für 4- und 8-Stundenzählungen vor. Für die Hochrechnung der Kfz-Verkehrszählungen in vorliegender Arbeit ist dieses Verfahren aufgrund kürzerer Zählzeiträume nicht anwendbar (vgl. Tab. 5-3), so dass das Hochrechnungsverfahren nach FGSV (2001, S. 2-17 ff.), welches auf einer Untersuchung von Schmidt und Thomas (1996, S. 547 ff.) basiert, verwendet wurde. Danach erfolgte die Ermittlung des DTV grundsätzlich differenziert nach PKW- und LKW-Verkehr in 3 Stufen (siehe FGSV 2001, S. 2-17 ff.; Schmidt und Thomas 1996, S. 547 ff.):

Hochrechnung von den Zählstunden auf den Tagesverkehr des Zähltages:

$$q_z = \frac{q_{h\text{-Gruppe}}}{\alpha_{h\text{-Gruppe}}}$$

Formel 5-1

mit

h-Gruppe	Index für den Zählzeitbereich	
q_z	Tagesverkehr des Zähltages	[Kfz/24h]
q	gezählte Verkehrsstärke der Stundengruppe	[Kfz/h-Gruppe]
α	Anteilswert aus Tab.-A 7, Anlage 7	

Hinsichtlich der Anteilswerte α wird nach Schmidt und Thomas (1996, S. 548) nach „west- und ostdeutschen“ Städten unterschieden. Da diese Einteilung als nicht mehr zeitgemäß erachtet wird, wurden mittlere Anteilswerte α ermittelt und für die Hochrechnung in vorliegender Arbeit verwendet (siehe Tab.-A 7, Anlage 7).

Die Anteilswerte α für den PKW-Verkehr werden in Abhängigkeit von Tagesganglinientypen bestimmt. Die Abgrenzung der Tagesganglinientypen erfolgt entweder über eine nominale Beschreibung des Untersuchungsabschnittes oder über einen Kennwert, welcher sich aus dem Quotienten zwischen der gezählten Verkehrsstärke 16-18 Uhr und 12-14 Uhr ergibt. Da diese Werte nicht vorliegen, erfolgte die Abgrenzung über die nominale Beschreibung (siehe Tab.-A 8, Anlage 7). Dabei wurde lediglich zwischen TG_{w1} bis TG_{w3} unterschieden²⁷.

Umrechnung des Tagesverkehrs auf das Wochenmittel:

$$W_z = t_d \cdot q_{z,d}$$

Formel 5-2

mit

d	Index für den Wochentag der Zählung	
q_z	Tagesverkehr des Zähltages	[Kfz/24h]
W_z	Wochenmittel der Zählwoche	[Kfz/24h]
t	Tag-/Woche-Faktor nach Tab.-A 9, Anlage 7	

Die Ermittlung des Tag-/Woche-Faktors erfolgt in Abhängigkeit des Sonntagsfaktors b_{so} . Dieser lässt sich entweder über eine nominale Abgrenzung oder aus dem Quotienten zwischen der Tagesverkehrsstärke sonntags und der mittleren Tagesverkehrsstärke der Wochentage Dienstag bis Donnerstag bestimmen. Da die Tagesverkehrsstärke sonntags und die mittlere Tagesverkehrsstärke der Wochentage Dienstag bis Donnerstag nicht vorliegt, erfolgte die Bestimmung des Sonntagsfaktors nach der nominalen Beschreibung (siehe Tab.-A 10, Anlage 7)

²⁷ Durch Schmidt und Thomas (1996, S. 548) wurde ein weiterer Tagesganglinientyp (TG_{w4}) definiert, der allerdings nur für „westdeutsche Städte“ gilt.

Umrechnung des Wochenmittels auf den durchschnittlich täglichen Verkehr (DTV):

$$DTV = \frac{W_{Z,i}}{HM_i}$$

Formel 5-3

mit

i	Index zur Beschreibung des halben Monats, in dem die Zählung stattfand	
DTV	durchschnittlich tägliche Verkehrsstärke	[Kfz/24h]
W _Z	Wochenmittel der Zählwoche	[Kfz/24h]
HM	Halbmonatsfaktor nach Tab.-A 11, Anlage 7	

5.3 Unfalldaten

Tab. 5-4 zeigt die verwendeten Unfalldaten, die entsprechenden Quellen, Betrachtungszeiträume sowie das vorliegende Format im Überblick. Für die Untersuchungsabschnitte aus Schüller et al. (2020b) und Ohm et al. (2015) wurden Unfalldaten mit Zustimmung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zur Verfügung gestellt. Da der Fokus bei Ohm et al. (2015) vor allem auf der Analyse des Verkehrsverhaltens lag, konnten nicht für alle Untersuchungsabschnitte Unfalldaten zur Verfügung gestellt werden. Zudem konnten keine Unfalldaten für die Untersuchungsabschnitte aus Koppers et al. (2021) und Richter (2019) zur Verfügung gestellt werden. Diese wurden durch die Professur für Integrierte Verkehrsplanung und Straßenverkehrstechnik (IVST) der TU Dresden bereitgestellt (Bundesländer: Hessen, Sachsen, Sachsen-Anhalt) oder bei den entsprechenden Behörden (Polizei, Stadtverwaltung) angefragt. Für die Untersuchungsabschnitte für die von den Behörden keine Unfalldaten zur Verfügung gestellt wurden, werden Daten aus dem Unfallatlas (<https://unfallatlas.statistikportal.de>) verwendet.

Hinsichtlich des Betrachtungszeitraumes des Unfallgeschehens wird ein Zeitraum von 5 Jahren angestrebt. Dies stellt ein Kompromiss zwischen einer hohen Stabilität des Mittelwertes (Unfälle sind generell sehr seltene Ereignisse, insbesondere bei der Betrachtung einzelner Unfallkategorien, -typen oder Arten der Beteiligung) und der Minimierung verkehrlicher oder baulicher Veränderungen auf den Untersuchungsabschnitten innerhalb des Betrachtungszeitraumes. Denn eine Grundvoraussetzung der Modellierung des Unfallgeschehens ist, dass sich der Zeitpunkt der Erhebungen der Infrastruktur- und Verkehrsstärkedaten mit dem Betrachtungszeitraum der Unfälle überlagert. Ausnahmen hinsichtlich der 5-jährigen Betrachtung stellen die Daten des Unfallatlases für das Bundesland Nordrhein-Westfalen dar, welche erst seit dem Jahr 2019 verfügbar sind. Des Weiteren sind kürzere Zeiträume dann gewählt wurden, wenn es wesentliche Veränderungen hinsichtlich der Infrastruktur gab. Dabei ist insbesondere die Anwendung von Piktogrammen zu nennen, welche innerhalb der Untersuchungsabschnitte zum Teil erst 2017 oder 2018 markiert wurden (vgl. Koppers et al. 2021, S. 218 ff.), so dass die Betrachtungszeiträume entsprechend reduziert wurden.

Die durch Schüller et al. (2020b), Ohm et al. (2015), IVST sowie die Behörden zur Verfügung gestellten Daten liegen alle im Format der EUSka-Datenbanken vor. Die Datenbank des Unfallatlases enthält deutlich weniger Merkmale im Vergleich zur EUSka-Datenbank. Einen Überblick zum EUSka- und Unfallatlas-Basisdatensatzes sowie entsprechende Verweise zur Definition der einzelnen Merkmale enthält Tab.-A 12 (siehe Anlage 8). Die folgenden Merkmale sind in beiden Datenbanken enthalten und können der Untersuchung aller Untersuchungsabschnitte zugrunde gelegt werden, wobei lediglich die Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$; Unfallkategorie 1-3) betrachtet werden (vgl. Tab. 5-4; betrachtete Unfallkategorien Unfallatlas).

- Geokoordinaten
- Datum und Uhrzeit
- Unfallkategorie, -typ und -art (Definition siehe Destatis 2020, S. 16 ff.)
- Lichtverhältnisse (Definition siehe GDV 2003, S. 8)
- Art der Beteiligung (Verkehrsmittel; Definition siehe Destatis 2020, S. 18 ff.)

Die Unfalldaten wurden gemeinsam mit den Untersuchungsabschnitten in eine GIS-Datenbank eingepflegt (vgl. Kapitel 5.1.2), so dass die Unfälle den Untersuchungsabschnitten zugeordnet werden können. Eine Analyse differenziert nach Straßenseiten kann nicht erfolgen, da nicht für alle Unfälle eine Beschreibung des Unfallhergangs vorlag, welche für eine Zuordnung notwendig ist.

Tab. 5-4 Verwendete Unfalldaten

Untersuchung	Bundesland	Stadt	Quelle Unfälle	Format	Jahr Erhebung Datengrundlage	Zeitraum Unfälle	Unfall- kategorien
Schüller et al. (2020b)	Berlin	Berlin	Schüller et al. (2020b)	EUSKa ²⁸	2016, 2017	2014-2018	1-6
	Hessen	Frankfurt			2016, 2017	2014-2018	1-6
	Nordrhein- Westfalen	Bochum			2017	2012-2016	1-4, 6
		Düsseldorf			2016, 2017	2012-2016	1-4
		Gelsenkirchen			2017	2012-2016	1-4, 6
	Sachsen	Dresden			2017	2014-2018	1-6
		Leipzig			2017	2014-2018	1-6
	Sachsen- Anhalt	Halle			2017	2014-2018	1-6
Ohm et al. (2015)	Baden- Württemberg	Karlsruhe	Ohm et al. (2015)	EUSKa ²⁸	2012	2011-2015	1-6
		Offenburg	Stadt Offenburg ²⁹		2012	2010-2014	1-6
		Rottenburg	Unfallatlas ³⁰	Unfallatlas ³⁰	2019	2016-2019	1-3
	Berlin	Berlin	Polizei Berlin ³¹	EUSKa ²⁸	2012	2010-2014	1-6
	Nordrhein- Westfalen	Bielefeld	Ohm et al. (2015)		2012	2007-2011	1-6
		Dortmund			2012	2011-2015	1-5
	Sachsen	Dresden	IVST ³²		2012	2010-2014	1-6
		Radebeul	IVST ³²		2012	2010-2014	1-6
Koppers et al. (2021)	Baden- Württemberg	Bietigheim- Bissingen	Unfallatlas ³⁰	Unfallatlas ³⁰	2019	2016-2019	1-3
		Karlsruhe			2019	2016-2019	1-3
	Bremen	Bremerhaven			2017	2016-2019	1-3
	Hessen	Darmstadt	IVST ³²	EUSKa ²⁸	2017	2015-2018	1-6
		Frankfurt a. M.	IVST ³²		2017	2016-2018	1-6
	Nordrhein- Westfalen	Ratingen	Unfallatlas ³⁰	Unfallatlas ³⁰	2019	2019-2020	1-3
Richter (2019)	Berlin	Berlin	Polizei Berlin ³¹	EUSKa ²⁸	2017	2014-2018	1-6
	Brandenburg	Potsdam	Polizei Land Brandenburg ³³		2017	2014-2018	1-6
	Hessen	Gießen	IVST ³²		2018	2014-2018	1-6
	Nordrhein- Westfalen	Lübbecke	Unfallatlas ³⁰	Unfallatlas ³⁰	2017	2019-2020	1-3
	Sachsen	Döbeln	IVST ³²	EUSKa ²⁸	2017	2014-2018	1-6
		Zwickau	IVST ³²		2017	2014-2018	1-6

²⁸ Elektronische Unfalltypensteckarten, PTV Group

²⁹ Zur Verfügung gestellt durch die Stadt Offenburg, Fachbereich Tiefbau/Verkehr.

³⁰ <https://unfallatlas.statistikportal.de/>

³¹ Zur Verfügung gestellt durch die Polizei Berlin.

³² Zur Verfügung gestellt durch die Professur für Integrierte Verkehrsplanung und Straßenverkehrstechnik (IVST), TU Dresden.

³³ Zur Verfügung gestellt durch die Polizei Land Brandenburg.

6 METHODIK

6.1 Prüfung innerer Abhängigkeiten

Sowohl die Ermittlung der Einflussgrößen auf die Akzeptanz der Radverkehrsführung als auch auf die Unfallzahl verlangt, dass die zu prüfenden Merkmale unabhängig voneinander sind. Für die Wahl eines geeigneten Zusammenhangsmaßes ist das Skalenniveau der unabhängigen Variablen entscheidend. Nach Bortz und Schuster (2010, S. 12 ff.) kann grundsätzlich zwischen den folgenden Skalenniveaus unterschieden werden:

- Nominalskala: Skalenwerte-/kategorien ohne Rangordnung (bspw. Geschlecht)
- Ordinalskala: Skalenwerte-/kategorien mit Rangordnung ohne definierte Abstände zwischen den Kategorien (bspw. Schulnoten)
- Intervallskala: Skalenwerte-/kategorien mit Rangordnung und definierten Abständen (messbar) ohne definierten Nullpunkt (bspw. Temperatur)
- Verhältnisskala: Skalenwerte-/kategorien mit Rangordnung, definierten Abständen (messbar) und definierten Nullpunkt (bspw. Länge)

Variablen der Nominal- und Ordinalskala werden durch ein nominales Messniveau und Variablen der Intervall- und Verhältnisskala durch ein metrisches Messniveau beschrieben. Das geeignete Zusammenhangsmaß für metrische Variablen ist die Produkt-Moment-Korrelation, auch bekannt als „Bravais-Pearson-Korrelation“ (Bortz und Schuster 2010, S. 156). Für Variablen der Ordinalskala können innere Zusammenhänge mit Hilfe der Rangkorrelation, auch bekannt als „Spearman-Korrelation“ beschrieben werden. Einen Sonderfall stellt die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Variablen der Nominalskala dar. Diese werden nicht mit Hilfe von Korrelationsmaßen beschrieben, sondern auf Basis von Kontingenzkoeffizienten (Bortz und Schuster 2010, S. 180). Zur Prüfung innerer Abhängigkeiten gilt grundsätzlich, dass der Koeffizient gewählt werden kann, der zu dem niedrigeren Niveau gehört.

Wie Tab. 5-2 zeigt, liegen der Untersuchung sowohl metrische als auch nominale Variablen zugrunde. Vor allem hinsichtlich der nominalen Variablen gilt es zu prüfen, ob diese einer Nominal- oder Ordinalskala zugeordnet werden können. Tab. 6-1 zeigt die Definition der Skalenniveaus für die nominalen Variablen. Im Resultat liegen der Untersuchung mit Ausnahme der Merkmale „§ 45. Abs. 9“ und „Gleise im Mischverkehr“ ordinal- und intervallskalierte Merkmale zugrunde, so dass die inneren Abhängigkeiten nach Bortz und Schuster (2010, S. 178) mit Hilfe der Rangkorrelation nach Spearman beschrieben werden können.

Der Rangkorrelationskoeffizient Spearmans Rho (r_s) kann aufbauend auf der Formel der Produkt-Moment-Korrelation wie folgt berechnet werden (Bortz und Schuster 2010, S. 178):

$$r_s = \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2}{n \cdot (n^2 - 1)}$$

Formel 6-1

mit

- d_i Differenz der Rangplätze, die das i-te Untersuchungsobjekt bezüglich der Merkmale x und y erhalten hat
- n Stichprobenumfang

Die Einordnung der Intensität des Zusammenhanges erfolgt nach Cohen (1992, S. 157) wie folgt:

- $r_s = \pm 0,1$: schwacher Zusammenhang
- $r_s = \pm 0,3$: mittlerer Zusammenhang
- $r_s = \pm 0,5$: starker Zusammenhang

Die Prüfung der Signifikanz des Zusammenhangs bzw. der Verschiedenheit des Rangkorrelationskoeffizienten zu Null erfolgt anhand des t-Tests nach folgender Berechnungsvorschrift (Bortz und Schuster 2010, S. 178):

$$t = \frac{r_s \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_s^2}}$$

Formel 6-2

mit

r_s Rangkorrelationskoeffizient Spearmans Rho

n Stichprobenumfang

Tab. 6-1 Definition des Skalenniveaus der nominalen Variablen

Merkmal	Codierung	Ausprägung	Skalenniveau	Begründung
Radverkehrsführungsform	RVF	0: Mischverkehr 1: Piktogramme 2: SSF einseitig 3: SSF beidseitig	ordinal	Kategorisierung folgt einer Ordnung hinsichtlich einer zunehmenden Separierung von Flächen
Ruhender Verkehr	rV	0: kein rV 1: einseitig 2: einseitig alternierend 3: beidseitig	ordinal	Kategorisierung folgt einer Ordnung hinsichtlich einer zunehmenden Nutzung durch ruhenden Verkehr
Art der Anordnung des ruhenden Verkehrs	rV-Art	0: kein rV 1: Längs 2: Schräg 3: Senkrecht 4: Längs/Schräg 5: Längs/Senkrecht	ordinal	Kategorisierung folgt einer Ordnung hinsichtlich einer zunehmenden Komplexität bei der Aufstellung
Lage des ruhenden Verkehrs	Lage _{rV}	0: kein 1: Fahrbahn 2: Fahrbahn markiert 3: Fahrbahn baulich 4: Seitenraum 5: Fahrbahn/Seitenraum	ordinal	Kategorisierung folgt einer Ordnung hinsichtlich einer zunehmenden infrastrukturellen Gestaltung
zulässige Geschwindigkeit	v _{zul}	0: 50 km/h 1: 40 km/h 2: 30 km/h, 22-6 Uhr 3: 30 km/h, 6-18 Uhr 4: 30 km/h	ordinal	Kategorisierung folgt einer Ordnung hinsichtlich eines abnehmenden angestrebten Geschwindigkeitsniveau
mögliche Gründe für Anordnung v _{zul} nach § 45. Abs. 9, Punkt 6	§ 45. Abs. 9	0: nein 1: ja	nominal	Kategorisierung folgt keiner Ordnung, aber keine Prüfung auf innere Abhängigkeiten, da dieses Merkmal nur in Verbindung mit v _{zul} berücksichtigt wird
Verkehrszeichen Gehweg	VZ _{GW}	0: Gehweg 1: Gehweg "Radfahrende frei", einseitig 2: Gehweg "Radfahrende frei", beidseitig	ordinal	Kategorisierung folgt einer Ordnung hinsichtlich einer zunehmenden Freigabe der Nutzung des Gehwegs durch den Radverkehr
Mitteltrennung	MT	0: keine 1: markiert 2: baulich	ordinal	Kategorisierung folgt einer Ordnung hinsichtlich einer zunehmenden infrastrukturellen Gestaltung
Gleise im Mischverkehr	Gleise	0: nein 1: ja	ordinal	Kategorisierung folgt einer Ordnung, hinsichtlich einer zunehmenden infrastrukturellen Komplexität

6.2 Akzeptanzmodell

6.2.1 Definitionen

Die Untersuchungen zur Akzeptanz von Mischverkehrsführungen beinhalten in Anlehnung an die Erkenntnisse aus Kapitel 4.2.3 und die Untersuchung von Schüller et al. (2020b) sowohl den Anteil der Fahrbahnnutzung (gegenüber der Gehwegnutzung) als auch den Anteil auf dem Gehweg linksfahrender Radfahrender (gegenüber allen Radfahrenden; siehe Bild 6-1). Nicht berücksichtigt werden dabei Kinder und Erwachsene, die Kinder begleiten (vgl. Kapitel 2). Die Untersuchung der Akzeptanz erfolgt im Gegensatz zur Unfalluntersuchung differenziert nach den Fahrtrichtungen (vgl. Kapitel 5.2.1). Dabei werden Straßenseiten, auf denen kein Gehweg vorhanden ist oder auf denen der Gehweg nach ZZ 1022-10 StVO für Radfahrende freigegeben ist (vgl. Kapitel Tab. 5-2, Kapitel 5.1.3 und Kapitel 7.1), nicht betrachtet.

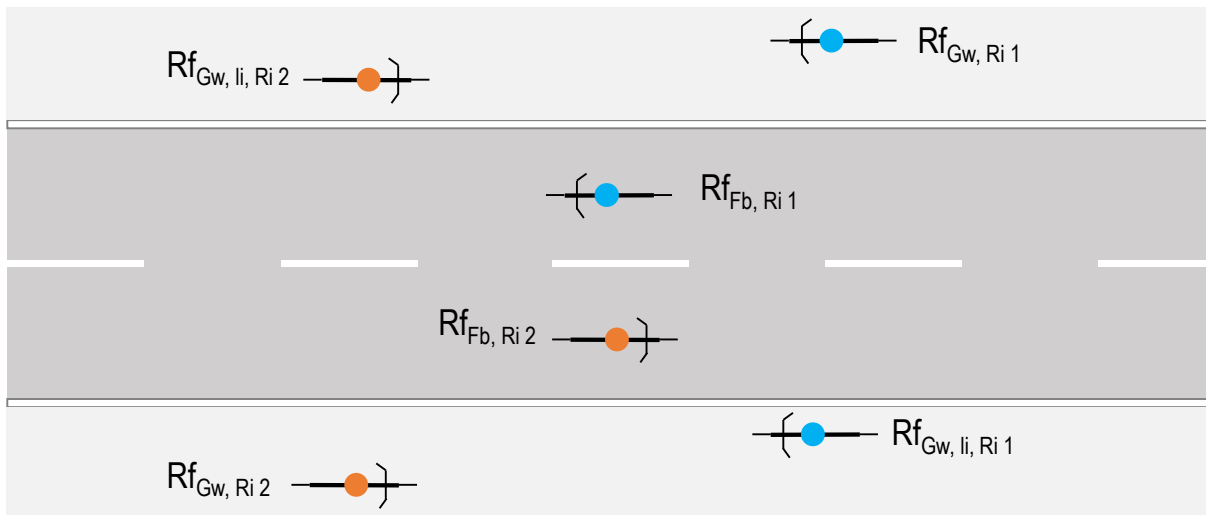


Bild 6-1 Definition der Akzeptanz

Auf Basis der Definitionen in Bild 6-1 ergibt sich die Akzeptanz der Fahrbahnnutzung ($A_{Fb, Ri i}$ Anteil der Fahrbahnnutzung gegenüber der Gehwegnutzung) sowie der Anteil linksfahrender Radfahrender auf dem Gehweg gegenüber allen Radfahrenden ($A_{Gw, li, Ri i}$) wie folgt:

$$A_{Fb, Ri i} = \frac{q_{Rf, Fb, Ri i}}{(q_{Rf, Fb, Ri i} + q_{Rf, Gw, Ri i} + q_{Rf, Gw, li, Ri i})} \quad \text{Formel 6-3}$$

$$A_{Gw, li, Ri i} = \frac{q_{Rf, Gw, li, Ri i}}{(q_{Rf, Fb, Ri i} + q_{Rf, Gw, Ri i} + q_{Rf, Gw, li, Ri i})} \quad \text{Formel 6-4}$$

mit

$q_{Rf, Fb, Ri i}$	Verkehrsstärke der Radfahrenden auf der Fahrbahn in Fahrtrichtung i im Betrachtungszeitraum	[Rf/Betrachtungszeitraum]
$q_{Rf, Gw, Ri i}$	Verkehrsstärke der Radfahrenden auf dem Gehweg in Fahrtrichtung i im Betrachtungszeitraum	[Rf/Betrachtungszeitraum]
$q_{Rf, Gw, li, Ri i}$	Verkehrsstärke der Radfahrenden auf dem Gehweg entgegen der Fahrtrichtung i im Betrachtungszeitraum	[Rf/Betrachtungszeitraum]

6.2.2 Statistische Verteilung

Zur Ermittlung von Einflussgrößen auf die Akzeptanz der Fahrbahnnutzung Radfahrender oder den Anteil linksfahrender Radfahrender auf dem Gehweg liegen, abgesehen von univariaten deskriptiven Vergleichen bspw. in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform (vgl. Kapitel 4.2.3), nur kaum Erkenntnisse vor. Lediglich Schüller et al. (2020b, S. 56) ermitteln auf Basis multivariater Betrachtungen entsprechende Einflussgrößen (siehe Kapitel 4.2.3). Unter der Voraussetzung, dass die Abweichungen der Verteilung der Akzeptanz der Fahrbahnnutzung bzw. der Fahrtrichtung in der Grundgesamtheit normalverteilt sind, wird durch Schüller et al. (2020b) eine lineare Mehrfachregression verwendet. Zur Überprüfung auf Normalverteilung der Anteils der Fahrbahnnutzung sowie linksfahrender Radfahrender wird der Kolmogorow-Smirnov-Test und der Shapiro-Wilk-Test verwendet (vgl. Field 2009, S. 144). Beide Tests basieren grundsätzlich auf dem Vergleich der Werte der Stichprobe mit einer normalverteilten Menge von Werten, die den gleichen Mittelwert und die gleiche Standardabweichung aufweisen (Field 2009, S. 144). Werden die Tests nicht signifikant, unterscheidet sich die Verteilung der Stichprobe nicht von einer Normalverteilung. Weitere Ausführungen zu den Tests auf Normalverteilung sind Anlage 9 zu entnehmen. Die Tests auf Normalverteilung der Akzeptanz der Fahrbahnnutzung (A_{Fb}) sowie des Anteils linksfahrender Radfahrender ($A_{Gw, li}$) für insgesamt 415 Straßenseiten (vgl. Kapitel 6.2.1 und 7.1) ergeben, dass für beide überprüfte Merkmale die H_0 -Hypothese einer Normalverteilung zunächst abgelehnt werden muss, da beide Tests signifikant werden (siehe Tab. 6-2).

Tab. 6-2 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnov- und Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung des Anteils der Fahrbahnutzung (A_{Fb}) sowie des Anteil linksfahrender Radfahrender ($A_{Gw, li}$)

Merkmal	Kolmogorow-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Anteil der Fahrbahnutzung (A_{Fb})	0,148	407	0,000	0,830	407	0,000
Anteil linksfahrender Radfahrender ($A_{Gw, li}$)	0,189	407	0,000	0,760	407	0,000

Werden die Verteilungen grafisch anhand von Histogrammen bewertet (siehe Bild 6-2), zeigt sich, dass der Anteil der Fahrbahnutzung je Straßenseite linksschief und der Anteil linksfahrender Radfahrender rechtsschief verteilt sind.

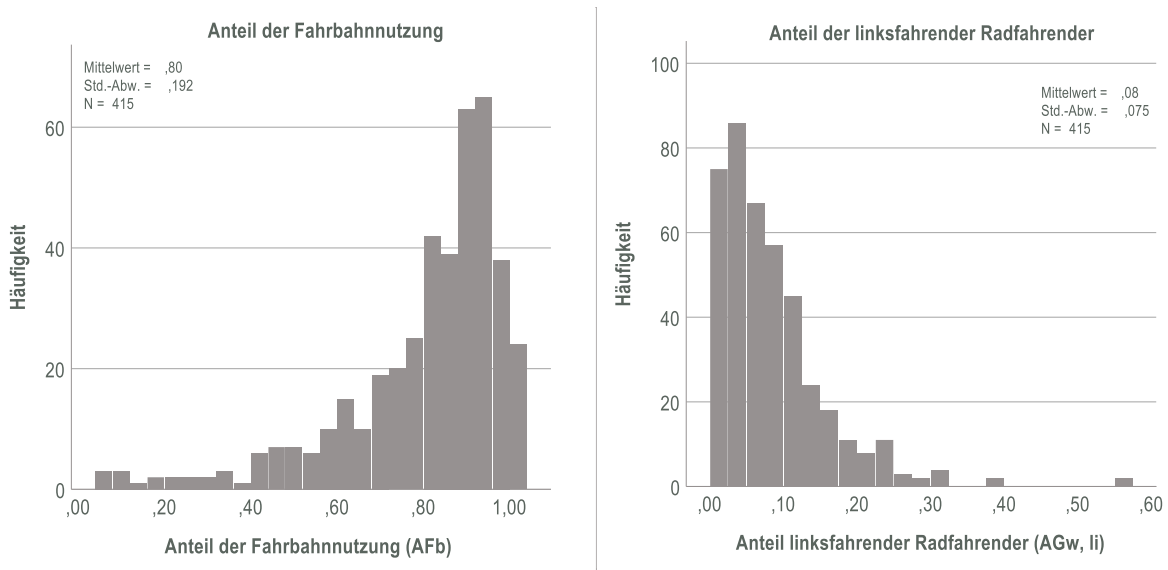


Bild 6-2 Histogramme der Verteilungen des Anteils der Fahrbahnutzung (A_{Fb}) sowie des Anteil linksfahrender Radfahrender ($A_{Gw, li}$)

Für die Auswahl eines geeigneten Modells werden auf Basis der Ergebnisse der Normalverteilungstests sowie vermuteter kausaler Zusammenhänge die folgenden möglichen Thesen herangezogen:

Normalverteilung

Sofern man davon ausgeht, dass der Anteil der Fahrbahnutzung sowie der Anteil der linksfahrenden Radfahrenden von verschiedenen Merkmalen signifikant beeinflusst wird, ist es grundsätzlich denkbar, dass die Verteilung der vorliegenden Kollektive eine Überlagerung von verschiedenen Normalverteilungen darstellt. Neben den in dieser Untersuchung zugrundeliegenden infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen könnten auch personenspezifische Merkmale (vgl. Kapitel 4.3.2), welche im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden können, einen Einfluss haben. In diesem Fall könnte eine lineares Regressionsmodell, wie es bei Schüller et al. (2020b, S. 56 ff.) zur Anwendung kommt, geeignet sein. Dafür spricht für vorliegende Stichprobe, auch das zentrale Grenzwerttheorem, wonach die Verteilung von Mittelwerten von sich überlagernden Verteilungen mit wachsendem Stichprobenumfang in eine Normalverteilung übergeht – nach Bortz und Schuster (2010, S. 586) gilt dies für Stichproben mit $n > 30$. Außerdem ist es grundsätzlich auch denkbar, dass Verteilungen durch eine geeignete Transformation normalisiert werden können (Bortz und Schuster 2010, S. 145).

Bortz und Schuster (2010, S. 145) geben dafür Beispiele aus Rummel (1970). Danach kommen grundsätzlich die folgenden zwei Transformationen in Frage:

$$X_j = \log\left(\frac{X_j}{1 - X_j}\right) \quad \text{Formel 6-5}$$

$$X_j = 1/2 \log\left(\frac{1 + X_j}{1 - X_j}\right) \quad \text{Formel 6-6}$$

mit

X_j Anteil der Fahrbahnnutzung (A_{Fb}) oder Anteil rechtsfahrender Radfahrender ($1 - A_{Gw, li}$)

Dabei erweist es sich als problematisch, dass sowohl der $\log(0)$ als auch eine Division durch Null nicht definiert ist, weshalb die Fälle mit $A_{Fb} = 1$ und $A_{Fb} = 0$ sowie $A_{Gw, li} = 0$ und $A_{Gw, li} = 1$ nach Formel 6-5 sowie $A_{Fb} = 1$ sowie $A_{Gw, li} = 1$ nach Formel 6-6 nicht definiert sind. Zudem ist die Frage, ob eine Transformation sinnvoll ist, nach Field (2009, S. 155 ff.) mit der Robustheit der angewendeten Signifikanztests verbunden (bspw. F-Wert oder ANOVA; vgl. Kapitel 6.2.3). Zur Robustheit dieser Tests, liegen nach Field (2009, S. 155 ff.) wiederum verschiedene Erkenntnisse vor, wobei auf Levine und Dunlap (1982), Games (1983), Levine und Dunlap (1983) und Games (1984) verwiesen wird. Im Resultat verweist Field (2009, S. 156) zur Beantwortung der Frage u.a. auf das zentrale Grenzwerttheorem und die Schwierigkeiten bei der Interpretation der Koeffizienten eines transformierten Modells. Unabhängig davon kann ein nicht transformiertes Modell unter der Verwendung robuster Tests empfehlenswerter sein, als ein transformiertes Modell (Field 2009, S. 156). Da die Aussagen hinsichtlich der Robustheit der angewendeten Signifikanztests keine eindeutige Tendenz ergeben und ein transformiertes Modell eine hohe Komplexität aufweist, wird auf eine Transformation der abhängigen Variable verzichtet.

Logistische Verteilung

Ausgehend davon, dass dem Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn sowie dem Anteil linksfahrender Radfahrender in nicht aggregierter Form jeweils ein binärer Entscheidungsprozess der Radfahrenden zugrunde liegt (Gehweg – Fahrbahn; linksfahrend – rechtsfahrend), ist auch die Anwendung einer binär logistischen Regression möglich. Dafür spricht weiterhin, dass das Fahren auf der Fahrbahn bei den betrachteten Streckenabschnitten gesetzlich vorgeschrieben ist, so dass sich, ausgehend davon, dass sich Verkehrsteilnehmende in der Mehrzahl regelgerecht verhalten, die Verteilung der Häufigkeiten einem Anteil der Fahrbahnnutzung (A_{Fb})/ Anteil der rechtsfahrenden Radfahrenden ($1 - A_{Gw, li}$) von 1 annähern sollten (vgl. Bild 6-2). Grundlage für eine logistische Regression ist eine Disaggregation des Datensatzes. Hinsichtlich dessen gibt es zwei Möglichkeiten:

- Die abhängige Variable ist binär codiert: Dies erfordert eine Disaggregation des Datensatzes hinsichtlich der Radfahrenden mit den binär codierten Entscheidungen (Gehweg – Fahrbahn; linksfahrend – rechtsfahrend): Jeder/ Jedem Radfahrenden werden die entsprechenden infrastrukturellen Merkmale des befahrenen Untersuchungsabschnittes zugeordnet.
- Die abhängige Variable repräsentiert mittelbar weiterhin einen Anteil, indem die Ereignisse (bspw. Radfahrende*r fährt auf der der Fahrbahn) der Anzahl der Versuche (Gesamtzahl der Radfahrenden) je Streckenabschnitt gegenübergestellt werden: Für diese Form der logistischen Datenanalyse mit gruppierten Daten müssen homogene Gruppen der Untersuchungsabschnitte hinsichtlich der unabhängigen Variablen gebildet werden (vgl. Fahrmeir et al. 2013, S. 276; Stahel und Pritscher 2004, S. 22). Dabei sollte jede Merkmalskombination nur einmal im Datensatz vorhanden sein. Da die Verkehrsstärke als unabhängige, erklärende Variable für jede betrachtete Straßenseite einen individuellen Wert aufweist, repräsentiert auch jede Straßenseite eine Gruppe. Als abhängige Variablen werden entsprechend o.g. Definition die Anzahl der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($q_{Rf, Fb, Ri i}$; Ereignisse) bzw. die Anzahl der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg ($q_{Rf, Gw, li, Ri i}$; Ereignisse) gegenüber allen Radfahrenden dieser Fahrtrichtung ($q_{Rf, Fb, Ri i} + q_{Rf, Gw, Ri i} + q_{Rf, Gw, li, Ri i}$; Versuche) berücksichtigt.

Die Verwendung von gruppierten Daten hat nach Stahel und Pritscher (2004, S. 23) den Vorteil, dass diese kompakter und informativer dargestellt werden können. Zudem sind vereinzelt Näherungen zur Anpassungsgüte nur für gruppierte Daten aussagekräftig (Stahel und Pritscher 2004, S. 23). Aus diesen Gründen wird die logistische Regression auf Basis der gruppierten Daten modelliert. Der Datensatz ist damit der Selbe wie innerhalb der linearen Regression.

Zusammenfassend ist zu schlussfolgern, dass sowohl die Anwendung der linearen als auch der logistischen Regression kausal und statistisch zu rechtfertigen sind. Aus diesem Grund werden beide Modellansätze verfolgt und vergleichend gegenübergestellt.

6.2.3 Modellaufbau

Lineare Regression

Formel 6-7 zeigt beispielhaft eine mögliche Grundform zur Beschreibung des Anteils Radfahrender auf der Fahrbahn bzw. linksfahrender Radfahrender (vgl. Fahrmeir 2004, S. 495).

$$A = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon_i \tag{Formel 6-7}$$

mit

- A Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn (A_{Fb}) und Anteil linksfahrender Radfahrender ($A_{Gw, li}$) (abhängige Variablen)
- x_k erklärende Variablen, welche mit den Regressionskoeffizienten β_k multipliziert werden
- ε Fehlerterm (stochastische Komponente)

Die Schätzung der Regressionskoeffizienten erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate (ordinary least squares – OLS). Die Grundidee basiert darauf, dass die Summe der quadrierten Abweichungen der Beobachtungen im Vergleich zur Regressionsgerade minimiert wird (Fahrmeir 2004, S. 496).

$$\sum_{i=1}^n (A - \beta_0 - \beta_1 x_1 - \dots - \beta_k x_k)^2 \rightarrow \min_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k} \tag{Formel 6-8}$$

mit

- A Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn (A_{Fb}) und Anteil linksfahrender Radfahrender ($A_{Gw, li}$) (abhängige Variablen)
- x_k erklärende Variablen, welche mit den Regressionskoeffizienten β_k multipliziert werden

Da die unabhängigen Variablen in unterschiedlichen Einheiten vorliegen, sind die Regressionskoeffizienten auch auf den entsprechenden Wertebereich unabhängigen Variablen angepasst. Eine Interpretation hinsichtlich der Wichtigkeit der entsprechenden Variablen auf Basis der Regressionskoeffizienten ist damit nicht möglich. Um die Interpretation zu erleichtern, werden neben den Regressionskoeffizienten standardisierte Regressionskoeffizienten (sog. Beta-Werte) in Abhängigkeit der Standardabweichung der abhängigen und unabhängigen Variable ermittelt (Backhaus et al. 2018, S. 73):

$$\hat{\beta}_i = \beta_i \cdot \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_A} \tag{Formel 6-9}$$

mit

- $\hat{\beta}_i$ standardisierter Regressionskoeffizient (Beta-Wert)
- β_i Regressionskoeffizient
- σ_{x_i} Standardabweichung der unabhängigen Variable
- σ_A Standardabweichung des Anteils Radfahrende auf der Fahrbahn (A_{Fb}) und linksfahrender Radfahrender ($A_{Gw, li}$) (abhängige Variablen)

Grundsätzlich wird das Modell schrittweise aufgebaut. Zur Überprüfung, ob eine Variable in das Modell aufgenommen wird, werden die folgenden Aspekte überprüft:

1. Varianzerklärung (Bestimmtheitsmaß)
2. Signifikanz der Regressionskoeffizienten (t-Test)
3. Beitrag der Regressoren zur Modellerklärung (Varianzanalyse, F-Wert)

Zur Überprüfung der Varianzerklärung wird das Bestimmtheitsmaß ermittelt. Das Bestimmtheitsmaß als Quotient der durch die Regression erklärten Streuung (SQR) und der Gesamtstreuung (SQT) innerhalb der Stichprobe wird wie folgt ermittelt (Fahrmeir 2004, S. 498):

$$R^2 = \frac{SQE}{SQT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Formel 6-10}$$

mit

SQE erklärte Streuung durch die Regression (Sum of Squares Explained deviations)

SQT Gesamtstreuung innerhalb der Stichprobe (Sum of Squares Total)

\hat{y}_i vorhergesagter Wert (Regressionsmodell)

y_i beobachteter Wert (Stichprobe)

\bar{y} Mittelwert

Um bei der multiplen Regression neben der Modellanpassung zusätzlich die Sparsamkeit hinsichtlich der aufgenommenen Variablen zu berücksichtigen, wird aufbauend auf dem Bestimmtheitsmaß das korrigierte Bestimmtheitsmaß ermittelt (Rudolf und Müller 2020, S. 64):

$$R_{\text{korr}}^2 = R^2 - \frac{k \cdot (1 - R^2)}{n - k - 1} \quad \text{Formel 6-11}$$

mit

R^2 Bestimmtheitsmaß

k Anzahl der Prädiktoren

n Stichprobenanzahl

Für die Überprüfung auf Signifikanz der Regressionskoeffizienten wird der t-Test verwendet. Die T-Teststatistik wird wie folgt ermittelt (Fahrmeir 2004, S. 499):

$$T_j = \frac{\beta_j - \beta_{0j}}{\hat{\sigma}_j}, \quad j = 0, \dots, p \quad \text{Formel 6-12}$$

mit

β_j geschätzter Regressionskoeffizienten

β_{0j} Regressionskoeffizient = 0 (H_0 -Hypothes)

$\hat{\sigma}_j$ Geschätzte Standardabweichung

Zur Überprüfung des Beitrags der Regressoren zur Erklärung der abhängigen Variable wird eine Varianzanalyse (analysis of variance – ANOVA) auf Basis des sog. F-Wertes durchgeführt. Grundlage bzw. Hypothese des F-Tests ist, dass sich die erklärte Varianz signifikant von Null unterscheidet. Nach Fahrmeir (2004, S. 500) wird die F-Teststatistik wie folgt ermittelt:

$$F = \frac{SQE}{SQR} \frac{n - p - 1}{p} = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{n - p - 1}{p} \quad \text{Formel 6-13}$$

mit

SQE	erklärte Streuung durch die Regression (Sum of Squares Explained deviations)
SQR	Reststreuung (Sum of Squares Squared Residuals)
n	Stichprobengröße
p	Anzahl der geschätzten Parameter
R ²	Bestimmtheitsmaß

Logistische Regression

Eine mögliche Grundform für das binäre logistische Modell zur Erklärung der Wahrscheinlichkeit, dass Radfahrende auf der Fahrbahn bzw. rechts fahren zeigt Formel 6-14 (vgl. Fahrmeir 2004, S. 507):

$$\log \frac{\pi_i}{1-\pi_i} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad \text{Formel 6-14}$$

mit

π_i	Auftretenswahrscheinlichkeit P ($R_{f_{fb}} = 1$): Radfahrende*r fährt auf der Fahrbahn bzw. P ($R_{f_{gw, li}} = 1$): Radfahrende*r fährt links auf dem Gehweg
x_k	erklärende Variablen, welche mit den Regressionskoeffizienten β_k multipliziert werden

Wie in Kapitel 6.2.2 bereits erwähnt, können die Datensätze gruppiert werden, wenn mehrere Beobachtungen zu gleichen Bedingungen gemacht wurden (Stahel und Pritscher 2004, S. 22). Die Summe der einzelnen Ereignisse (bspw. Radfahrende*r fährt auf der Fahrbahn) werden dann ins Verhältnis zur Gesamtzahl der Versuche (bspw. alle Radfahrenden in der entsprechenden Richtung) gesetzt. Die Grundform des Modells ändert sich dadurch nicht.

Die Schätzung der Koeffizienten erfolgt auf Basis der logarithmierten Likelihood-Funktion (LL). Danach werden die Regressionskoeffizienten so ermittelt, dass das die Log-Likelihood-Funktion maximiert wird (Rudolf und Müller 2020, S. 193):

$$LL = \ln(L) = \sum_{\pi_i = 1} \ln(\pi_i) + \sum_{\pi_i = 0} \ln(1 - \pi_i) \rightarrow \max_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k} \quad \text{Formel 6-15}$$

mit

π_i	Auftretenswahrscheinlichkeit P ($R_{f_{fb}} = 1$): Radfahrende*r fährt auf der Fahrbahn bzw. P ($R_{f_{gw, li}} = 1$): Radfahrende*r fährt links auf dem Gehweg
β_k	Regressionskoeffizienten

Nach Rudolf und Müller (2020, S. 193) ergibt sich bei der logistische Regression der Vorteil, dass die Odds Ratio-Werte (OR; Quotenverhältnis aus Ereignis trifft zu und Ereignis trifft nicht zu) direkt aus den geschätzten Regressionskoeffizienten hervorgehen (Stahel und Pritscher 2004, S. 21):

$$OR = \frac{\text{odds}(\pi_i | x^{(j)})}{\text{odds}(\pi_i | x^{(j)} = x + 1)} = e^{\beta_k} \quad \text{Formel 6-16}$$

mit

π_i	Auftretenswahrscheinlichkeit P ($R_{f_{fb}} = 1$): Radfahrende*r fährt auf der Fahrbahn bzw. P ($R_{f_{gw, li}} = 1$): Radfahrende*r fährt links auf dem Gehweg
x_k	erklärende Variablen
β_k	Regressionskoeffizienten

Zur Interpretation der Regressionskoeffizienten (β) sowie der Odds Ratio (OR) wird nach UZH (2020) Tab. 6-3 vorgeschlagen:

Tab. 6-3 Interpretationshilfe für Regressionskoeffizienten und Odds Ratios nach UZH (2020)

Regressionskoeffizient (β)	Odds Ratio (OR)	P(Y = 1)
$\beta > 0$	$e^\beta > 1$	Zunahme
$\beta = 0$	$e^\beta = 1$	bleibt gleich
$\beta < 0$	$e^\beta < 1$	Abnahme

Grundsätzlich wird das Modell wie auch im Bereich der linearen Regression oder des Unfallmodells (vgl. Kapitel 6.3.2) stufenweise aufgebaut. Da die logistische Regression streng genommen auch eine Unterform von Verallgemeinerten linearen Modellen ist, gibt es innerhalb des Modellaufbaus Parallelen zum Unfallmodell (vgl. Kapitel 6.3.2). Dabei werden die erklärenden Variablen unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte in das Modell aufgenommen:

1. Varianzerklärung (Prüfung auf Basis der Log-Likelihood-Funktion; Residuen-Devianz: Vergleich des erstellten Modells mit dem „maximalen Modell“ (Erklärung 100 % der Reststreuung); McFadden R^2)
2. Signifikanz des Regressionskoeffizienten (Prüfung mit Hilfe des Wald-Tests: Verschiedenheit der ermittelten Regressionskoeffizienten von Null)
3. Modellgüte bzw. Signifikanz der Modelleffekte (Prüfung mit Hilfe des Likelihood-Ratio-Tests: Verbesserung des Modells mit der Variable gegenüber dem Modell ohne die Berücksichtigung dieser Variable)
4. Informationskriterium nach Akaike (AIC): Prüfung des Zusammenhangs zwischen Anpassungsgüte und Komplexität des Modells)

Die Überprüfung der Varianzerklärung kann näherungsweise anhand der Residuen-Devianz (Abweichung) sowie analog zur linearen Regression über sog. Pseudo-Bestimmtheitsmaße erfolgen. Voraussetzung dafür ist, dass die Daten maximal gruppiert sind. Die Residuen-Devianz ergibt sich aus der Differenz zwischen dem maximalen Log-Likelihood (Nullmodell) und dem Log-Likelihood des angepassten Modells (vgl. Fahrmeir et al. 2013, S. 287):

$$D = -2 \sum_{i=1}^G (l_i(\hat{\pi}_i) - l_i(\bar{y}_i)) \quad \text{Formel 6-17}$$

mit

- \bar{y}_i relative Häufigkeit für Gruppe i
 $\hat{\pi}_i$ modellhaft geschätzte Auftretenswahrscheinlichkeit
 G Anzahl der Gruppen

Wie bereits erwähnt, werden zusätzlich Pseudo-Bestimmtheitsmaße ermittelt, die hinsichtlich der Interpretation mit dem Bestimmtheitsmaß der linearen Regression (vgl. Formel 6-10) vergleichbar sind – das McFadden R^2 , Cox und Snell R^2 und Nagelkerke R^2 . Grundlage bilden die Log-Likelihood-Funktionen des Basismodells sowie des geschätzten Modells. Das McFadden R^2 wird wie folgt ermittelt (Backhaus et al. 2018, S. 298):

$$\text{McF-R}^2 = 1 - \left(\frac{LL_v}{LL_0} \right) \quad \text{Formel 6-18}$$

mit

- LL_0 Log-Likelihood-Wert des Basismodells
 LL_v Log-Likelihood-Wert Gesamtmodells

Nach Backhaus et al. (2018, S. 299) bedeuten Werte von 0,2 bis 0,4 bereits eine gute Modellanpassung.

Das Cox und Snell R^2 kann wie folgt berechnet werden (Backhaus et al. 2018, S. 299):

$$R_{CS}^2 = 1 - \left(\frac{L_0}{L_V} \right)^{\frac{2}{n}} \quad \text{Formel 6-19}$$

mit

- L_0 Likelihood-Wert des Basismodells
- L_V Likelihood-Wert des Gesamtmodells
- n Stichprobenumfang

Nach Backhaus et al. (2018, S. 299) hat das Cox und Snell R^2 den Nachteil, dass der Wert 1 selbst bei optimaler Vorhersage nicht erreicht werden kann. Das Nagelkerke R^2 vermeidet dieses (Backhaus et al. 2018, S. 299):

$$R_N^2 = \frac{R_{CS}^2}{1 - L_0^{\frac{2}{n}}} \quad \text{Formel 6-20}$$

mit

- R_{CS}^2 Cox und Snell R^2
- L_0 Likelihood-Wert des Basismodells
- n Stichprobenumfang

Die Prüfung der Signifikanz der Variable erfolgt auf Basis des Wald-Tests. Die Wald-Teststatistik wird wie folgt ermittelt (vgl. Rudolf und Müller 2012, S. 195):

$$W = \frac{\beta_i}{SE_{\beta_i}} \quad \text{Formel 6-21}$$

mit

- β_i Regressionskoeffizient der Variable x_i
- SE_{β_i} Standardfehler von β

Die Überprüfung der Modellgüte (Signifikanz der Modelleffekte) erfolgt grundsätzlich auf einer Prüfung der Verbesserung des Modells mit einer aufgenommenen Variable gegenüber dem Modell ohne die Berücksichtigung dieser Variable. Hierzu wird der Likelihood-Ratio-Test auf Basis der Devianz-Differenz verwendet (Stahel und Pritscher 2004). Die entsprechende Teststatistik wird wie folgt ermittelt (vgl. Stahel und Pritscher 2004, S. 29):

$$2 (\ln^{(M_2)} - \ln^{(M_1)}) = D(\bar{y}_i; \hat{\pi}_i^{(M_1)}) - D(\bar{y}_i; \hat{\pi}_i^{(M_2)}) \quad \text{Formel 6-22}$$

mit

- M_1 Modell ohne aufgenommener Variable
- M_2 Modell mit aufgenommener Variable
- \bar{y}_i relative Häufigkeit für Gruppe i
- $\hat{\pi}_i$ modellhaft geschätzte Auftretenswahrscheinlichkeit

Bei inhaltlich plausiblen Ausprägungen der Wirkungszusammenhänge werden alle Variablen auf Basis eines Signifikanzniveaus von $p < 0,1$ hinsichtlich der Signifikanz der Modelleffekte in das Modell aufgenommen. Das ebenfalls etablierte Signifikanzniveau von $p < 0,05$ ist historisch entstanden, in Zeiten, in denen einer Ermittlung der exakten Signifikanz aus technischen Gründen nicht möglich war (Field 2009, S. 51). Die Anwendung muss daher für die sachlogische Anwendung nicht immer sinnvoll sein.

Zur Auswahl der am besten geeigneten Modelle wird zudem das Informationskriterium von Akaike (AIC) berücksichtigt. Das AIC bewertet den Zusammenhang zwischen Anpassungsgüte und Komplexität des Modells, durch die Berücksichtigung der Anzahl der aufgenommenen Variablen. Das unterstützt die Abwägung zwischen einer guten Anpassung (Minimierung der systematischen Reststreuung) und der Einfachheit des Modells (Maximierung

der Plausibilität und damit dem Erklärungsgehalt der einzelnen Variablen). Ein hoher AIC-Wert repräsentiert eine hohe Komplexität des Modells. Das Informationskriterium nach Akaike wird wie folgt ermittelt (vgl. Stahel und Pritscher 2004, S. 31):

$$\text{AIC} = 2 \ln(\hat{\beta}; y) + 2p \quad \text{Formel 6-23}$$

mit

$\ln(\hat{\beta}; y)$ Log-Likelihood an der Stelle des jeweiligen Maximum-Likelihood-Schätzers

p Anzahl der erklärenden Variablen im Modell

6.2.4 Residuenanalyse

Neben der globalen Beurteilung der Modellgüte der Analysemodelle werden im Rahmen der Residuenanalyse

- Ergebnisbereiche (Abweichungen) sowie
- einzelne Beobachtungen

begutachtet. Dies können bspw. Einflüsse auf die abhängige Variable sein, die nicht durch die Modelle erklärt werden können. Diese Fälle werden grundsätzlich nicht aus der Modellschätzung ausgeschlossen, sondern dienen vielmehr zur weiteren Erklärung bzw. Interpretation der Modelle. Im folgenden wird die Vorgehensweise der Analyse der Residuen der linearen und logistischen Regression erläutert:

Lineare Regression

Die Residuenanalyse des linearen Regressionsmodells beinhaltet die Überprüfung von

- Autokorrelation der Residuen (Durbin-Watson-Kennwert),
- Normalverteilung der Residuen (Tukey-Anscombe-Plot, QQ-Plot) sowie
- einflussreichen Fällen im Modell (Hebelwirkung, Cook-Distanz).

Die Überprüfung auf Autokorrelation wird auf Basis des Durbin-Watson-Kennwerts überprüft. Eine Autokorrelation liegt grundsätzlich vor, wenn die Beobachtungen einer Variable mit sich selbst korrelieren. Das heißt, die Residuen (Abweichungen) sind nicht zufällig, sondern folgen einem bestimmten Muster (bspw. Zunahme der Abweichungen bei zunehmender Verkehrsstärke). Der Durbin-Watson-Kennwert kann wie folgt berechnet werden (Fahrmeir et al. 2013, S. 196):

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (\hat{\epsilon}_i - \hat{\epsilon}_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \hat{\epsilon}_i^2} \quad \text{Formel 6-24}$$

mit

$\hat{\epsilon}_i$ Residuen an der Stelle i ($\hat{y}_i - y_i$)

Der Durbin-Watson-Kennwert kann Werte zwischen 0 und 4 ergeben wobei Werte in der Nähe von 0 auf eine positive und Werte in der Nähe von 4 auf eine negative Autorrelation hinweisen (Fahrmeir et al. 2013, S. 196). Werte zwischen 1,5 und 2,5 deuten auf keine störende Autokorrelation hin.

Die Überprüfung auf normalverteilte Residuen kann grundsätzlich grafisch erfolgen. Hierzu können die Residuen (Ordinate) in Form eines Tukey-Anscombe-Plots über den mit dem Modell ermittelten Anteilen der Fahrbahnnutzung bzw. linksfahrender Radfahrender (Abszisse) dargestellt werden. Streuen die Datenpaare zufällig um eine horizontale Linie ist davon auszugehen, dass die Residuen unabhängig und identisch verteilt sind. Folgen die Datenpaare einem Muster (bspw. trichterförmig oder quadratisch), liegen unterschiedliche Fehlervarianzen oder ein nichtlinearer Trend der Residuen vor. Eine weitere Möglichkeit ist der sog. QQ-Plot. Hierfür werden die geordneten Residuen über den Quantilen der Standardnormalverteilung aufgetragen. Streuen die Werte gleichmäßig um die Gerade kann von einer Normalverteilung der Residuen ausgegangen werden.

Die Überprüfung der einflussreichen Fälle im Modell erfolgt auf Basis der Hebelwirkung und der Cook-Distanz:

Durch die Hebelwirkung (leverage) wird der Einfluss eines Untersuchungsabschnittes auf den Erwartungswert an der entsprechenden Stelle beschrieben. Je größer die Distanz eines Untersuchungsabschnittes vom Durchschnitt, desto größer ist die entsprechende Wirkung. Als Distanzmaß wird der sog. Hebelwert bzw. die Mahalanobis-Distanz (Hebelwert = Mahalanobis-Distanz/(N-1)) verwendet. Dieser kann nach Fahrmeir et al. (2013, S. 165) wie folgt ermittelt werden:

$$h_{ij} = \frac{1}{n} \cdot \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Formel 6-25}$$

mit

n	Stichprobenumfang
x_i	Kovariable der Beobachtung i
\bar{x}	Mittelwert von x

Zur Einordnung der ermittelten Hebelwerte schlagen Pituch und Stevens (2016, S. 108) vor, Werte $> 3k/n$ (k: Anzahl der Variablen, n: Stichprobenumfang) näher zu untersuchen.

Durch die Cook-Distanz können einflussreiche Fälle in einem Modell ermittelt werden. Konkret wird die Wirkung des Ausschlusses eines Falles auf die Ermittlung der Regressionsfunktion bzw. -koeffizienten quantifiziert. Die Cook-Distanz (CD_i) wird wie folgt berechnet (vgl. Pituch und Stevens 2016, S. 112):

$$CD_i = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{\mu}_j - \hat{\mu}_{j(i)})^2}{p \cdot MS_{res}} \quad \text{Formel 6-26}$$

mit

n	Stichprobenumfang
$\hat{\mu}_j$	geschätzter Erwartungswert von y für den Fall j
$\hat{\mu}_{j(i)}$	geschätzter Erwartungswert von y für den Fall j ohne den Fall i
p	Anzahl der erklärenden Variablen im Modell
MS_{res}	Varianz des Residuums

Nach Pituch und Stevens (2016, S. 112) repräsentieren Werte > 1 eine Auffälligkeit und sollten näher untersucht werden. Hutcheson und Sofroniou (1999, S. 24) empfehlen hingegen die Grenzwertfestlegung in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs (n) und der Anzahl der Variablen (k) im Modell $4/(n-k)$.

Logistische Regression

Die Residuenanalyse des logistischen Regressionsmodells beinhaltet die Überprüfung von

- Linearität sowie unabhängige und identische Verteilung der Residuen (Tukey-Anscombe-Plot) sowie
- einflussreichen Fällen im Modell (Hebelwirkung: siehe Formel 6-25, Cook-Distanz: siehe Formel 6-26).

Im Gegensatz zur linearen Regression haben die Residuen innerhalb der logistischen Regression verschiedene Verteilungen. Außerdem liegt für die Regressoren zur Ermittlung der angepassten Werte π_i in der Regel keine Verteilungsannahme vor (Stahel und Pritscher 2004, S. 33). Daher werden die Residuen der logistischen Regression auf Linearität sowie unabhängige und identische Verteilung geprüft. Dies erfolgt grafisch auf Basis eines Tukey-Anscombe-Plots (vgl. Abschnitt „lineare Regression“).

Um einflussreiche Fälle im Modell zu erkennen, werden wie im Bereich der linearen Regression und im Unfallmodell die Hebelwirkung sowie die Cook-Distanz ermittelt (siehe Formel 6-25 und Formel 6-26).

6.3 Unfallmodell

6.3.1 Statistische Verteilung

Wie in Kapitel 4.4 geschlussfolgert wird, ist eine vollständige Beschreibung des Unfallgeschehens unterschiedlicher Mischverkehrsführungen, mit Berücksichtigung der Verkehrsstärke sowie mehrerer potentiell sicherheitsrelevanter Infrastruktureigenschaften im Mit-Ohne-Vergleich, nur durch die Anwendung multivariater statistischer Verfahren möglich. Bei der Wahl einer geeigneten Methode ist vor allem die stochastische Natur des Auftretens von Unfällen zu berücksichtigen: Unfälle sind seltene, diskrete Ereignisse, die keine negativen Werte annehmen können. Die Abweichung des Auftretens von Unfällen an einer Stelle kann mit Hilfe der Poisson-Verteilung beschrieben werden. Das kann damit erklärt werden, dass der grundsätzlich binomialverteilte Zusammenhang, wonach die Anzahl der Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmenden sehr groß im Vergleich zur Eintreffenswahrscheinlichkeit eines Unfalls ist, durch eine Poisson-Verteilung angenähert werden kann (Aurich 2012, S. 24). Beim Vergleich der Unfallzahlen zwischen mehreren Stellen oder Abschnitten innerhalb eines Netzes, weisen diese Unfallzahlen häufig Überdispersion auf – das heißt, die Varianz ist größer als der Mittelwert. Dieser Varianzüberschuss kann bei Verwendung der Poisson-Verteilung zu einer unzuverlässigen Schätzung der Regressionskoeffizienten führen. Eine Möglichkeit diese Überdispersion zu modellieren, ist die Verwendung der Negativ-Binomial-Verteilung (u.a. Maher und Summersgill 1996, S. 288 ff.; Miaou 1994, S. 5), welche mit Hilfe des Dispersions-Parameters eine zuverlässige Schätzung der Regressionskoeffizienten erlaubt. Theoretischer Hintergrund ist somit die Überlagerung der Abweichungen des Auftretens von Unfällen an einer Stelle im Betrachtungszeitraum (Poisson-Verteilung) und der Abweichungen zwischen mehreren Stellen im Untersuchungskollektiv (Gamma-Verteilung). Die mathematische Beschreibung der Überlagerung aus Poisson- und Gamma-Verteilung (der zeitlichen und räumlichen Verteilung) ergibt die Negativ-Binomialverteilung.

Wie Tab. 4-1 (siehe Kapitel 4.1.1) zeigt, werden bei Unfalluntersuchungen auf Basis von Regressionsmodellen, welche die stochastische Natur des Auftretens von Unfällen berücksichtigen, häufig Generalisierte lineare Modelle (Generalized Linear Models; GLM) verwendet (Alrutz et al. 2015, Aurich et al. 2015, Elvik 2009, Elvik und Goel 2019, Jensen 2008, Schüller et al. 2020b). Auch Schröter et al. (2020, S. 12 ff.) können auf Basis einer umfangreichen Dokumentation des Kenntnisstandes zum Unfallgeschehen Radfahrender zeigen, dass GLM die häufigste Modellform zur multivariaten Beschreibung des Unfallgeschehens darstellen (u.a. Brüde und Larsson 1993, Kim et al. 2012, Nordback et al. 2014, Schepers et al. 2011, Turner et al. 2006). Nach Schüller (2010, S. 76) wurde diese Modellform in Verbindung mit Unfallanalysen an Kreisverkehren erstmals von Maycock und Hall (1984) eingeführt und u.a. durch Greibe (2003), Maher und Summersgill (1996), Miaou (1994) und Taylor et al. (2002) methodisch weiterentwickelt.

Tab. 4-1 (siehe Kapitel 4.1.1) und Schröter et al. (2020, S. 12 ff.) zeigen zudem eine häufige Anwendung von Logit-Modellen. Dabei wird die abhängige Variable kategorial einbezogen und eignet sich zur Vorhersage der Unfallschwere oder einer Auftretenswahrscheinlichkeit eines Unfalls bei gegebenen infrastrukturellen und verkehrlichen Bedingungen und kommen daher häufig bei Cross-Over-Studien zur Anwendung (bspw. Chen und Shen 2016, Harris et al. 2011, Harris et al. 2013, Pai 2011, Teschke et al. 2012, Teschke et al. 2014).

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführende Analyse des Unfallgeschehens werden GLM (Poisson und Negativ-Binomial) verwendet, deren Aufbau im Folgenden erläutert wird.

6.3.2 Modellaufbau

Formel 6-27 zeigt beispielhaft eine mögliche Grundform zur Beschreibung des Unfallgeschehens für Streckenabschnitte (vgl. u.a. Greibe 2003, S. 276, Aurich et al. 2015, S. 86).

$$U = q^{\beta_1} \cdot e^{k + \sum_{i=1}^n x_i \cdot \gamma_i} \quad \text{Formel 6-27}$$

mit

U	Anzahl der Unfälle je Infrastrukturelement (abhängige Variable)
k	Konstante zur Beschreibung der Gesamtvarianz des Unfallgeschehens
q	Verkehrsstärke (Expositionsgröße), mit Regressionskoeffizient β_1
x_i	weitere erklärende Variablen, welche mit den Koeffizienten γ_i multipliziert werden (Berücksichtigung als Exponentialterm)

Die Variablen sind grundsätzlich multiplikativ miteinander verknüpft und gehen als Potenz- (Exposition) oder Exponentialterm (weitere Merkmale der Untersuchungsabschnitte) in die Modellgleichung ein, was die Beschreibung nichtlinearer Zusammenhänge ermöglicht. Die Berücksichtigung der Expositionsgröße (Verkehrsstärke) innerhalb der Potenzfunktion folgt der theoretischen Annahme der Entstehung von Unfällen. Denn wenn die Verkehrsstärke gleich Null ist, werden auch keine Unfälle prognostiziert. Zur Schätzung der Koeffizienten wird die Negativ-Binomial-Verteilung verwendet. Wie in Kapitel 6.3.1 bereits erläutert, erlaubt die Negativ-Binomial-Verteilung mit Hilfe des Dispersions-Parameter auch bei Überdispersion eine zuverlässige Schätzung der Regressionskoeffizienten.

Grundsätzlich werden die Unfallprognosemodelle, wie auch die Akzeptanzmodelle (vgl. Kapitel 6.2.3) schrittweise aufgebaut. Aufbauend auf dem sogenannten Score-Modell, welches nur die Expositionsgrößen (Verkehrsstärke) enthält, werden die weiteren Einflussgrößen schrittweise in das Modell aufgenommen. Die Länge der Untersuchungsabschnitte sowie der Betrachtungszeitraum werden als Offset-Variable in das Modell aufgenommen, so dass das Modell im Ergebnis Unfälle/ (km*a) prognostiziert. In Anlehnung an die Untersuchungen von u.a. Aurich (2012), Aurich et al. (2015), Hantschel et al. (2016), Schüller et al. (2020b) und Schröter et al. (2020), werden die folgenden Aspekte nach Aufnahme einer Variable geprüft:

1. Varianzerklärung (Prüfung auf Basis der Log-Likelihood-Funktion; Pearson- χ^2 -Teststatistik: Vergleich des erstellten Modells mit dem „maximalen Modell“ (Erklärung 100 % der Reststreuung))
2. Signifikanz des Regressionskoeffizienten (Prüfung mit Hilfe des Wald-Tests: Verschiedenheit der ermittelten Regressionskoeffizienten von Null; siehe Kapitel 6.2.3, Formel 6-21)
3. Modellgüte bzw. Signifikanz der Modelleffekte (Prüfung mit Hilfe des Likelihood-Ratio-Tests auf Basis der Devianz-Differenz: Verbesserung des Modells mit der Variable gegenüber dem Modell ohne die Berücksichtigung dieser Variable; siehe Kapitel 6.2.3, Formel 6-22)
4. Informationskriterium nach Akaike (AIC): Prüfung des Zusammenhangs zwischen Anpassungsgüte und Komplexität des Modells; siehe Kapitel 6.2.3, Formel 6-23)

Die Varianzerklärung wird anhand der Pearson- χ^2 -Teststatistik des Poisson-Modells ermittelt. Ist der Quotient aus $\chi^2/df = 1$, ist die gesamte systematische Varianz erklärt. Bei $\chi^2/df > 1$ liegt Überdispersion (die Varianz der abhängigen Variable überschreitet die Nominalvarianz der angenommenen Poisson-Verteilung) und bei $\chi^2/df < 1$ Unterdispersion vor (die Varianz der abhängigen Variable unterschreitet die Nominalvarianz der angenommenen Poisson-Verteilung). Die Pearson- χ^2 -Teststatistik für den Poisson-Fall wird wie folgt ermittelt (vgl. Fahrmeir et al. 2013, S. 297):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^G \frac{(U_i - \hat{U}_i)^2}{\hat{U}_i / n_i} \quad \text{Formel 6-28}$$

mit

- U_i beobachtete Unfallhäufigkeit
 \hat{U}_i modellhaft geschätzte Unfallhäufigkeit
 n_i Anzahl Untersuchungsabschnitte

Die Ermittlung der Signifikanz des Regressionskoeffizienten sowie der Überprüfung der Modellgüte (Signifikanz der Modelleffekte) ist in Kapitel 6.2.3, Formel 6-21 und Formel 6-22 beschrieben. Wie im Bereich der Akzeptanz-Modelle werden bei inhaltlich plausiblen Ausprägungen der Wirkungszusammenhänge alle Variablen auf Basis eines Signifikanzniveaus von $p < 0,1$ hinsichtlich der Signifikanz der Modelleffekte in das Modell aufgenommen (vgl. Kapitel 6.2.3 bzw. Field 2009, S. 51).

Die Ermittlung des Informationskriteriums von Akaike (AIC) erfolgt wie im logistischen Modell zur Akzeptanz nach Formel 6-23 (siehe Kapitel 6.2.3).

6.3.3 Residuenanalyse

Wie im Kapitel 6.2.4 beschrieben wurde, werden im Rahmen der Residuenanalyse einzelne Beobachtungen oder Ergebnisbereiche (Abweichungen) begutachtet. Auch im Rahmen der Unfallanalyse werden diese Fälle grundsätzlich nicht aus der Modellschätzung ausgeschlossen. Sie dienen vielmehr zur weiteren Erklärung bzw. Interpretation der Modelle. Innerhalb der Residuenanalyse werden in Anlehnung an die Untersuchungen von Aurich (2012), Hantschel et al. (2016) und Schröter et al. (2020) die folgenden Distanzmaße verwendet:

- Darstellung der kumulierten Response-Residuen über der Verkehrsstärke (CURE-Plot)
- Hebelwirkung (siehe Kapitel 6.2.4, Formel 6-25)
- Cook-Distanz (siehe Kapitel 6.2.4, Formel 6-26)

Die Darstellung der kumulierten Response-Residuen über der Verkehrsstärke dient dazu, unberücksichtigte systematische Einflüsse auf das Modell auszuschließen. Denn grundsätzlich sollten die Abweichungen mit einem Mittelwert von Null normalverteilt sein. Im Idealfall bewegen sich die kumulierten Abweichungen zufällig um die Abszisse (bspw. Verkehrsstärke) und enden mit dem Wert Null (siehe Bild 6-3).

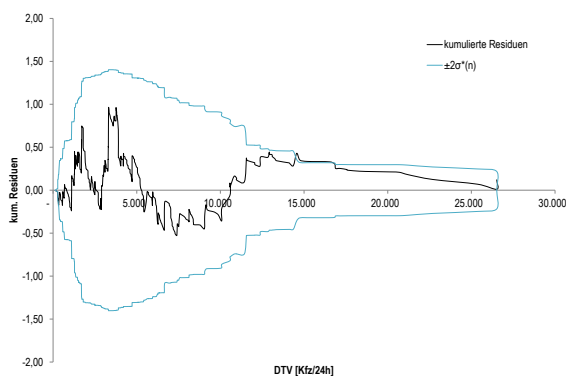


Bild 6-3 Beispiel für einen CURE-Plot (Hantschel et al. 2016, S. 170)

Zur Darstellung der kumulierten Residuen werden Pearson-Residuen verwendet, die wie folgt berechnet werden (vgl. Pituch und Stevens 2016, S. 451):

$$R_{P,i} = \frac{y_i - \mu_i}{\sqrt{\text{Var}(\mu_i)}} \quad \text{Formel 6-29}$$

mit

- y_i beobachteter Wert
 μ_i geschätzter Erwartungswert von y_i
 $\text{Var}(\mu_i)$ Varianz des geschätzter Erwartungswert von μ_i

Der in Bild 6-3 dargestellte Vertrauensbereich $\pm 2\sigma^*(n)$ dient nach Hauer und Bamfo (1997, S. 10) dazu, Wertebereiche zu identifizieren, in denen das Modell die Empirie systematisch über- oder unterschätzt. Dieser kann in Abhängigkeit der Standardabweichung σ^* an der Stelle i wie folgt berechnet werden (Hauer und Bamfo 1997, S. 11):

$$\sigma^*(i) = \sqrt{\hat{\sigma}^2(i) \cdot \left(1 - \frac{\hat{\sigma}^2(i)}{\hat{\sigma}^2(n)}\right)}$$

Formel 6-30

mit

$\hat{\sigma}^2(i)$ geschätzte Varianz an der Stelle n

n Stichprobenumfang

Die Ermittlung der Hebelwirkung sowie der Cook-Distanz sind in Kapitel 6.2.4, Formel 6-25 und Formel 6-26 dokumentiert.

7 ANALYSE AKZEPTANZ

7.1 Datengrundlage im Überblick

Der Analyse der Anteile der Radfahrenden auf der Fahrbahn sowie der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg liegen insgesamt 407 Straßenseiten (321 mit Mischverkehr, 13 mit Piktogrammen, 73 mit Schutzstreifen) mit einer Gesamtlänge von 187 km zugrunde (vgl. Kapitel 5.1.1; 207 Untersuchungsabschnitte entsprechen 414 Straßenseiten abzüglich von 7 Straßenseiten, auf denen kein Gehweg vorhanden ist oder auf denen der Gehweg nach ZZ 1022-10 StVO für Radfahrende freigegeben ist). Dabei wurden insgesamt 79.173 Radfahrende (68.844 Radfahrende auf der Fahrbahn und 4.968 linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg) erfasst. Tab. 7-1 zeigt alle berücksichtigten metrischen Variablen und deren Verteilung im Überblick. Abweichend zu den in Kapitel 5.1.3 vorgestellten Merkmalen konnten die Merkmale Anzahl Grundstückzufahrten (N_{Zf}) und Anzahl Haltestellen (N_{HST}) nicht berücksichtigt werden, da diese Merkmale nicht differenziert nach den Straßenseiten erhoben wurden, obwohl sie je nach Straßenseite variieren können. Eine Berücksichtigung dieser Merkmale könnte daher zur Fehlinterpretation des Einflusses führen. Die Merkmale Anzahl der Anschlussknotenpunkte (N_{AKP}) und Anzahl der Querungsanlagen (N_{FBT} , N_{FLSA} , $N_{FGÜ}$) wurden auf die Länge bezogen.

Tab. 7-1 Überblick metrische Variablen und deren Verteilung – Akzeptanzmodelle

Merkmal	Codierung	Einheit	Min	Q 15	Mittel	Q 85	Max
Verkehrsstärke Radfahrende auf der Fahrbahn (Zählung)	$q_{Rf, Fb}$	Rf/h	0	6	43	84	389
Verkehrsstärke Radfahrende auf dem Gehweg (Zählung)	$q_{Rf, Gw}$	Rf/h	0	1	8	14	192
Verkehrsstärke Radfahrende Gesamt (Zählung)	$q_{Rf, Ges}$	Rf/h	2	9	51	96	403
Verkehrsstärke Kfz (Zählung)	q_{Kfz}	Kfz/h	11	182	392	623	1.314
Verkehrsstärke SV (Zählung)	q_{SV}	Kfz/h	0	4	14	22	206
Verkehrsstärke Gehende (Zählung) ³⁴	q_{Fg}	Fg/h	0	4	72	120	1.135
Schwerverkehrsanteil	SV_{Anteil}	%	0%	1%	4%	5%	25%
nutzbare Fahrstreifenbreite Mischverkehr und Piktogramme	$B_{FS (MV, Picto)}$	m	2,50	3,00	3,37	3,75	4,75
nutzbare Fahrstreifenbreite Schutzstreifen	$B_{FS (SSF)}$	m	2,25	2,45	3,08	3,65	4,75
Breite Schutzstreifen	B_{SSF}	m	1,25	1,25	1,57	1,85	2,00
Breite Sicherheitsraum ruhender Verkehr Schutzstreifen	$B_{SSFsich}$	m	0,00	0,00	0,37	0,70	0,75
Breite Sicherheitsraum ruhender Verkehr Piktogramme	$B_{PiktoSich}$	m	0,35	0,50	0,61	0,85	1,00
Breite Gehweg	B_{GW}	m	0,00	2,00	2,64	3,50	5,10
Anteil Länge ruhender Verkehr	AL_{V}	%	0%	0%	50%	86%	100%
Anteil Länge Geschäftsbesatz	AL_{G}	%	0%	0%	25%	57%	99%
Umfeldfaktor	UF	-	0,00	0,97	1,54	2,11	2,98
Anzahl Anschlussknotenpunkte Lichtsignalanlage	$N_{AKP, LSA}$	AKP/km	0,00	0,00	0,68	2,27	8,26
Anzahl Anschlussknotenpunkte Vorfahrtzeichen	$N_{AKP, VZ}$	AKP/km	0,00	2,17	6,06	10,17	17,54
Anzahl Mittelinseln (Querungsanlage)	N_{FBT}	QA/km	0,00	0,00	0,32	0,00	5,78
Anzahl LSA (Querungsanlage)	N_{FLSA}	QA/km	0,00	0,00	0,49	1,52	5,62
Anzahl FGÜ (Querungsanlage)	$N_{FGÜ}$	QA/km	0,00	0,00	0,38	0,00	7,09

³⁴ Liegt nicht für alle Untersuchungsabschnitte vor (vgl. Kapitel 5.2.1; Tab. 5-3).

Die Verkehrsstärke wird dabei im Zählzeitraum (und nicht hochgerechnet) berücksichtigt, da auch die Akzeptanz für diese entsprechenden Zeiträume erfasst wurde. Betrachtet man die Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs ist festzustellen, dass das Kollektiv die Bandbreite der Grenzwerte aus den nationalen Regelwerken für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen abdeckt (vgl. Kapitel 3.1 und Tab. 3-2).

Hinsichtlich der in den nationalen Regelwerken empfohlenen Fahrbahnbreiten zeigt sich, dass für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr alle relevanten Fahrbahnbreiten im Kollektiv vertreten sind. Das betrifft Fahrbahnbreiten (Fahrstreifenbreiten) von $< 6,00$ m ($< 3,00$ m), zwischen $6,00$ m ($3,00$ m) und $7,00$ m ($3,50$ m) als „kritische Profile“ sowie $> 7,00$ m ($> 3,50$ m) (vgl. Kapitel 3.1 und Tab. 3-3). Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass mehr als die Hälfte aller Mischverkehrsabschnitte die „kritische“ Profilbreite aufweisen (siehe Tab. 7-2). Die mittlere Verkehrsstärke auf diesen Abschnitten beträgt 310 Kfz/ ($h \cdot \text{Straßenseite}$) und liegt damit über den Empfehlungen nach FGSV (2010a, S. 22) (siehe Kapitel 3.1, Tab. 3-1). Die Abschnitte mit Schutzstreifen unterschreiten die vorgegebene nutzbare Mindestbreite von $4,50$ m ($2,25$ m) nicht (vgl. Kapitel 3.1 und Tab. 3-3). Hinsichtlich der Breite der Schutzstreifen sind sowohl solche mit Mindestbreite ($1,25$ m), Regelbreite ($1,50$ m) aber auch mit Breiten $> 1,50$ m im Kollektiv vertreten. Markierte Sicherheitsräume zum ruhenden Verkehr sind teilweise nicht vorhanden, teilweise untermäßig ($< 0,50$ m) und teilweise mit Regelmaß ($0,50$ m) und maximal mit $0,75$ m bemessen (vgl. Kapitel 3.1 und Tab. 3-3). Alle weiteren metrischen Variablen sind aufgrund fehlender Vergleichbarkeit bspw. zu Vorgaben in Regelwerken nur schwer interpretierbar.

Eine Übersicht der kategorialen Variablen, deren Verteilung im Kollektiv und die entsprechenden Anteile der Fahrbahnnutzung (A_{Fb}) sowie links auf dem Gehweg fahrender Radfahrender ($A_{Gw, li}$) zeigt Tab. 7-2. Die Fahrstreifen-, Schutzstreifen- und Sicherheitsraumbreite wurde neben der metrischen Form auch in Anlehnung an das Regelwerk (vgl. vgl. Kapitel 3.1 und Tab. 3-3) kategorisiert berücksichtigt (vgl. Kapitel 7.3.2 und 7.3.3). Auf Basis der kategorialen Variablen lassen sich erste gröbere Tendenzen (Interpretation der Mittelwerte) zum Einfluss auf die Akzeptanz (hohe Akzeptanz entspricht einem hohen A_{Fb} und niedrigen $A_{Gw, li}$) ableiten:

- niedrigere Akzeptanz bei zweistreifigen im Vergleich zu einstreifigen Richtungsfahrbahnen (N_{FS})
- höhere Akzeptanz auf Abschnitten mit Schutzstreifen im Vergleich zum Mischverkehr ohne Schutzstreifen (RVF)
- niedrigere Akzeptanz bei kritischen Profillbreiten ($B_{FS, KLS (MV, Piktto)}$ zwischen $3,00$ m und $3,50$ m)
- höhere Akzeptanz mit zunehmender Breite der Schutzstreifen ($B_{SSF, KLS}$)
- höhere Akzeptanz mit zunehmender Breite markierter Sicherheitsräume bei Schutzstreifen ($B_{RVFSich, KLS (SSF)}$)
- höhere Akzeptanz mit abnehmender zulässiger Geschwindigkeit (v_{zul})
- niedrigere Akzeptanz bei Vorhandensein einer baulichen Mitteltrennung (MT) vermutlich aufgrund einer höheren Trennwirkung
- höhere Akzeptanz auf Abschnitten in Oberzentren im Vergleich zu Mittelzentren (ZST_SrV), wobei vermutet wird, dass die Gruppierung der Untersuchungsstadt nach Zentralität stellvertretend für ein insgesamt höheres Radverkehrsaufkommen steht – dies kann allerdings anhand der in Anlage 5 dokumentierten Modal-Split-Werte des Radverkehrs nicht bewiesen werden, da insbesondere für die Mittelzentren keine Daten vorliegen.

Aus dieser ersten deskriptiven Analyse sind hingegen keine erkennbaren Unterschiede hinsichtlich des Vorhandenseins von Gleisen im Mischverkehr (Gleise) sowie der Breite des Sicherheitsraumes bei Piktogrammen ($B_{RVFSich, KLS (Piktto)}$) abzuleiten. Die Tendenzen hinsichtlich der Variablen zum ruhenden Verkehr lassen sich nur schwer in einen unmittelbaren Zusammenhang mit den A_{Fb} und $A_{Gw, li}$ bringen. Denn die Zunahme des A_{Fb} und Abnahme des $A_{Gw, li}$ bei Vorhandensein von ruhendem Verkehr (rV), einer zunehmenden Komplexität der Anordnung (rV-Art) sowie der Lage ($Lage_{rV}$) lässt sich vor dem Hintergrund, dass parkende Kfz einen negativen Einfluss auf die subjektive Sicherheit der Radfahrenden besitzen (vgl. Kapitel 4.3.1) kaum interpretieren. Vielmehr wird vermutet, dass dieser tendenzielle Zusammenhang stellvertretend für eine intensivere Umfeldnutzung und damit auch höheren Verkehrsstärken des Radverkehrs steht. Welche der unabhängigen Variablen tatsächlich miteinander korrelieren folgt in Kapitel 7.2.

Tab. 7-2 Überblick kategoriale (ordinale) Variablen und deren Verteilung – Akzeptanzmodelle

Merkmal	Codierung	Einheit	Ausprägung	Anzahl	Anteil Anzahl	Länge [km]	Anteil Länge	Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn (A _{Fb})					Anteil linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg (A _{Gw, li})				
								Min	Q 15	Mittel	Q 85	Max	Min	Q 15	Mittel	Q 85	Max
Anzahl Fahrstreifen	N _{FS}	-	1	334	82%	153,70	82%	0,06	0,65	0,82	0,96	1,00	0,00	0,01	0,08	0,15	0,52
			2	73	18%	33,28	18%	0,08	0,38	0,72	0,93	1,00	0,00	0,02	0,12	0,22	0,75
Radverkehrsführungsform	RVF	-	0: Mischverkehr	321	79%	146,28	78%	0,06	0,59	0,78	0,95	1,00	0,00	0,01	0,09	0,16	0,75
			1: Piktogramme	13	3%	4,70	3%	0,65	0,84	0,89	0,96	0,99	0,00	0,00	0,05	0,07	0,26
			2: SSF	73	18%	36,00	19%	0,51	0,77	0,87	0,97	1,00	0,00	0,01	0,07	0,14	0,30
nutzbare Fahrstreifenbreite Mischverkehr und Piktogramme	B _{FS, KLS (MV, Pkto)}	m	1: < 3,00 m	12	3%	3,29	2%	0,71	0,78	0,86	0,98	1,00	0,00	0,00	0,05	0,10	0,18
			2: 3,00 bis 3,50 m	229	56%	98,32	53%	0,06	0,55	0,76	0,95	1,00	0,00	0,01	0,09	0,17	0,75
			3: > 3,50 m	92	23%	49,22	26%	0,13	0,65	0,81	0,95	1,00	0,00	0,01	0,08	0,13	0,49
nutzbare Fahrstreifenbreite Schutzstreifen	B _{FS, KLS (SSF)}		1: 2,25 bis 2,75	27	7%	14,30	8%	0,51	0,61	0,81	0,95	1,00	0,00	0,02	0,09	0,20	0,27
			2: > 2,75 m	47	12%	21,85	12%	0,67	0,83	0,90	0,97	0,99	0,00	0,01	0,06	0,09	0,30
Breite Schutzstreifen	B _{SSF, KLS}	m	1: < 1,50 m	20	5%	8,08	4%	0,55	0,62	0,80	0,97	1,00	0,00	0,02	0,11	0,21	0,30
			2: 1,50 m	20	5%	13,07	7%	0,51	0,80	0,86	0,97	0,99	0,00	0,01	0,07	0,10	0,27
			3: > 1,50 m	33	8%	15,00	8%	0,77	0,85	0,91	0,96	0,97	0,00	0,01	0,05	0,07	0,16
Breite Sicherheitsraum ruhender Verkehr Schutzstreifen	B _{RVFSich, KLS (SSF)}	m	1: < 0,5 m	17	4%	7,41	4%	0,55	0,75	0,86	0,95	0,99	0,00	0,02	0,08	0,14	0,27
			2: 0,5 m	24	6%	12,20	7%	0,67	0,85	0,90	0,97	0,98	0,00	0,02	0,05	0,07	0,27
			3: > 0,5 m	8	2%	3,36	2%	0,77	0,88	0,92	0,97	0,97	0,00	0,01	0,04	0,08	0,16
Breite Sicherheitsraum ruhender Verkehr Piktogramme	B _{RVFSich, KLS (Pkto)}	m	1: < 0,5 m	1	0%	0,56	0%	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
			2: 0,5 m	6	1%	2,79	1%	0,86	0,86	0,91	0,96	0,96	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05
			3: > 0,5 m	4	1%	1,01	1%	0,79	0,82	0,89	0,96	0,99	0,00	0,00	0,05	0,10	0,14
Ruhender Verkehr	rV	-	0: kein rV	109	27%	46,82	25%	0,08	0,49	0,74	0,95	1,00	0,00	0,00	0,11	0,21	0,75
			1: rV	298	73%	140,16	75%	0,06	0,68	0,82	0,95	1,00	0,00	0,01	0,08	0,14	0,52
Art der Anordnung des ruhenden Verkehrs	rV-Art	-	0: kein rV	109	27%	46,82	25%	0,08	0,49	0,74	0,95	1,00	0,00	0,00	0,11	0,21	0,75
			1: Längs	264	65%	123,12	66%	0,06	0,67	0,82	0,96	1,00	0,00	0,01	0,08	0,14	0,52
			2: Schräg	8	2%	3,92	2%	0,72	0,74	0,81	0,87	0,88	0,02	0,05	0,11	0,16	0,22
			3: Senkrecht	12	3%	5,59	3%	0,59	0,67	0,84	0,95	0,97	0,00	0,00	0,06	0,14	0,27
			4: Längs/Schräg	10	2%	4,85	3%	0,49	0,83	0,86	0,95	0,97	0,01	0,02	0,04	0,06	0,06
5: Längs/Senkrecht	4	1%	2,67	1%	0,18	0,41	0,61	0,79	0,85	0,07	0,07	0,10	0,13	0,13			
Lage des ruhenden Verkehrs	Lage _{rV}	-	0: kein	109	27%	46,82	25%	0,08	0,49	0,74	0,95	1,00	0,00	0,00	0,11	0,21	0,75
			1: Fahrbahn	95	23%	45,07	24%	0,49	0,74	0,84	0,95	1,00	0,00	0,01	0,08	0,15	0,49

Merkmal	Codierung	Einheit	Ausprägung	Anzahl	Anteil Anzahl	Länge [km]	Anteil Länge	Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn (A _{Fb})					Anteil linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg (A _{Gw,li})				
								Min	Q 15	Mittel	Q 85	Max	Min	Q 15	Mittel	Q 85	Max
			2: Fahrbahn markiert	46	11%	21,36	11%	0,06	0,78	0,86	0,98	1,00	0,00	0,00	0,06	0,09	0,31
			3: Fahrbahn baulich	72	18%	28,13	15%	0,11	0,62	0,76	0,95	0,99	0,00	0,01	0,10	0,20	0,52
			4: Seitenraum	67	16%	34,66	19%	0,18	0,67	0,81	0,93	1,00	0,00	0,00	0,07	0,12	0,27
			5: Fahrbahn/Seitenraum	18	4%	10,94	6%	0,72	0,74	0,86	0,96	1,00	0,00	0,03	0,07	0,12	0,23
zulässige Geschwindigkeit	V _{zul}	km/h	0: 50 km/h	315	77%	147,03	79%	0,06	0,59	0,78	0,95	1,00	0,00	0,01	0,09	0,18	0,75
			1: 40 km/h	8	2%	2,73	1%	0,80	0,84	0,91	0,96	0,96	0,04	0,04	0,05	0,06	0,11
			2: 30 km/h, 22-6 Uhr	14	3%	7,97	4%	0,75	0,83	0,88	0,95	0,97	0,00	0,01	0,06	0,10	0,19
			3: 30 km/h, 6-18 Uhr	4	1%	1,24	1%	0,85	0,88	0,92	0,95	0,97	0,01	0,02	0,05	0,07	0,08
			4: 30 km/h	66	16%	28,01	15%	0,42	0,78	0,86	0,97	1,00	0,00	0,00	0,07	0,12	0,52
Mitteltrennung	MT	-	0: keine	149	37%	66,94	36%	0,13	0,72	0,84	0,96	1,00	0,00	0,00	0,07	0,14	0,49
			1: markiert	196	48%	92,47	49%	0,06	0,63	0,79	0,96	1,00	0,00	0,01	0,09	0,18	0,52
			2: baulich	62	15%	27,56	15%	0,08	0,33	0,72	0,93	1,00	0,00	0,03	0,12	0,22	0,75
Gleise im Mischverkehr	Gleise	-	0: nein	361	89%	167,32	89%	0,06	0,63	0,80	0,96	1,00	0,00	0,00	0,08	0,15	0,75
			1: ja	46	11%	19,66	11%	0,48	0,71	0,81	0,92	1,00	0,00	0,03	0,09	0,13	0,31
Gruppierung SrV Untersuchungsstadt (vgl. Kapitel 5.2.2 und Anlage 5)	ZST_SrV	-	1 Oberzentr., ≥ 500.000 EW, flach	276	68%	123,14	66%	0,11	0,65	0,81	0,96	1,00	0,00	0,01	0,08	0,15	0,52
			2 Oberzentr., < 500.000 EW, flach	48	12%	28,19	15%	0,42	0,66	0,80	0,94	0,99	0,00	0,02	0,08	0,16	0,25
			3 Oberzentr., < 500.000 EW, hügelig	47	12%	22,08	12%	0,18	0,64	0,81	0,97	1,00	0,00	0,00	0,07	0,15	0,30
			4 Mittelzentren, flach	2	0%	0,44	0%	0,35	0,41	0,56	0,71	0,77	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09
			5 Mittelzentren, hügelig	34	8%	13,14	7%	0,06	0,13	0,64	0,92	1,00	0,00	0,00	0,13	0,21	0,75
Gesamt				407	100%	186,98	100%	0,06	0,63	0,80	0,95	1,00	0,00	0,01	0,08	0,15	0,75

7.2 Innere Abhängigkeiten

Tab. 7-3 zeigt die Korrelationsmatrix der unabhängigen Variablen. Gekennzeichnet sind jeweils starke (rosa) und mittlere (gelb) Zusammenhänge, wobei die Einordnung der Intensität des Zusammenhanges nach Cohen (1992, S. 157) erfolgt (vgl. Kapitel 6.1). Insbesondere Merkmale die stark miteinander korrelieren können nicht gemeinsam in einem Modell berücksichtigt werden. Es zeigt sich das vor allem Merkmale stark miteinander korrelieren, die den selben Sachverhalt in unterschiedlichen Ausprägungen abbilden, wie die

- Verkehrsstärke ($q_{Rf, Ges}$ ggü. $q_{Rf, Fb}$, $q_{Rf, Gw}$; q_{Kfz} ggü. q_{SV} ; SV_{Anteil} ggü. q_{SV}),
- metrischen Fahrstreifenbreiten mit den entsprechenden klassierten Variablen (B_{FS} ggü. $B_{FS, KLS (MV, Pkto)}$ und $B_{FS, KLS (SSF)}$),
- metrischen Schutzstreifenbreiten mit den entsprechenden klassierten Variablen (B_{SSF} ggü. $B_{FS, KLS (SSF)}$)
- Radverkehrsführungsform mit der Breite der Schutzstreifen und der Breite der markierten Sicherheitsräume zum ruhenden Verkehr (und RVF ggü. B_{SSF} und $B_{RVFSich}$), was darauf zurückzuführen ist, dass beim Mischverkehr ohne Piktogramme oder Schutzstreifen die genannten Variablen den Wert Null annehmen,
- Merkmale zum ruhenden Verkehr (rV ggü. $Lage_{rV}$, rV -Art und AL_{rV}), was darauf zurückzuführen ist, dass „kein ruhender Verkehr“ innerhalb der genannten Variablen durch den Wert Null repräsentiert wird sowie
- Merkmale zur Umfeldnutzung (UF ggü. AL_G).

Bei den genannten Variablen scheint die gemeinsame Berücksichtigung innerhalb eines Modells auch vor kausalem Hintergrund nicht sinnvoll. Weiterhin zeigen sich starke Korrelationen zwischen Merkmalen der beiden Straßenseiten. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Mehrzahl der Querschnitte eine gewisse Symmetrie hinsichtlich

- der Verkehrsstärke des Radverkehrs auf dem Gehweg ($q_{Rf, Gw}$ ggü. $q_{Rf, Gw, gegenüber}$),
- der Verkehrsstärke des Fußverkehrs ($q_{Fg, Gw}$ ggü. $q_{Fg, Gw, gegenüber}$),
- des Anteils Länge des ruhenden Verkehrs (AL_{rV} ggü. $AL_{rV, gegenüber}$) sowie
- der Umfeldnutzung (AL_G ggü. $AL_G, gegenüber$ und UF ggü. $UF_{gegenüber}$)

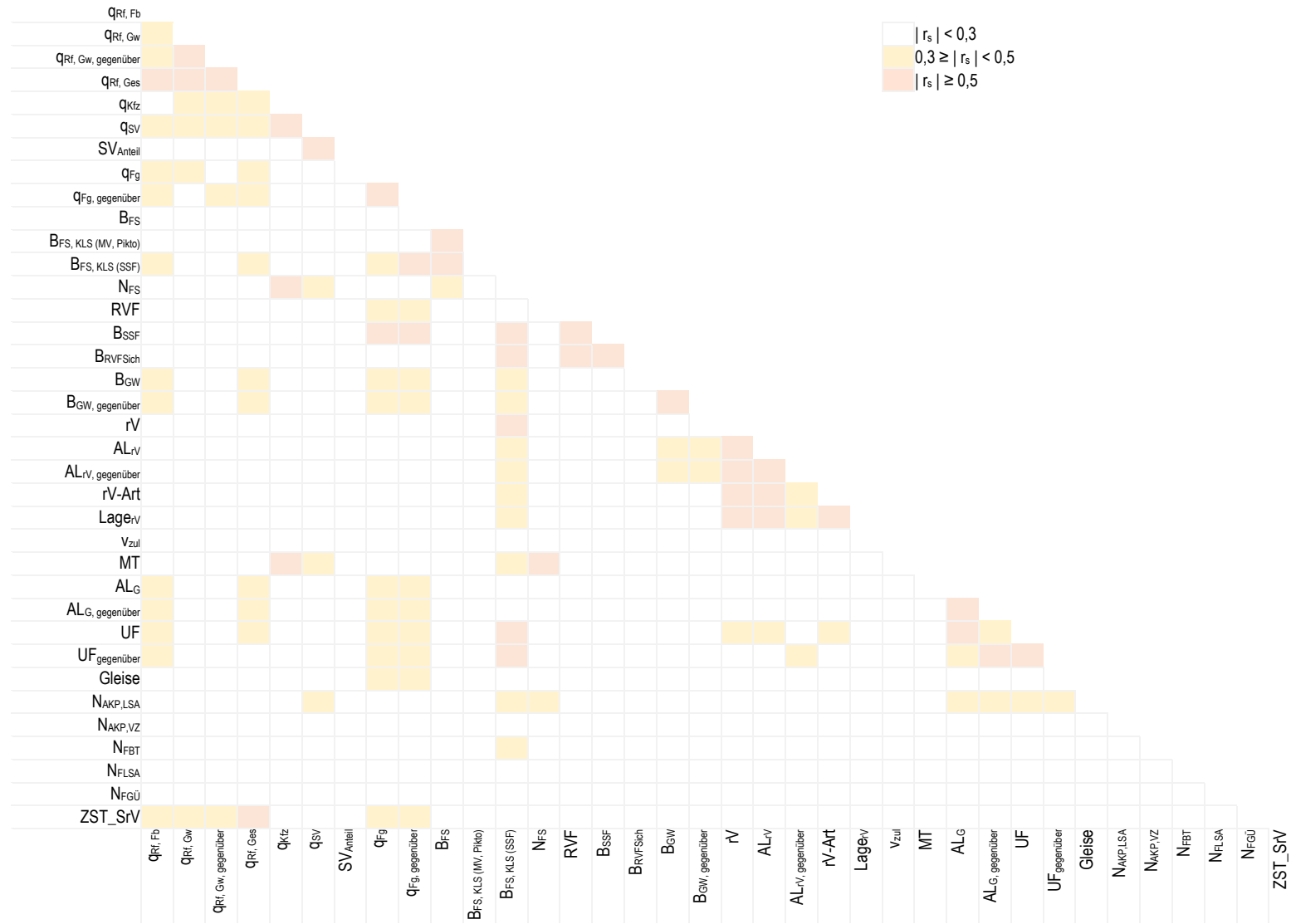
aufweisen. Weitere starke aber auch plausible Korrelationen ergeben sich hinsichtlich der Anzahl der Fahrstreifen (N_{FS}), der Kfz-Verkehrsstärke (q_{Kfz}) sowie dem Merkmal Mitteltrennung (MT). Dass mit zunehmender Fahrstreifenanzahl die Kfz-Verkehrsstärke steigt, ist trivial – die Zusammenhänge zum Merkmal Mitteltrennung sind darauf zurückzuführen, dass eine bauliche Mitteltrennung häufiger auf vierstreifigen als auf zweistreifigen Abschnitten vorhanden ist. Ein weiterer starker positiver Zusammenhang besteht zwischen der Schutzstreifenbreite (B_{SSF}), der Breite der markierten Sicherheitsräume zum ruhenden Verkehr ($B_{RVFSich}$) und der klassierten nutzbaren Fahrstreifenbreite ($B_{FS, KLS (SSF)}$) – das heißt je breiter der gesamte Querschnitt, desto breiter auch die Einzelelemente. Zudem zeigt sich zwischen der Gruppierung nach Zentralität, Einwohnendenzahl und Topografie (ZST_SrV) und der Radverkehrsstärke ($q_{Rf, ges}$) ein starker Zusammenhang, wobei zu schlussfolgern ist, dass mit zunehmender Zentralität, Einwohnendenzahl und flacher Topografie die Radverkehrsstärke steigt.

Weniger gut bzw. lediglich auf Vermutungen gestützt erklärbar, sind die starken Korrelationen zwischen

- der Schutzstreifenbreite (B_{SSF}) und der Fußverkehrsstärke ($q_{Fg, Gw}$),
- ruhendem Verkehr (rV) und der klassierten nutzbaren Fahrstreifenbreite ($B_{FS, KLS (SSF)}$), weil der Zusammenhang positiv ist (d.h. ist ruhender Verkehr vorhanden, steigt auch die nutzbare Fahrstreifenbreite) sowie
- Umfeldnutzung (UF) und der klassierten nutzbaren Fahrstreifenbreite ($B_{FS, KLS (SSF)}$).

Hinsichtlich der Variablen, zwischen denen Zusammenhänge mittlerer Stärke bestehen, werden zunächst keine Einschränkungen getroffen. Bei der schrittweisen Aufnahme der Variablen in die Modelle wird aber der Einfluss auf bereits geschätzte Koeffizienten geprüft.

Tab. 7-3 Korrelationsmatrix (Spearman's Rho) der unabhängigen Variablen – Akzeptanzmodelle



7.3 Modelle Anteil Fahrbahnnutzung

7.3.1 Gesamtmodell Anteil Fahrbahnnutzung

Lineare Regression

Tab. 7-4 zeigt das Ergebnis der linearen Modellierung zur Beschreibung der Einflüsse auf den Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn. Grundsätzlich zeigt sich, dass 33 % der Gesamtstreuung durch das Modell erklärt werden kann (korrigiertes $R^2 = 0,33$). Im Einzelnen zeigt sich, dass der Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn zunimmt, wenn

- die Gesamtverkehrsstärke der Radfahrenden zunimmt, was analog zum Safety-in-Numbers-Effekt (siehe Kapitel 4.1.4) auf einen Acceptance-in-Numbers-Effekt hinweisen könnte; das heißt, je mehr Menschen Rad fahren, desto höher ist die Akzeptanz des Radverkehrs im Mischverkehr. Bei einer Verkehrsstärke von 200 Rf/h im Vergleich zu 100 Rf/h erhöht sich der Anteil der Fahrbahnnutzung um etwa 12 %.
- die Verkehrsstärke der Kfz (auf dem rechten Fahrstreifen, sofern 2 Fahrstreifen je Richtung vorhanden sind) abnimmt. Bei einer Verkehrsstärke von 500 Kfz/h im Vergleich zu 400 Kfz/h verringert sich der Anteil der Fahrbahnnutzung um etwa 4%.
- die Anzahl an Fahrstreifen abnimmt (sind 2 statt 1 Fahrstreifen je Richtung vorhanden im Mittel um etwa 15 %).
- Piktogramme oder Schutzstreifen vorhanden sind, was die bisherigen Erkenntnisse zur Akzeptanz von unterschiedlichen Radverkehrsführungsformen im Mischverkehr bestätigt (siehe Kapitel 4.2.3). Das Vorhandensein von Piktogrammen oder Schutzstreifen erhöht die Akzeptanz im Mittel um etwa 6 % bzw. 9 %. Auch wenn das Ergebnis signifikant ist, sollte bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass der Modellierung 13 Straßenseiten mit Piktogrammen gegenüber 73 mit Schutzstreifen und 321 mit reinem Mischverkehr zugrunde liegen.
- die zulässige Geschwindigkeit < 50 km/h ist (im Mittel um etwa 6 %).
- die Dichte lichtsignalgeregelter Anschlussknotenpunkte zunimmt (sind 2 im Vergleich zu 1 AKP/km vorhanden, um etwa 2 %), was darauf zurückzuführen sein könnte, dass mehr gesicherte Einbiegemöglichkeiten vorhanden sind, was bspw. das regelkonforme Linksabbiegen (ggü. dem Befahren linker Gehwege) erleichtern kann.

Die standardisierten Beta-Werte zeigen, dass die Radverkehrsführungsform und die Verkehrsstärken (Rf und Kfz) den höchsten Erklärungsgehalt aufweisen. Etwas geringer ist der Erklärungsgehalt der Anzahl der Fahrstreifen. Die geringsten Beta-Werte weisen die zulässige Geschwindigkeit und die Anzahl der lichtsignalgeregelten Anschlussknotenpunkte auf.

Wie bereits erwähnt zeigt das korrigierte R^2 , dass mit dem Modell etwa 33 % der Gesamtstreuung erklärt werden. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die Gegenüberstellung zwischen den (mit dem Modell) berechneten und empirischen Anteilen der Fahrbahnnutzung (siehe Bild 7-1), zeigt sich, dass die Anteile insbesondere auf Abschnitten mit geringer Akzeptanz deutlich überschätzt und mit einer sehr hohen Akzeptanz eher unterschätzt werden. Im Bereich eines empirischen Anteils der Fahrbahnnutzung zwischen 0,6 und 0,9 streuen die modellhaft berechneten Werte gleichmäßiger. Die mittlere Abweichung je Untersuchungsabschnitt zwischen berechneten und empirischen Anteil der Fahrbahnnutzung (RMSE: Quadratwurzel des durchschnittlichen Prognosefehlers) beträgt 0,15. Weiterhin zeigt sich aber auch ein erster Nachteil der linearen Regression: Durch die Voraussetzung der Linearität ermittelt das Modell auch Anteile der Fahrbahnnutzung > 1 .

Tab. 7-4 Lineares Regressionsmodell Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Richtung i

Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn [-]		Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β	Standard- fehler	Beta- Wert	T	p
β_0	Konstante	-	0,837	0,0192		43,542	****
$q_{Rt, Ges}$	Verkehrsstärke Radfahrende Gesamt in Richtung i	Rf/h	0,0001	0,0002	0,365	7,491	****
$q_{Kfz, FS1}$	Verkehrsstärke Kfz rechter Fahrstreifen in Richtung i	Kfz/h	-0,0004	0,0001	-0,325	-7,047	****
N_{FS}	Anzahl Fahrstreifen in Richtung i	1	Ref.		Ref.		
		2	-0,151	0,033	-0,307	-4,625	****
RVF	Radverkehrsführungsform	Mischverkehr	Ref.		Ref.		
		Piktogramme	0,062	0,026	0,253	2,348	***
		Schutzstreifen	0,092	0,017	0,367	5,358	****
V_{zul}	zulässige Geschwindigkeit	50 km/h	Ref.		Ref.		
		< 50 km/h	0,064	0,016	0,142	4,030	****
$N_{AKP, LSA}$	Anzahl Anschlussknotenpunkte Lichtsignalanlage	AKP/km	0,022	0,005	0,169	4,127	****

korr. $R^2 = 0,33$
 n = 407
 F-Wert = 34,693
 Durbin-Watson = 1,064

* $p < ,05$ ** $p < ,01$ *** $p < ,001$ **** $p < ,0001$

Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn (AFb) berechnet und empirisch
(lineares Modell)

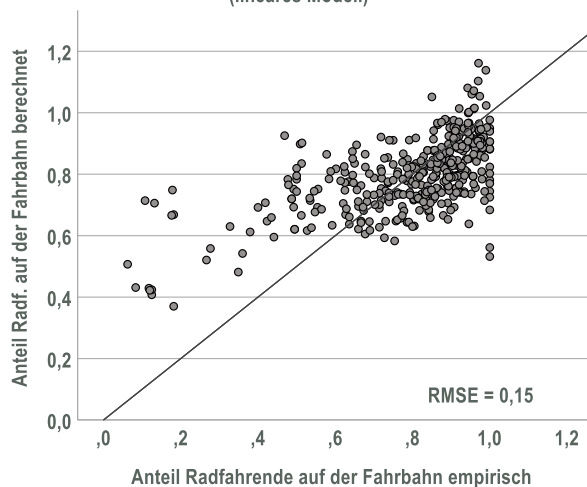


Bild 7-1 Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn berechnet (lineares Modell) und empirisch

Die Analyse der Residuen erfolgt auf Basis des Durbin-Watson-Kennwerts (Überprüfung auf Autokorrelation; siehe Tab. 7-4), des QQ- und Tukey-Anscombe-Plots (Verteilung der Residuen; siehe Bild 7-2) sowie der Analyse einflussreicher Fälle (Cook-Distanz und Hebelwert).

Der Durbin-Watson-Kennwert weist mit einem Wert von 1,06 auf eine leichte Autokorrelation hin. Das heißt, die Beobachtungen einer Variable korrelieren zum Teil mit sich selbst zu einem früheren Zeitpunkt. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass die beiden Straßenseiten eines Abschnittes hinsichtlich der Akzeptanz ähnliche Werte aufweisen. Nach Backhaus et al. (2018, S. 96) könnte dies zu Ungenauigkeit bei der Ermittlung des Standardfehlers und der Regressionskoeffizienten führen.

Betrachtet man in diesem Zusammenhang den QQ-Plot der Residuen (siehe Bild 7-2, links) zeigt sich keine gute Übereinstimmung der Punkte mit der Geraden, was ein Hinweis darauf ist, dass keine Normalverteilung vorliegt. Der Verlauf des QQ-Plots weist eher auf eine sog. „light-tailed“-Verteilung hin.

Der Tukey-Anscombe-Plot zeigt eine stark trichterförmige Verteilung der Residuen mit abnehmenden (berechneten) Anteil der Fahrbahnnutzung. Das heißt, je geringer die berechneten Anteile der Fahrbahnnutzung sind, desto größer sind auch die Residuen. Es ist keine gleichmäßige Verteilung der Residuen um die Bezugsachse festzustellen.

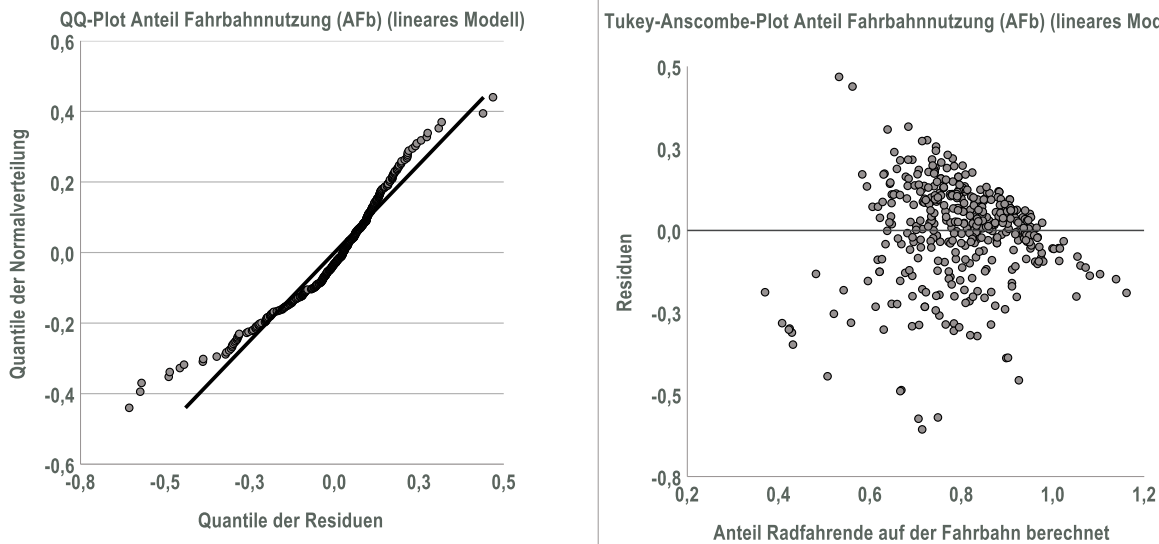


Bild 7-2 QQ-Plot (links) und Tukey-Anscombe-Plot (rechts) der linearen Regression zum Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn

Die Analyse der einflussreichen Fälle ergibt insgesamt 30 Abschnitte mit auffälligen Cook-Distanzen (starker Einfluss auf die Ermittlung der Regressionskoeffizienten) und 8 Abschnitten mit auffälligen Hebelwerten (starker Einfluss auf den Erwartungswert). Dabei ergibt sich hinsichtlich der Cook-Distanz folgende Systematik:

- 17 Straßenseiten (16 mit Mischverkehr; 1 mit Schutzstreifen) mit sehr geringen Anteilen der Fahrbahnnutzung (< 50 %) bei teilweise geringer Anzahl an erfassten Rf (< 30 Rf/h) (10 davon mit 2 Fahrstreifen je Richtung)
- 3 einstreifige Straßenseiten mit Schutzstreifen und sehr geringen Anteilen der Fahrbahnnutzung (≤ 51 %) (ein Abschnitt mit starker Längsneigung, zwei mit dem Charakter einer Außerortsstraße)
- 9 Straßenseiten mit sehr hohen Anteilen der Fahrbahnnutzung (> 90 %) (davon 5 zweistreifige Seiten: 3 mit Schutzstreifen und 2 mit Mischverkehr sowie 4 einstreifige Seiten: 1 mit Schutzstreifen und 3 mit Mischverkehr)

Hinsichtlich der 8 Abschnitte mit auffälligen Hebelwerten zeigt sich, dass 4 der 8 Abschnitte mehr als einen Fahrstreifen je Richtung, aber dennoch überdurchschnittlich hohe Anteile der Fahrbahnnutzung (> 80 %) aufweisen. 2 weitere Abschnitte mit zwei Fahrstreifen je Richtung weisen hingegen unterdurchschnittliche Anteile der Fahrbahnnutzung auf (< 70 %). 2 weitere einstreifige Straßenseiten, mit einer sehr hohen Gesamtzahl an erfassten Radfahrenden, weisen sehr hohe Anteile der Fahrbahnnutzung auf (> 95 %).

Logistische Regression

Das logistische Modell wurde auf Basis gruppierter Daten erstellt, wobei jede Straßenseite eine Gruppe repräsentiert. Als abhängige Variable wurde demzufolge die Anzahl der Radfahrenden auf der Fahrbahn (Ereignisse) allen Radfahrenden in der entsprechenden Richtung (Versuche) gegenübergestellt. Um Abschnitte mit wenig erfassten Radfahrenden (= geringe Zahl an Versuchen) nicht unterzubewerten bzw. Abschnitte mit vielen erfassten Radfahrenden (=hohe Zahl an Versuchen) nicht überzubewerten, wurde die Anzahl der Versuche für alle Straßenseiten auf 100 Radfahrende normiert. Die Anzahl der Ereignisse (Radfahrende auf der Fahrbahn) wurden wiederum entsprechend der Anzahl der Versuche (100 Radfahrende) normiert.

Tab. 7-5 zeigt die Ergebnisse des logistischen Regressionsmodells, zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit, dass Radfahrende vor dem Hintergrund der berücksichtigten Merkmale auf der Fahrbahn fahren. Innerhalb der logistischen Modellierung wurden dieselben Einflussgrößen und entsprechende Wirkrichtungen (Interpretation der Devianz und der Signifikanzen; vgl. Kapitel 6.2.3) ermittelt, wie im Rahmen der linearen Regression. Das logistische Regressionsmodell zeigt mit einem McF-R² von 0,33 eine gute Modellanpassung (vgl. Backhaus et al. 2018, S. 299). Auch der Vergleich der Devianz/df des Nullmodells mit dem Modell zeigt, dass ein relevanter Teil der Abweichungen durch die berücksichtigten Merkmale erklärt werden.

Tab. 7-5 Logistisches Regressionsmodell Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Richtung i

Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn [-]							
	Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1		Standard- fehler	OR	p ¹
β_0	Konstante	-	1,616	****	0,130	5,032	****
q _{Rt, Ges}	Verkehrsstärke Radfahrende Gesamt in Richtung i	Rf/h	0,012	****	0,002	1,012	****
q _{Kfz, FS1}	Verkehrsstärke Kfz rechter Fahrstreifen in Richtung i	Kfz/h	-0,002	****	0,000	0,998	****
NFS	Anzahl Fahrstreifen in Richtung i	1	Ref.			Ref.	****
		2	-0,901	****	0,166	0,406	
RVF	Radverkehrsführungsform	Mischverkehr	Ref.			Ref.	****
		Piktogramme	0,486	*	0,246	1,626	
		Schutzstreifen	0,611	****	0,140	1,842	
V _{zul}	zulässige Geschwindigkeit	50 km/h	Ref.			Ref.	***
		< 50 km/h	0,464	***	0,132	1,590	
NAKP_LSA	Anzahl Anschlussknotenpunkte Lichtsignalanlage	AKP/km	0,118	**	0,040	1,126	**

n_{Stellen} = 407

n_{Ereignisse} = 32.460

n_{Versuche} = 40.700

Devianz / df Nullmodell = 20,96

Devianz / df Modell = 12,94

McF-R² = 0,33

AIC = 6.831,43

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

Im Einzelnen zeigt sich, dass sich die Chance Radfahrende*r fährt auf der Fahrbahn zu Radfahrende*r fährt auf dem Gehweg (Interpretation der Odds Ratios (OR)) mit

- zunehmender Gesamtverkehrsstärke der Radfahrenden erhöht (Beispiel: bei einer Verkehrsstärke von 200 Rf/h im Vergleich zu 100 Rf/h erhöht sich die Chance, dass Radfahrende auf der Fahrbahn fahren um den Faktor 3,2). Wie im Rahmen der linearen Regression bereits festgestellt wurde, zeigt sich, dass sich der Anteil der Fahrbahnnutzung erhöht, je mehr Menschen insgesamt Rad fahren (Acceptance-in-Numbers).
- zunehmender Verkehrsstärke der Kfz (auf dem rechten Fahrstreifen, sofern 2 Fahrstreifen je Richtung vorhanden sind) verringert (Beispiel: bei einer Verkehrsstärke von 500 Kfz/h im Vergleich zu 400 Kfz/h verringert sich die Chance, dass Radfahrende auf der Fahrbahn fahren um den Faktor 0,8).
- zunehmender Anzahl an Fahrstreifen (sind 2 statt 1 Fahrstreifen je Richtung vorhanden) um den Faktor 0,4 verringert.
- dem Vorhandensein von Piktogrammen oder Schutzstreifen gegenüber dem reinen Mischverkehr etwa um den Faktor 1,6 bzw. 1,8 erhöht.
- einer zulässigen Geschwindigkeit < 50 km/h um den Faktor 1,6 erhöht.
- zunehmender Dichte lichtsignalgeregelter Anschlussknotenpunkte erhöht (Beispiel: sind 2 im Vergleich zu 1 AKP/km vorhanden erhöht sich die Chance um den Faktor 1,1).

Zur Beantwortung der Frage des Erklärungsgehaltes der unabhängigen Variablen zeigt Bild 7-3 die Anteile der Reduzierung der Devianz / df je unabhängiger Variable. Ähnlich dem linearen Modell reduzieren die Verkehrsstärken (Rf und Kfz) die Devianz am deutlichsten. Im Unterschied zum linearen Modell erreicht auch die Anzahl der lichtsignalgeregelten Anschlussknotenpunkte eine ähnlich starke Reduzierung der Devianz. Geringer ist der Erklärungsgehalt der Anzahl der Fahrstreifen sowie der Radverkehrsführungsform. Die geringste Reduzierung der Devianz wird durch die zulässige Geschwindigkeit erreicht.

Anteil Erklärung Devianz / df (ohne nicht erklärten Anteil)

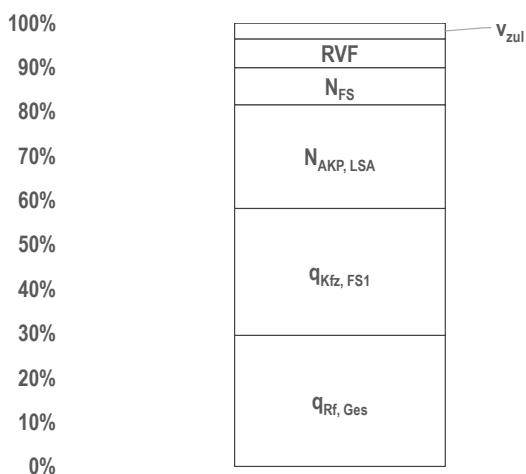


Bild 7-3 Anteilige Reduzierung der Devianz durch die unabhängigen Variablen

Bild 7-4 (links) zeigt die Gegenüberstellung der mit dem logistischen Modell berechneten Anteile der Fahrbahnnutzung durch Radfahrende und dem empirischen Anteil. Dabei zeigt sich ähnlich zum linearen Modell, dass die Anteile auf Abschnitten mit geringer Akzeptanz überschätzt werden. Ab einem Anteil der Fahrbahnnutzung von 0,6 streuen die modellhaft berechneten Werte gleichmäßig um die Gerade. Eine Unterschätzung von Abschnitten mit einer sehr hohen Akzeptanz, wie sie im Bereich der linearen Regression festzustellen ist, zeigt sich hier nicht. Insgesamt liegen die Werte beim logistischen Modell im Vergleich zum linearen Modell geringfügig näher an der Gerade (RMSE (logistisches Modell) = 0,14; RMSE (lineares Modell) = 0,15). Im Gegensatz zum linearen Modell erlaubt die logistische Regression in ihrer Grundform (P (Radfahrende*r fährt auf der Fahrbahn) / P

(Radfahrende*r fährt auf dem Gehweg) keine Anteile der Fahrbahnnutzung > 1 , was der Grundannahme des Untersuchungsgegenstandes besser entspricht.

Der Tukey-Anscombe-Plot (siehe Bild 7-4, rechts) zeigt ähnlich zum linearen Modell eine trichterförmige Verteilung der Residuen mit abnehmenden (berechneten) Anteil der Fahrbahnnutzung, wengleich nicht so stark. Das heißt je geringer die berechneten Anteile der Fahrbahnnutzung desto größer sind auch die Abweichungen. Im Vergleich zum linearen Modell ist eine gleichmäßigere Verteilung der Residuen um die Bezugsachse festzustellen.

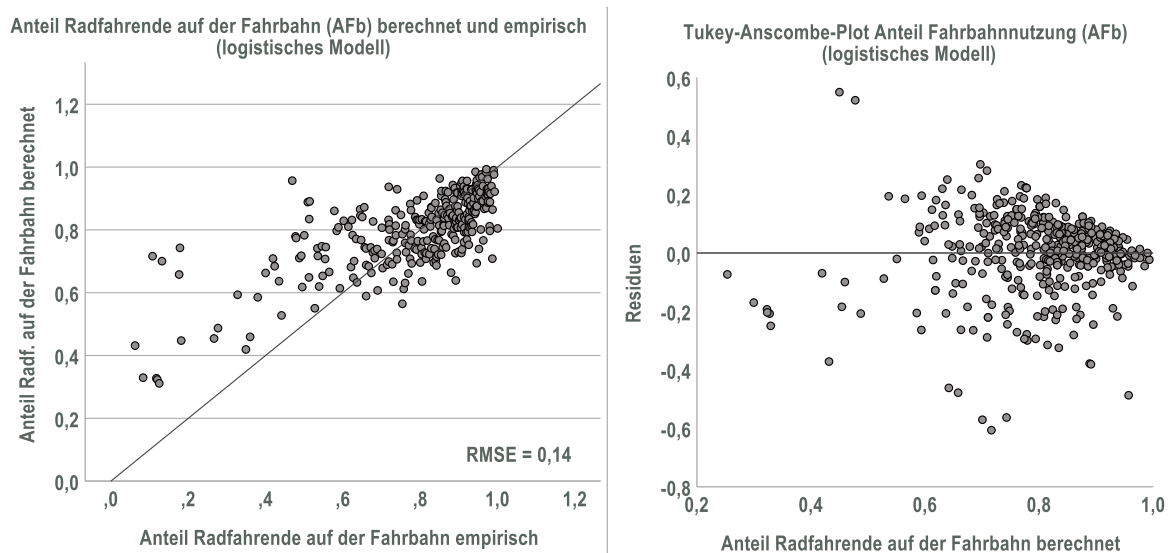


Bild 7-4 Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn berechnet (logistisches Modell) und empirisch (links) und Tukey-Anscombe-Plot der logistischen Regression zum Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn (rechts)

Die Betrachtung der einflussreichen Fälle ergibt 28 auffällige Cook-Distanzen (20 davon auch im linearen Modell) sowie 17 auffällige Hebelwerte (7 davon auch im linearen Modell). Hinsichtlich der Cook-Distanzen ergeben sich im Vergleich zum linearen Modell ähnliche Systematiken:

- 15 (6 mit Schutzstreifen, 1 mit Piktogrammen, 5 mit 2 Fahrstreifen je Richtung und Mischverkehr) der 28 Straßenseiten weisen sehr niedrige Anteile der Fahrbahnnutzung ($< 60\%$) bei teilweise geringen Zahlen (< 30 Rf/h) an erfassten Radfahrenden auf.
- 9 (6 mit 2 Fahrstreifen je Richtung, 3 davon mit Schutzstreifen) der 28 Straßenseiten weisen sehr hohe Anteile der Fahrbahnnutzung ($\geq 88\%$) bei teilweise geringen Zahlen (< 40 Rf/h) an erfassten Radfahrenden auf.

10 der insgesamt 17 Straßenseiten mit auffälligen Hebelwerten sind Abschnitte mit Piktogramme. Darüber hinaus zeigt sich, dass vor allem Straßenseiten mit überdurchschnittlich hohen Anteilen der Fahrbahnnutzung ($\geq 85\%$) bei teilweise geringen Zahlen an erfassten Radfahrenden (< 40 Rf/h) auffällig sind (6 von 7 Straßenseiten weisen 2 Fahrstreifen je Richtung auf).

Vergleich der Modelle

Wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits festgestellt wurde, zeigt die Gegenüberstellung der berechneten und empirischen Anteile, dass die Punkte beim logistischen Modell näher an der Gerade sind – das betrifft vor allem Abschnitte mit einem hohen Anteil der Fahrbahnnutzung (vgl. Bild 7-1 für das lineare und Bild 7-4 (links) für das logistische Modell). Zudem erlaubt die logistische Regression im Vergleich zur linearen in ihrer Grundform keine Anteile der Fahrbahnnutzung > 1 .

Die Tukey-Anscombe-Plots zeigen bei beiden Modellen eine trichterförmige Verteilung der Residuen mit abnehmenden (berechneten) Anteil der Fahrbahnnutzung, wengleich diese beim logistischen Modell geringfügig schwächer ausgeprägt ist (vgl. Bild 7-2 für das lineare und Bild 7-4 (rechts) für das logistische Modell). Das könnte ggf. darauf zurückgeführt werden, dass in beiden Modellen Variablen nicht berücksichtigt wurden, die den Anteil

der Fahrbahnnutzung ggf. beeinflussen. Das betrifft vor allem personenspezifische Merkmale (vgl. Kapitel 4.3.1), die innerhalb vorliegender Arbeit nicht erhoben wurden.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass grundsätzlich beide Modellformen ähnliche Ergebnisse erzielen und sich hinsichtlich einer grundsätzlichen Eignung zur Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes stützen und bestätigen. Das betrifft sowohl die Wirkung der einzelnen Variablen als auch die Anpassungsgüte. Betrachtet man allerdings die Grundform der Modelle, zeigt sich, dass die logistische Regression keine Anteile der Fahrbahnnutzung < 0 und > 1 erlaubt, während die lineare Regression in diesen Wertebereichen nicht begrenzt ist – der Anteil der Fahrbahnnutzung beträgt aber minimal 0 und maximal 1. Auch wenn die Interpretation der Regressionskoeffizienten des logistischen Modells im Vergleich zum linearen Modell weniger intuitiv ist (während im linearen Modell eine Änderung der unabhängigen Variablen um eine Einheit auch eine Änderung der abhängigen Variable um den Regressionskoeffizient β , bewirkt, ist der Einfluss der Änderung der unabhängigen Variable bei der logistischen Regression auch von der abhängigen Variable abhängig), wird aus o.g. Grund für die Beantwortung der nachfolgenden Fragestellungen

- zum Einfluss der Fahrbahnbreite auf Untersuchungsabschnitte mit Mischverkehr ohne Schutzstreifen (siehe Kapitel 7.3.2),
- zum Einfluss der Fahrbahn- und Schutzstreifenbreite auf Untersuchungsabschnitten mit Schutzstreifen (siehe Kapitel 7.3.3) sowie
- zur Modellanwendung hinsichtlich des Einflusses der Verkehrsstärke auf die Akzeptanz (siehe Kapitel 7.5)

die Anwendung des logistischen Modells als geeigneter erachtet.

7.3.2 Teilmodell Mischverkehr: Anteil Fahrbahnnutzung und Fahrstreifenbreite

Wie in Kapitel 3.1 und 3.2 gezeigt wurde, kommen sowohl im nationalen als auch internationalen Raum Empfehlungen für Fahrbahnbreiten bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr zum Einsatz, die zwischen schmalen (Überholungen von Radfahrenden durch Pkw bei Gegenverkehr nicht möglich) und breiten Profilen (Überholungen von Radfahrenden durch Pkw bei Gegenverkehr möglich) differenzieren. Hintergrund ist die Definition „kritischer“ Fahrbahnbreiten zwischen 6,00 m und 7,00 m, da diese zwar einerseits eine Möglichkeit des Überholens auch bei Gegenverkehr suggerieren können, diese Überholungen aber andererseits nicht mit Einhaltung des Sicherheitsabstandes möglich sind (vgl. Kapitel 3.1 und FGSV 2006, S. 83). Diese Definition basiert wiederum auf Erkenntnissen von Reichenbach und Affolter (2003) (siehe Kapitel 3.1 und 4.2.4). Daraus ergibt sich die Fragestellung, welchen Einfluss die Fahrbahnbreite bzw. die Anwendung „kritischer Profile“ auf den Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn hat. Zur Beantwortung der Fragestellung werden ausschließlich zweistreifige Streckenabschnitte mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Piktogramme betrachtet, was wie folgt begründet wird:

- Die Anlage von (beidseitigen) Schutzstreifen verlangt im Regelfall eine Querschnittsbreite von mindestens 7,50 m (vgl. Kapitel 3.1; FGSV 2006, S. 83; FGSV 2010a, S. 23). Das heißt bei schmalen oder kritischen Profilen ist die Anlage von (beidseitigen) Schutzstreifen nicht möglich. Hinsichtlich dieser Radverkehrsführungsform werden andere Einflussfaktoren hinsichtlich der Querschnittsgestaltung (bspw. Breite der Schutzstreifen, Breite der für den Kfz-Verkehr nutzbaren Fahrbahnbreite) vermutet (siehe Kapitel 7.3.3).
- Bei der Betrachtung mehrstreifiger Abschnitte ergeben sich zusätzliche Fragestellungen zur Auslastung der Fahrstreifen und damit einhergehend zu Möglichkeiten der Überholung mit Fahrstreifenwechsel, welche mit den zugrundeliegenden Daten nicht umfassend beantwortet werden können. Zudem bezieht sich die Definition der „kritischen“ Fahrbahnbreiten nach FGSV (2006, S. 83) und FGSV (2010a, S. 22) auf zweistreifige Abschnitte.

Das Teilmodell wird auf Basis der logistischen Regression erstellt, wobei jede Straßenseite eine Gruppe mit einer normierten Anzahl an Versuchen (100 Radfahrende) und entsprechenden Ereignissen (Radfahrende fahren auf der Fahrbahn) repräsentiert (vgl. Kapitel 7.3.1). Der Erstellung dieses Teilmodells liegen insgesamt 273 Straßenseiten zugrunde. Tab. 7-6 zeigt das logistische Teilmodell des Anteils der Radfahrenden auf der Fahrbahn auf einstreifigen Straßenseiten mit und ohne Piktogramme. Das Teilmodell zeigt mit einem McF-R² von 0,43 eine gute Anpassung an die Datengrundlage (vgl. Backhaus et al. 2018, S. 299). Auch der Vergleich der Devianz/df des Nullmodells mit dem Modell zeigt, dass ein erheblicher Teil der Abweichungen durch die berücksichtigten Merkmale erklärt wird. Im Vergleich zum Gesamtmodell der Fahrbahnnutzung (vgl. Kapitel 7.3.1, Tab. 7-5) ist eine bessere Anpassung zu verzeichnen, was darauf zurückzuführen ist, dass die Datengrundlage des Teilmodells homogener (nur einstreifige Straßenseiten mit und ohne Piktogramme) ist. Grundsätzlich zeigen sich hinsichtlich der Variablen, die bereits im Gesamtmodell berücksichtigt wurden, auch ähnliche Wirkungszusammenhänge (vgl. Kapitel 7.3, Tab. 7-5), was grundsätzlich darauf zurückzuführen ist, dass Abschnitte ohne Schutzstreifen etwa 80 % des Gesamtkollektives repräsentieren (vgl. 7.1, Tab. 7-2). So erhöht sich die Chance Radfahrende*r fährt auf der Fahrbahn zu Radfahrende*r fährt auf dem Gehweg (Interpretation der Odds Ratios (OR)) mit

- zunehmender Radverkehrsstärke in Richtung i (Beispiel: bei 200 Rf/ h im Vergleich zu 100 Rf/h um den Faktor 3).
- abnehmender Verkehrsstärke der Kfz in Richtung i (Beispiel: bei einer Verkehrsstärke von 500 Kfz/h im Vergleich zu 400 Kfz/h um den Faktor 0,8).
- Vorhandensein von Piktogrammen gegenüber dem reinen Mischverkehr um den Faktor 1,787.
- bei Vorhandensein von schmalen Profilen (< 3,00 m) ggü. kritischen Profilen (3,00 m bis 3,50 m) und breiten Profilen (> 3,50 m) etwa um den Faktor 2 (Kehrwert der OR).
- mit einer zulässigen Geschwindigkeit < 50 km/h um den Faktor 1,6.
- in Mittelzentren im Vergleich zu Oberzentren um den Faktor 0,6.

Tab. 7-6 Logistisches Regressionsmodell Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Richtung i – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit und ohne Piktogramme

Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn auf zweistreifigen Abschnitten mit Mischverkehr mit und ohne Piktogrammen [-]						
	Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	OR	p ¹
	β_0 Konstante	-	2,557 ****	0,268	12,901	****
	$q_{Rf, Ges}$ Verkehrsstärke Radfahrende Gesamt in Richtung i	Rf/h	0,011 ****	0,002	-	****
	q_{Kfz} Verkehrsstärke Kfz in Richtung i	Kfz/h	-0,003 ****	0,000	-	****
	RVF Radverkehrsführungsform	Mischverkehr	Ref.		Ref.	0,0547
		Piktogramme	0,581 *	0,287	1,787	
	$B_{FS, KLS (MV, Pkto)}$ nutzbare Fahrstreifenbreite klassiert	< 3,00 m	Ref.		Ref.	0,0869
		3,00 bis 3,50 m	-0,720 **	0,228	0,487	
		> 3,50 m	-0,714 **	0,238	0,490	
	V_{zul} zulässige Geschwindigkeit	50 km/h	Ref.		Ref.	***
		< 50 km/h	0,498 ***	0,132	1,645	
	ZST_SrV Gruppierung SrV Untersuchungsstadt	Oberzentrum	Ref.		Ref.	**
		Mittelzentrum	-0,584 ***	0,169	0,558	

n_{Stellen} = 273

n_{Ereignisse} = 21.892

n_{Versuche} = 27.300

Devianz / df Nullmodell = 17,31

Devianz / df Modell = 10,86

McF-R² = 0,43

AIC = 4.002,07

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

Auch wenn die Ergebnisse die Tendenz aufweisen, dass schmale Querschnitte sowie Abschnitte mit Piktogrammen die höchsten Anteile der Fahrbahnnutzung aufweisen, zeigt die Betrachtung der Anteile der Veränderung der Devianz / df je unabhängiger Variable, dass beide genannten Variablen kaum eine Veränderung der Devianz bewirken. Darüber hinaus zeigt sich (im Unterschied zum Gesamtmodell), dass die Kfz-Verkehrsstärke die Devianz stärker beeinflusst als die Verkehrsstärke der Radfahrenden. Die zulässige Geschwindigkeit sowie die Gruppierung der Untersuchungsstadt bewirken eine geringere Reduzierung der Devianz im Vergleich zu den Verkehrsstärken.

Die Gegenüberstellung der berechneten und empirischen Anteile der Fahrbahnnutzung (siehe Bild 7-6, links) zeigt eine im Vergleich zum Gesamtmodell bessere Anpassung ($RMSE = 0,13$), was das $McF-R^2$ ($0,43$) bereits angedeutet hat. Dennoch werden die Anteile auf Straßenseiten mit geringer Fahrbahnnutzung deutlich überschätzt und Straßenseiten mit sehr hoher Fahrbahnnutzung unterschätzt. Im Bereich eines empirischen Anteils der Fahrbahnnutzung zwischen 0,6 und 0,8 streuen die Punkte gleichmäßig um die Gerade.

Auch der Tukey-Anscombe-Plot des Teilmodells (siehe Bild 7-6, rechts) zeigt eine im Vergleich zum Gesamtmodell gleichmäßigere Verteilung der Residuen, wenngleich ein leicht trichterförmige Verteilung zu erkennen ist. Dabei ergibt sich die Tendenz, dass Residuen mit abnehmenden Anteilen der Fahrbahnnutzung zunehmen.

Die Betrachtung der einflussreichen Fälle ergibt 12 auffällige Cook-Distanzen (10 davon im Gesamtmodell) sowie 5 auffällige Hebelwerte (2 davon im Gesamtmodell). Hinsichtlich der Cook-Distanzen ergeben sich im Vergleich zum Gesamtmodell ähnliche Systematiken:

- 7 der 12 Straßenseiten weisen eine sehr niedrige Anteile der Fahrbahnnutzung ($< 50\%$) bei teilweise geringen Zahlen (< 30 Rf/h) an erfassten Radfahrenden auf.
- 3 der 12 Straßenseiten weisen eine sehr hohe Anteile der Fahrbahnnutzung ($\geq 99\%$) bei geringen Zahlen (< 30 Rf/h) an erfassten Radfahrenden auf.
- 2 der 12 Straßenseiten weisen eine leicht unterdurchschnittliche Anteile der Fahrbahnnutzung (72 bis 74 %) bei leicht unterdurchschnittlichen Kfz-Verkehrsstärken (310 bis 330 Kfz/h) auf.

Bei der Analyse der Hebelwerte weisen 4 der insgesamt 5 Straßenseiten sehr niedrige Anteile der Fahrbahnnutzung ($\leq 50\%$) auf (3 davon mit einer Radverkehrsstärke < 20 Rf/h). 1 Straßenseite weist hingegen einen sehr hohen Anteil auf, allerdings mit einer sehr geringen Zahl erfasster Radfahrender (9 Rf/h).

Anteil Erklärung Devianz / df (ohne nicht erklärten Anteil)

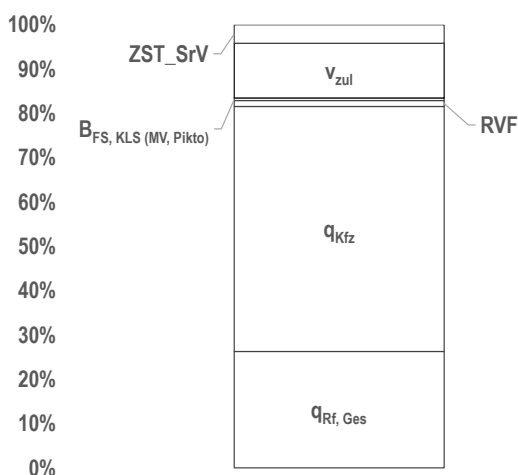


Bild 7-5 Anteilige Reduzierung der Devianz durch die unabhängigen Variablen – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit und ohne Piktogramme

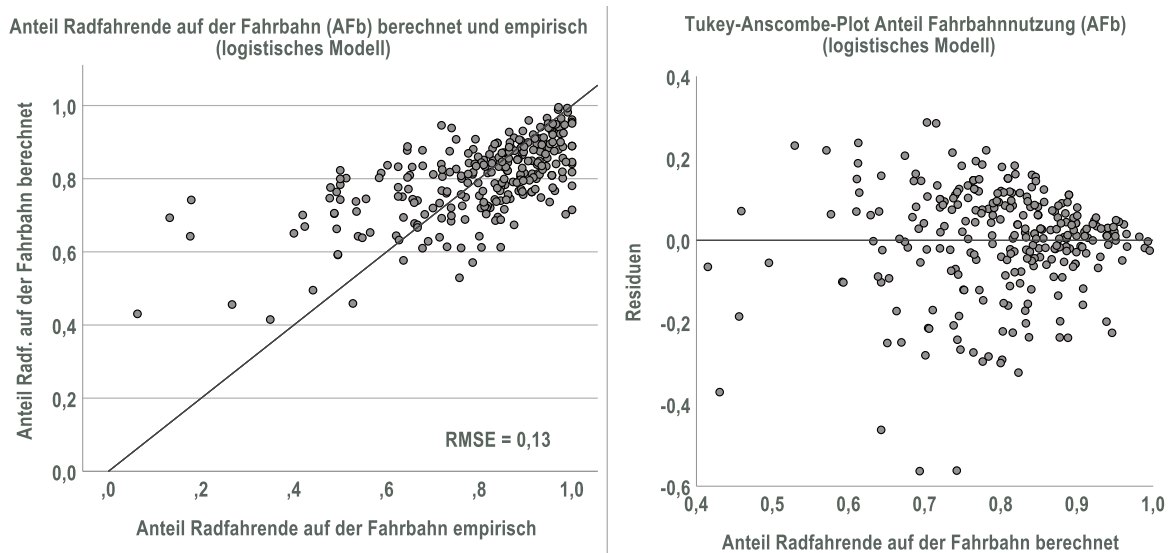


Bild 7-6 Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn berechnet (logistisches Modell) und empirisch (links) und Tukey-Anscombe-Plot der logistischen Regression zum Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn (rechts) – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit und ohne Piktogramme

7.3.3 Teilmodell Schutzstreifen: Anteil Fahrbahnnutzung und Schutzstreifen-/ Fahrstreifenbreite

Die Analyse des Erkenntnisstandes hat gezeigt, dass bei der Führung mit Schutzstreifen ein Überholabstand von 1,50 m häufig unterschritten wird, da sich Kfz-Führende in ihrer Fahrlinie an der Markierung der Schutzstreifen orientieren (vgl. Kapitel 4.2.4). Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Schutzstreifen- und/oder die nutzbare Fahrstreifenbreite einen Einfluss auf die Überholabstände haben. In diesem Zusammenhang stellt sich analog zu Kapitel 7.3.2 die Frage, welchen Einfluss die (nutzbare) Fahrstreifenbreite bzw. die Schutzstreifenbreite auf den Anteil der Fahrbahnnutzung hat.

Zur Beantwortung der Fragestellung werden ausschließlich zweistreifige Streckenabschnitte mit Schutzstreifen betrachtet (vgl. Kapitel 7.3.2). Dieses Teilmodell wird ebenfalls auf Basis der logistischen Regression erstellt, wobei jede Straßenseite ein Gruppe mit einer normierten Anzahl an Versuchen (100 Radfahrende) und entsprechenden Ereignissen repräsentiert (vgl. Kapitel 7.3.2). Der Erstellung dieses Teilmodells liegen insgesamt 61 Straßenseiten zugrunde.

Tab. 7-7 zeigt das logistische Teilmodell des Anteils der Radfahrenden auf der Fahrbahn auf einstreifigen Straßenseiten mit Schutzstreifen. Das Teilmodell zeigt mit einem McF-R² von 0,49 eine sehr gute Anpassung an die Datengrundlage (vgl. Backhaus et al. 2018, S. 299). Der Vergleich der Devianz/df des Nullmodells mit dem Modell zeigt auch, dass ein erheblicher Teil der Abweichungen durch die berücksichtigten Merkmale reduziert wird. Im Vergleich zum Gesamtmodell der Fahrbahnnutzung (vgl. Kapitel 7.3.1, Tab. 7-5) ist auch hier eine bessere Anpassung zu verzeichnen, da die Datengrundlage des Teilmodells homogener (nur einstreifige Straßenseiten mit Schutzstreifen) ist. Abgesehen von den Verkehrsstärken (Rf und Kfz), welche sehr ähnliche Wirkungszusammenhänge aufweisen, zeigen sich im Vergleich zum Gesamtmodell andere Merkmale mit signifikanten Einflüssen ($p < 0,1$) auf den Anteil der Fahrbahnnutzung, was damit zu begründen ist, dass die 61 betrachteten Straßenseiten mit Schutzstreifen lediglich 15 % des gesamten Gesamtkollektives repräsentieren. Im Resultat erhöht sich die Chance Radfahrende*r fährt auf der Fahrbahn zu Radfahrende*r fährt auf dem Gehweg (Interpretation der Odds Ratios (OR)) mit

- zunehmender Radverkehrsstärke in Richtung i (Beispiel: bei 200 Rf/ h im Vergleich zu 100 Rf/h um den Faktor 5).
- abnehmender Verkehrsstärke der Kfz in Richtung i (Beispiel: bei einer Verkehrsstärke von 500 Kfz/h im Vergleich zu 400 Kfz/h um den Faktor 0,8).

- abnehmenden Schwerverkehrsanteil (Beispiel: bei einem SV-Anteil von 5 % im Vergleich zu 4 % um den Faktor 0,9). Das ist insbesondere vor dem Hintergrund interessant, dass der Schwerverkehrsanteil im Gesamtmodell (vgl. Kapitel 7.3.1) sowie im Teilmodell der Abschnitte mit Mischverkehr (mit und ohne Piktogrammen) (vgl. Kapitel 7.3.2) keinen signifikanten Einfluss hat. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass aufgrund der geringeren Überholabstände bei Schutzstreifen Schwerverkehrsfahrzeuge einerseits als unangenehmer wahrgenommen werden und andererseits insbesondere bei geringer Fahrstreifenbreite Schutzstreifen zum Teil überfahren müssen, was die Akzeptanz verringern könnte.
- einer nutzbaren Fahrstreifenbreite > 2,75 m um den Faktor 1,9. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die nutzbare Fahrstreifenbreite mit der Breite der Schutzstreifen stark korreliert, so dass nur die Fahrstreifenbreite berücksichtigt wurde, welche zum einen signifikanter ist und zum anderen zu einer stärkeren Reduzierung der Devianz führt. Das Ergebnis der Berücksichtigung der Schutzstreifenbreite statt der Fahrstreifenbreite zeigt Anlage 10 (Tab.-A 13). Die Chance, dass Radfahrende auf der Fahrbahn fahren, erhöht sich bei einer Schutzstreifenbreite von 1,50 m um den Faktor 1,5 und bei einer Schutzstreifenbreite von > 1,50 m um den Faktor 2 (ggü. Schutzstreifenbreiten < 1,50 m). Allerdings zeigt sich auch, dass das Signifikanzniveau von 0,1 sowohl hinsichtlich Signifikanz der Modelleffekte (vgl. Kapitel 6.2.3) nicht erreicht wird. Andere Kategorisierungen der Schutzstreifenbreite verbessern das Ergebnis nicht.
- zunehmenden Anteil des Geschäftsbesatzes an der Bebauungslänge beidseitig (Beispiel: bei einem mittleren Anteil des Geschäftsbesatzes von 50 % im Vergleich zu 25 % entspricht der Faktor 1,4). Dieser Effekt wird stellvertretend für eine hohe Verkehrsstärke des Fußverkehrs (weniger Raum für Radfahrende auf dem Gehweg) interpretiert. Diese steht für die Mehrzahl der Abschnitte mit Schutzstreifen nicht zur Verfügung (vgl. Kapitel 5.2.1, Tab. 5-3). Die Gegenüberstellung des Anteils des Geschäftsbesatzes mit der Fußverkehrsstärke (siehe Anlage 11, Bild-A 11; für Abschnitte mit Daten zur Fußverkehrsstärke) zeigt einen positiven Zusammenhang zwischen den Merkmalen, wenngleich mit einer relativ hohen Streuung.
- zunehmender Dichte lichtsignalgeregelter Querungsanlagen (Beispiel: bei 2 im Vergleich zu 1 FLSA/km um den Faktor 1,3) und Fußgängerüberwegen (Beispiel: bei 2 im Vergleich zu 1 FGÜ/km um den Faktor 1,2), was darauf zurückzuführen sein könnte, dass insbesondere auch für kürzere Abschnitte der Schutzstreifen genutzt wird (statt linker Gehwege), da genügend Querungsmöglichkeiten vorhanden sind.

Tab. 7-7 Logistisches Regressionsmodell Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Richtung i – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit Schutzstreifen

Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn auf zweistreifigen Abschnitten mit Schutzstreifen [-]							
	Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	OR	p^1	
β_0	Konstante	-	1,680 ****	0,263	5,364	****	
$q_{Rf, Ges}$	Verkehrsstärke Radfahrende Gesamt in Richtung i	Rf/h	0,016 ****	0,002	-	****	
q_{Kfz}	Verkehrsstärke Kfz in Richtung i	Kfz/h	-0,002 ****	0,000	-	***	
SV_{Anteil}	Schwerverkehrsanteil in Richtung i	%	-0,161 ****	0,029	-	****	
$B_{FS, KLS(SSF)}$	nutzbare Fahrstreifenbreite	2,25 bis 2,75 m	Ref.		Ref.	**	
		> 2,75 m	0,643 ***	0,175	1,902		
$AL_{G, beidseitig}$	Anteil Länge Geschäftsbesatz an Bebauungslänge beidseitig (Mittelwert)	-	1,370 ****	0,331	-	***	
N_{FLSA}	Anzahl LSA (Querungsanlage)	FLSA/km	0,275 ***	0,079	-	***	
$N_{FGÜ}$	Anzahl FGÜ (Querungsanlage)	FGÜ/km	0,174 **	0,067	-	*	

$n_{Stellen} = 61$

$n_{Ereignisse} = 5.337$

$n_{Versuche} = 6.100$

Devianz / df Nullmodell = 10,7

Devianz / df Modell = 3,97

McF-R² = 0,49

AIC = 460,040

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * $p < ,05$ ** $p < ,01$ *** $p < ,001$ **** $p < ,0001$

Die Betrachtung der Reduzierung der Devianz durch die einzelnen Variablen ergibt, dass (siehe Bild 7-7) die Radverkehrsstärke eine deutlich größere Reduzierung erreicht, als die Kfz-Verkehrsstärke. Insgesamt wird die Devianz durch die Kfz-Verkehrsstärke am wenigsten reduziert. Auch im Vergleich zu den anderen Modellen (vgl. Bild 7-3 und Bild 7-5) zeigt sich ein deutlich geringerer Einfluss der Kfz-Verkehrsstärke. Es lässt sich schlussfolgern, dass die Kfz-Verkehrsstärke bei Vorhandensein von Schutzstreifen einen deutlich geringeren Einfluss auf den Anteil der Fahrbahn- bzw. Schutzstreifennutzung hat, als im Mischverkehr, was darauf zurückgeführt wird, dass dem Radverkehr eine Fläche zur Verfügung steht. Unabhängig davon zeigt sich, dass die Devianz durch den Schwerverkehrsanteil, die Fahrstreifenbreite, den Anteil des Geschäftsbesatzes sowie der Anzahl der lichtsinalgeregelter Querungsanlagen etwa in gleichen Dimensionen reduziert wird. Die geringste Reduzierung der Devianz bewirkt die Anzahl der Fußgängerüberwege. Das Modell mit Berücksichtigung der Schutzstreifenbreite statt der Fahrstreifenbreite (siehe Anlage 10, Bild-A 10) weist der Breite der Schutzstreifen einen deutlich geringeren Erklärungsgehalt als der Fahrstreifenbreite nach. Die Anteile der Reduzierung der Devianz der anderen Merkmale erreichen ähnliche Verhältnisse.

Anteil Erklärung Devianz / df (ohne nicht erklärten Anteil)

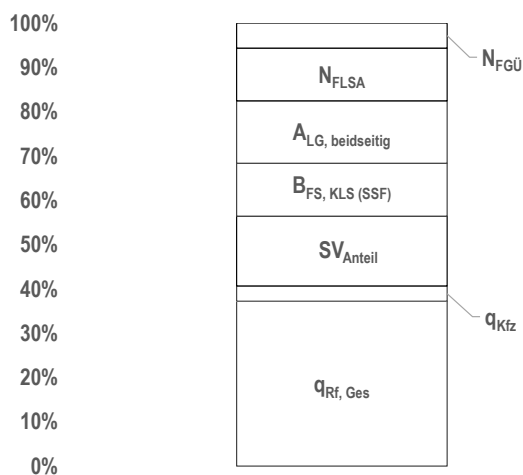


Bild 7-7 Anteilige Reduzierung der Devianz durch die unabhängigen Variablen – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit Schutzstreifen

Die Gegenüberstellung der berechneten und empirischen Anteile der Fahrbahnnutzung zeigt eine gute Übereinstimmung (siehe Bild 7-8, links; Punkte streuen gleichmäßig um die Gerade). Auch die Verteilung der Residuen ergibt kein auffälliges Muster, das heißt die Residuen streuen gleichmäßig zu den berechneten Anteilen der Fahrbahnnutzung (siehe Bild 7-8, rechts). Im Vergleich zum Gesamtmodell (vgl. 7.3.1) sowie zum Teilmodell der zweistreifigen Abschnitte mit Mischverkehr (vgl. Kapitel 7.3.2) zeigt das Teilmodell der zweistreifigen Abschnitte mit Schutzstreifen die beste Anpassung.

Die Analyse der einflussreichen Fälle ergibt 4 auffällige Cook-Distanzen und 1 auffälligen Hebelwert, wobei sich keine deutliche Systematik ergibt. Innerhalb der 4 Cook-Distanzen befinden sich 2 Straßenseiten mit durchschnittlichen Anteilen der Fahrbahnnutzung (1 davon mit überdurchschnittlichem SV-Anteil bei unterdurchschnittlicher Fahrstreifenbreite) sowie 2 Straßenseiten mit unterdurchschnittlichen Anteilen der Fahrbahnnutzung (1 davon mit überdurchschnittlichem SV-Anteil bei überdurchschnittlicher Fahrstreifenbreite). Die genannten 4 Straßenseiten weisen allerdings alle eine unterdurchschnittliche Verkehrsstärke Radfahrender auf (< 30 Rf/h). Die Straßenseite mit auffälligem Hebelwert weist auch eine auffällige Cook-Distanz auf und kann durch einen überdurchschnittlichen SV-Anteil, überdurchschnittlicher Fahrstreifenbreite sowie eine sehr geringe Radverkehrsstärke (3 Rf/h) charakterisiert werden.

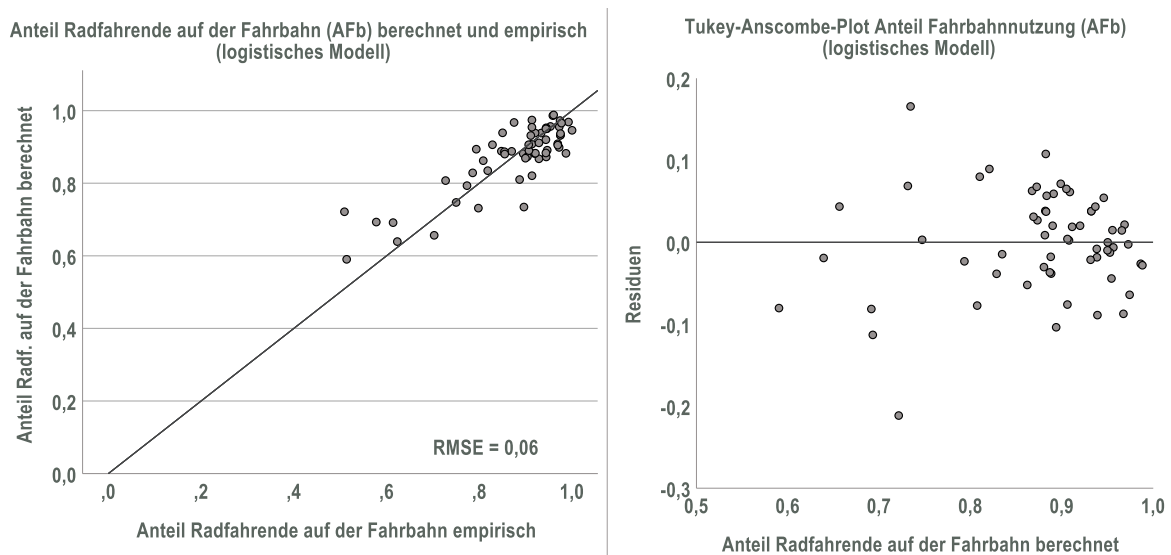


Bild 7-8 Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn berechnet (logistisches Modell) und empirisch (links) und Tukey-Anscombe-Plot der logistischen Regression zum Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn (rechts) – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit Schutzstreifen

Zusammenfassend zeigt sich, dass der Anteil der Fahrbahnnutzung auf zweistreifigen Abschnitten mit Schutzstreifen teilweise von anderen Merkmalen beeinflusst wird, als zweistreifige Abschnitte mit Mischverkehr mit und ohne Piktogramme. Hervorzuheben sind dabei vor allem der Schwerverkehrsanteil sowie nutzbare Fahrstreifenbreiten. Hinsichtlich der Merkmale, denen in beiden Teilmodellen ein signifikanter Einfluss nachgewiesen werden konnte, zeigt sich vor allem, dass der Erklärungsgehalt der Kfz-Verkehrsstärke auf zweistreifigen Abschnitten mit Schutzstreifen deutlich geringer ist, als im Gesamtmodell bzw. dem Teilmodell zweistreifiger Abschnitte mit Mischverkehr. Warum der nutzbaren Fahrstreifenbreite ein größerer Einfluss im Vergleich zur Schutzstreifenbreite nachgewiesen wurde, kann nur vermutet werden – ggf. müssen die Schutzstreifen vor allem im Begegnungsfall von Schwerverkehrsfahrzeugen seltener von diesen überfahren werden. Generell ist zu berücksichtigen, dass Abschnitte mit Schutzstreifen einen signifikant höheren Anteil der Fahrbahnnutzung mit deutlich geringerer Streuung ggü. der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr aufweisen (vgl. Kapitel 7.1, Tab. 7-2).

7.4 Modelle Anteil linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg

Lineare Regression

Tab. 7-8 zeigt das Ergebnis der linearen Modellierung zur Beschreibung der Einflüsse auf den Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg. Das Modell weist mit einem korrigierten $R^2 = 0,19$ einen deutlich geringeren Erklärungsgehalt auf, als das Modell zum Anteil der Fahrbahnnutzung (vgl. Kapitel 7.3.1). Grundsätzlich zeigt sich, dass nicht alle Variablen im Modell vorhanden sind, die den Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg beeinflussen. Das könnten vor allem Merkmale zu netzplanerischen Aspekten in den jeweiligen Untersuchungsstädten sein. Denn in Kapitel 4.2.3 konnte gezeigt werden, dass Straßenseiten die Radfahrenden Umwege ersparen oder von denen wichtige bzw. stark frequentierte Netzabschnitte abzweigen einen Einfluss auf den Anteil linksfahrender Radfahrender haben können (Alrutz 2009, S. 31). Im Einzelnen zeigt sich, dass der Anteil linksfahrender Radfahrender auf dem Gehweg abnimmt, wenn

- die Verkehrsstärke der Radfahrenden in der entsprechenden Richtung zunimmt (bei 200 Rf/h im Vergleich zu 100 Rf/h um etwa 6 % je Rf/h), was die Acceptance-in-Numbers-These (siehe Kapitel 7.3) bestätigt: Je mehr Radfahrende sich insgesamt in Richtung i bewegen, umso geringer ist der Anteil der Radfahrenden auf linken Gehwegen (und umso höher ist der Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn).
- die Kfz-Verkehrsstärke (auf dem rechten Fahrstreifen, sofern 2 Fahrstreifen je Richtung vorhanden sind) abnimmt (bei 500 Kfz/h im Vergleich zu 400 Kfz/h um etwa 2 %).
- die Anzahl der Fahrstreifen abnimmt (ist 1 statt 2 Fahrstreifen je Richtung vorhanden, reduziert sich der Anteil der linksfahrenden Radfahrenden im Mittel um etwa 5 %).
- die zulässige Geschwindigkeit < 50 km/h ist (im Mittel um etwa 2 %).
- der Anteil der Länge des Geschäftsbesatzes an der gesamten Bebauungslänge auf beiden Straßenseite (Mittelwert) abnimmt (bei 50 % im Vergleich zu 25 % Geschäftsbesatz um 1%) – das heißt je mehr potentielle Ziele die Randnutzung aufweist, desto höher ist der Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg.

Dass Piktogramme oder Schutzstreifen vorhanden sind, hat keinen signifikanten Einfluss (Signifikanz der Modelleffekte $< 0,1$) auf den Anteil der linksfahrenden Radfahrenden.

Tab. 7-8 Lineares Regressionsmodell Anteil linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg in Richtung i

Anteil linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg [-]		Variable	Einheit	Regressions- koeffizient β	Standard- fehler	Beta- Wert	T	p
β_0	Konstante		-	0,0495	0,013		3,725	****
$q_{Rt, Ges}$	Verkehrsstärke Radfahrende Gesamt in Richtung i		Rf/h	-0,0006	0,000	-0,378	-6,048	****
$q_{Kfz, FS1}$	Verkehrsstärke Kfz rechter Fahrstreifen in Richtung i		Kfz/h	0,0002	0,000	0,263	4,359	****
N_{FS}	Anzahl Fahrstreifen	1		Ref.		Ref.		
		2		0,050	0,015	0,201	3,374	***
v_{zul}	zulässige Geschwindigkeit = 50 km/h	50 km/h		Ref.		Ref.		
		< 50 km/h		-0,0212	0,010	-0,092	-2,216	*
$AL_G, \text{ beidseitig}$	Anteil Länge Geschäftsbesatz an Bebauungslänge beidseitig (Mittelwert)		-	0,0387	0,019	0,124	2,015	*

korr. $R^2 = 0,19$
 $n = 407$
 F-Wert = 19,684
 Durbin-Watson = 1,764

* $p < ,05$ ** $p < ,01$ *** $p < ,001$ **** $p < ,0001$

Die standardisierten Beta-Werte zeigen, dass die Verkehrsstärke der Radfahrenden den höchsten Erklärungsgehalt aufweist. Etwas geringer ist der Einfluss der Kfz-Verkehrsstärke sowie der Anzahl der Fahrstreifen. Der geringste Erklärungsgehalt wird durch die zulässige Geschwindigkeit sowie den Anteil des Geschäftsbesatzes erreicht.

Die Gegenüberstellung der berechneten und empirischen Anteile der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg ergibt, dass insbesondere Abschnitte deutlich unterschätzt werden, bei denen der Anteil linksfahrender Radfahrender verhältnismäßig hoch ist und Abschnitte überschätzt werden, bei denen der Anteil der linksfahrenden Radfahrenden gegen Null geht (siehe Bild 7-9). Außerdem werden analog zum linearen Modell des Anteils der Fahrbahnnutzung (vgl. Kapitel 7.3.1) Anteile linksfahrender Radfahrender von < 0 ermittelt. Die mittlere Abweichung je Abschnitt (RMSE) ist mit 0,09 vor dem Hintergrund eines mittleren Anteils linksfahrender Radfahrender von 0,08 (vgl. Tab. 7-2) als hoch einzuschätzen.

Anteil linksfahrende Radfahrende (AGw, li) berechnet und empirisch
(lineares Modell)

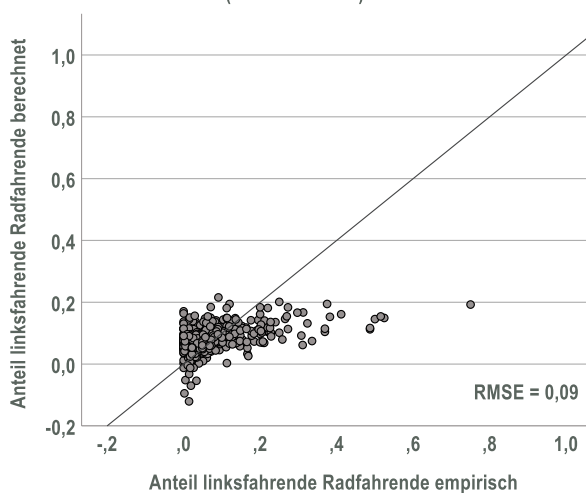


Bild 7-9 Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg berechnet (lineares Modell) und empirisch

Der Durbin-Watson Kennwert weist mit einem Wert von 1,76 auf keine Autokorrelation hin, was darauf zurückzuführen sein könnte, dass sich die Anteile der linksfahrenden Radfahrenden zwischen den Straßenseiten eines Abschnittes zum Teil auch deutlich voneinander unterscheiden. Dies könnte unabhängig davon auch wiederum ein Hinweis darauf sein, dass netzplanerische Aspekte einen Einfluss haben könnten.

Der QQ-Plot der Residuen (siehe Bild 7-10, links) zeigt im Vergleich zu den Modellen zur Fahrbahnnutzung (vgl. Kapitel 7.3.1, Bild 7-2) deutliche starke „tails“ und damit insgesamt keine gute Übereinstimmung der Punkte mit der Gerade, was ein Hinweis darauf ist, dass keine Normalverteilung vorliegt.

Der Tukey-Anscombe-Plot (siehe Bild 7-10, rechts) zeigt eine sehr stark trichterförmige Verteilung der Residuen mit zunehmenden (berechneten) Anteil der linksfahrenden Radfahrenden. Das heißt, je höher die berechneten Anteile der linksfahrenden Radfahrenden, desto größer sind auch die Abweichungen. Generell ist die Verteilung der Residuen im Vergleich zum Modell zum Anteil der Fahrbahnnutzung (vgl. Kapitel 7.3.1, Bild 7-2) deutlich ungleichmäßiger.

Die Analyse der einflussreichen Fälle ergibt insgesamt 24 Abschnitte (14 davon sind auch im linearen Modell zur Fahrbahnnutzung auffällig) mit auffälligen Cook-Distanzen und 8 Abschnitten (6 davon sind auch im linearen Modell zur Fahrbahnnutzung auffällig) mit auffälligen Hebelwerten. Dabei ergibt sich hinsichtlich der Cook-Distanz folgende Systematik:

- 9 einstreifige Straßenseiten mit sehr hohen Anteilen der linksfahrender Radfahrender ($> 30\%$) bei teilweise geringer Anzahl an erfassten Radfahrenden (< 30 Rf/h) (7 mit Mischverkehr; 2 mit Schutzstreifen)

- 6 zweistreifige Straßenseiten mit sehr niedrigen Anteilen der linksfahrenden Radfahrenden (< 5 %) und zum Teil sehr hohen Kfz-Verkehrsstärken (5 mit Mischverkehr; 1 mit Schutzstreifen)
- 6 zweistreifige Straßenseiten mit Mischverkehr und sehr hohen Anteilen der linksfahrenden Radfahrenden (> 30 %) und geringen Zahlen erfasster Radfahrender (< 30 Rf/h)
- 3 einstreifige Straßenseiten mit Mischverkehr ohne linksfahrende Radfahrende mit sehr hohem Anteil des Geschäftsbesatzes (> 0,9)

Hinsichtlich der 8 Abschnitte mit auffälligen Hebelwerten zeigt sich, dass 7 der 8 Straßenseiten, wenig linksfahrende Radfahrende aufweisen (< 5 %) – 3 zweistreifige (2 mit Mischverkehr; eine mit Schutzstreifen) und 4 einstreifige Straßenseiten mit Mischverkehr. Eine einstreifige Straßenseite ($v_{zul} = 30$ km/h) weist hingegen einen sehr hohen Anteil linksfahrender Radfahrender (> 50 %) auf.

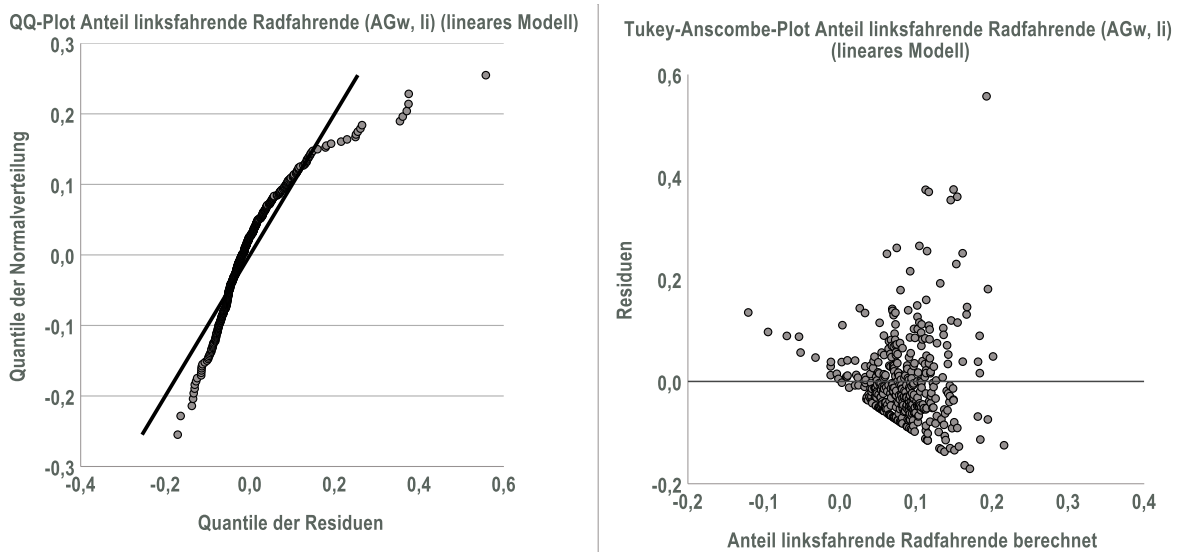


Bild 7-10 QQ-Plot (links) und Tukey-Anscombe-Plot (rechts) der linearen Regression zum Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg

Logistische Regression

Wie im Bereich des Modells zum Anteil der Fahrbahnnutzung wurde das logistische Modell auf Basis gruppierter Daten erstellt, wobei jede Straßenseite eine Gruppe repräsentiert (Abhängige Variable: Anzahl linksfahrende Radfahrende (Ereignisse) und alle Radfahrende in Richtung i (Versuche)). Die Anzahl der Versuche wurde auf 100 Radfahrende normiert um einzelne Abschnitte nicht unter- oder überzubewerten (vgl. Kapitel 7.3.1). Tab. 7-9 zeigt die Ergebnisse des logistischen Regressionsmodells, zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit, dass Radfahrende vor dem Hintergrund der berücksichtigten Merkmale auf dem linken Gehweg fahren. Es zeigt sich, dass dieselben Einflussgrößen und entsprechenden Wirkrichtungen (Interpretation der Devianz und der Signifikanzen; vgl. Kapitel 6.2.3) ermittelt wurden, wie im Rahmen der linearen Regression. Das logistische Regressionsmodell liegt mit einem McF- R^2 von 0,20 an der unteren Grenze einer guten Modellanpassung (vgl. Backhaus et al. 2018, S. 299). Der Vergleich der Devianz/df des Nullmodells mit dem Modell zeigt, dass Abweichungen durch die berücksichtigten Merkmale reduziert werden, wenngleich die Differenz der Devianz zwischen Nullmodell und Modell deutlich geringer im Vergleich zum Modell des Anteils der Fahrbahnnutzung ist (vgl. Kapitel 7.3.1, Tab. 7-5). Im Einzelnen zeigt sich, dass sich die Chance Radfahrende* r fährt links auf dem Gehweg zu Radfahrende* r fährt in vorgeschriebener Richtung (Interpretation der Odds Ratios (OR)) mit

- zunehmender Gesamtverkehrsstärke der Radfahrenden verringert (Beispiel: bei einer Verkehrsstärke von 200 Rf/h im Vergleich zu 100 Rf/h um den Faktor 0,3).
- zunehmender Verkehrsstärke der Kfz (auf dem rechten Fahrstreifen, sofern 2 Fahrstreifen je Richtung vorhanden sind) erhöht (Beispiel: bei einer Verkehrsstärke von 500 Kfz/h im Vergleich zu 400 Kfz/h erhöht sich die Chance, dass Radfahrende auf dem linken Gehweg fahren um den Faktor 1,2).

- zunehmender Anzahl an Fahrstreifen (sind 2 statt 1 Fahrstreifen je Richtung vorhanden) um den Faktor 1,9 erhöht.
- mit einer zulässigen Geschwindigkeit < 50 km/h um den Faktor 0,7 verringert.
- mit zunehmendem Anteil des Geschäftsbesatzes auf der gegenüberliegenden Straßenseite (die Straßenseite auf denen die betrachteten Radfahrenden fahren) an der Bebauungslänge erhöht (bei 50 % im Vergleich zu 25 % Geschäftsnutzung um den Faktor 1,1).

Tab. 7-9 Logistisches Regressionsmodell Anteil linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg in Richtung i

Anteil linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg [-]		Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	OR	p^1
β_0	Konstante	-	-2,749 ****	0,180	0,064	****
$Q_{Rf, Ges}$	Verkehrsstärke Radfahrende Gesamt in Richtung i	Rf/h	-0,012 ****	0,002	-	****
$Q_{Kfz, FS1}$	Verkehrsstärke Kfz rechter Fahrstreifen in Richtung i	Kfz/h	0,002 ****	0,000	-	****
N_{FS}	Anzahl Fahrstreifen in Richtung i	1	Ref.		Ref.	****
		2	0,631 ****	0,152	1,880	
V_{zul}	zulässige Geschwindigkeit	50 km/h	Ref.		Ref.	*
		< 50 km/h	-0,301 ^{0,050}	0,154	0,740	
AL_G , gegenüber	Anteil Länge Geschäftsbesatz an Bebauungslänge auf der gegenüberliegenden Straßenseite	-	0,387 *	0,182	-	*

nStellen = 407
nEreignisse = 3.449
nVersuche = 40.700
Devianz / df Nullmodell = 9,93
Devianz / df Modell = 7,38
McF-R² = 0,20
AIC = 4.252,55

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

Wie auch im Bereich der linearen Regression konnte, der Radverkehrsführungsform kein signifikanter Einfluss (Signifikanz der Modelleffekte < 0,1) auf den Anteil linksfahrender Radfahrender nachgewiesen werden.

Analog zum Modell des Anteils der Fahrbahnnutzung, werden zur Beantwortung der Frage des Erklärungsgehaltes der unabhängigen Variablen, die Anteile der Veränderung der Devianz / df je unabhängiger Variable dargestellt (siehe Bild 7-11). Ähnlich dem linearen Modell reduzieren die Verkehrsstärken (Radfahrende und Kfz) und die Anzahl der Fahrstreifen die Devianz am deutlichsten, während die zulässige Geschwindigkeit sowie der Anteil des Geschäftsbesatzes den geringsten Erklärungsgehalt aufweisen.

Die Gegenüberstellung der berechneten und empirischen Anteile der linksfahrenden Radfahrenden (siehe Bild 7-12), zeigt (ähnlich dem lineare Regressionsmodell) dass Abschnitte deutlich unterschätzt werden, bei denen der Anteil linksfahrender Radfahrender verhältnismäßig hoch ist und Abschnitte überschätzt werden, bei denen der Anteil der linksfahrenden Radfahrenden gegen Null geht. Im Vergleich zum linearen Modell liegen die Punkte beim logistischen Modell geringfügig näher an der Gerade (RMSE (logistisches Modell) = 0,08; RMSE (lineares Modell) = 0,09). Die logistische Regression erlaubt zudem in ihrer Grundform keine Anteile linksfahrender Radfahrender < 0, was der Grundannahme des Untersuchungsgegenstandes besser entspricht (vgl. Kapitel 7.3.1).

Der Tukey-Anscombe-Plot (siehe Bild 7-12, rechts) zeigt wie im linearen Modell eine sehr stark trichterförmige Verteilung der Residuen. Je höher die berechneten Anteile der linksfahrenden Radfahrenden desto größer sind auch die Abweichungen. Generell ist die Verteilung der Residuen im Vergleich zum Modell des Anteils der Fahrbahnnutzung deutlich ungleichmäßiger (vgl. Kapitel 7.3, Bild 7-4).

Anteil Erklärung Devianz / df (ohne nicht erklärten Anteil)

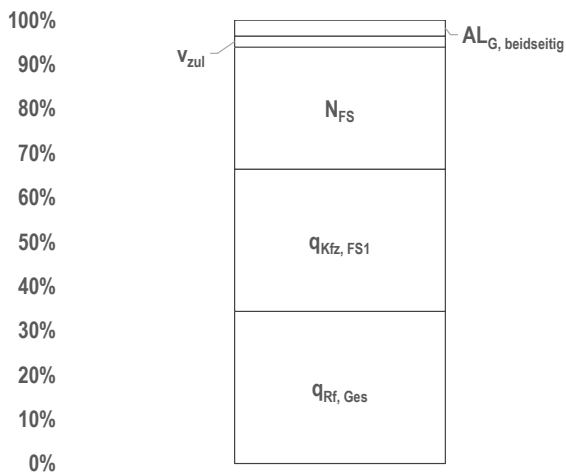


Bild 7-11 Anteilige Reduzierung der Devianz durch die unabhängigen Variablen

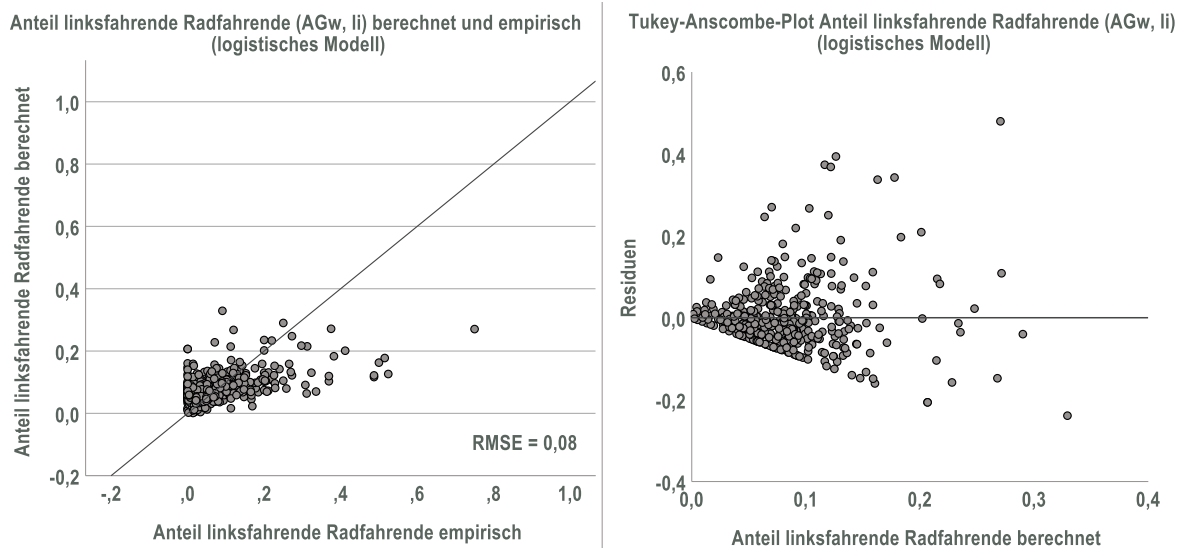


Bild 7-12 Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg berechnet (logistisches Modell) und empirisch (links) und Tukey-Anscombe-Plot (rechts) der logistischen Regression zum Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg

Die Analyse der einflussreichen Fälle ergibt insgesamt 28 Abschnitte (19 davon sind auch im linearen Modell auffällig) mit auffälligen Cook-Distanzen und 12 Abschnitten (6 davon sind auch im linearen Modell auffällig) mit auffälligen Hebelwerten. Dabei ergibt sich hinsichtlich der Cook-Distanz folgende Systematik:

- 10 einstreifige Straßenseiten (7 mit Mischverkehr, 2 mit Schutzstreifen, 1 mit Piktogrammen) mit sehr hohen Anteil linksfahrender Radfahrender (< 30 %) bei gleichzeitig geringer Anzahl an erfassten Radfahrenden (< 20 Rf/h)
- 6 zweistreifige Straßenseiten (4 mit Mischverkehr, 2 mit Schutzstreifen) mit sehr geringen Anteilen linksfahrender Radfahrender (< 10 %)
- 6 zweistreifige Straßenseiten (5 mit Mischverkehr, 1 mit Schutzstreifen) mit sehr hohen Anteilen linksfahrender Radfahrender (> 30 %) bei teilweise geringer Anzahl an erfassten Radfahrenden (< 20 Rf/h)
- 2 einstreifige Straßenseiten mit Mischverkehr und keinen linksfahrenden Radfahrenden (1 davon mit sehr hohem Geschäftsbesatz)

- 4 einstreifige Straßenseiten mit leicht überdurchschnittlichen Anteilen linksfahrender Radfahrender (11 bis 17 %) ohne weitere Auffälligkeiten

Hinsichtlich der auffällige Hebelwerte zeigt sich, dass 7 Abschnitte mit Mischverkehr (4 davon mit 2 Fahrstreifen je Richtung) überdurchschnittlich hohe Anteile linksfahrender Radfahrender (> 20 %) aufweisen. Weitere 4 Abschnitte (2 mit Mischverkehr, 2 mit Schutzstreifen) weisen hingegen sehr geringe Anteile (< 10 %) auf.

Vergleich der Modelle

Grundsätzlich zeigt sich, dass der Anteil der Fahrbahnnutzung deutlich besser mit den erhobenen Merkmalen beschrieben werden kann, als der Anteil der linksfahrenden Radfahrenden. Wie zu Beginn des Kapitels bereits erwähnt, wird dies darauf zurückgeführt, dass der Anteil der linksfahrenden Radfahrenden neben den streckenbezogenen Infrastrukturmerkmalen von netzplanerischen Aspekten beeinflusst wird, was den vergleichsweise geringen Erklärungsgehalt der Modelle erklärt. Der Vergleich des linearen mit dem logistischen Modell weist dem logistischen Modell eine insgesamt bessere Eignung nach. Dies betrifft vorrangig die Grundannahme der logistischen Regression, dass der Anteil linksfahrender Radfahrender nicht < 0 (und > 1) sein kann. Darüber hinaus zeigt der Vergleich der berechneten und empirischen Anteile eine geringfügig bessere Anpassung der Punkte an die Gerade bei der logistischen Regression (vgl. Bild 7-9 für das lineare und Bild 7-12 (links) für das logistische Modell). Die Tukey-Anscombe-Plots unterscheiden sich (abgesehen davon, dass das lineare Modell Anteile < 0 prognostiziert) kaum (vgl. Bild 7-10 für das lineare und Bild 7-12 (rechts) für das logistische Modell).

7.5 Modellanwendung Anteil Fahrbahnnutzung in Abhängigkeit ausgewählter Merkmale

Innerhalb dieses Kapitels werden die erstellten Modelle angewendet, wobei grundsätzlich die Frage beantwortet werden soll, unter welchen gestalterischen, betrieblichen und verkehrlichen Bedingungen ein möglichst hoher Wert hinsichtlich des Anteils der Fahrbahnnutzung durch Radfahrende erreicht wird. Wie im Kapitel 7.3.1 (Abschnitt „Vergleich der Modelle“) begründet wurde, wird dafür das logistische Modell angewendet. Da dabei sowohl zwei- als auch vierstreifige Straßen betrachtet werden sollen, kommt das Gesamtmodell (siehe Kapitel 7.3.1, Tab. 7-5) zur Anwendung. Innerhalb der Teilmodelle für Straßen mit Mischverkehr (vgl. Kapitel 7.3.2) und mit Schutzstreifen (vgl. Kapitel 7.3.3) wurden nur zweistreifige Abschnitte betrachtet.

In Anlehnung an die Empfehlungen der technischen Regelwerke (siehe Kapitel 3.1) und der Merkmale im Modell, die innerhalb der Planung auch beeinflussbar/veränderbar sind, wird der Anteil der Radfahrenden auf Fahrbahn in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform (Mischverkehr mit und ohne Piktogramme, Schutzstreifen), der Kfz-Verkehrsstärke (auf dem rechten Fahrstreifen), der zulässigen Geschwindigkeit sowie der Anzahl der Fahrstreifen ermittelt. Die weiteren Merkmale im Modell werden entsprechend der Mittelwerte im Kollektiv fixiert. Das betrifft die

- mittlere Radverkehrsstärke ($q_{Rf, Ges}$) = 51 Rf/h: Anhand der Modelle ist festzustellen, dass die Radverkehrsstärke einen signifikanten Einfluss auf den Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn besitzt – einen sog. Acceptance-in-Numbers-Effekt. Um Straßen mit viel und wenig Radverkehr gleichermaßen zu berücksichtigen, geht zunächst der Mittelwert der Radverkehrsstärke im Untersuchungskollektiv als Konstante in die Modellanwendung ein. In einem weiteren darauf aufbauenden Schritt wird der Acceptance-in-Numbers-Effekt durch eine Variation der Radverkehrsstärke visualisiert, um aufzuzeigen welchen Einfluss netzplanerische oder infrastrukturelle Maßnahmen zur Erhöhung der Attraktivität des Radverkehrs (und damit zur Erhöhung der Radverkehrsstärke) auf den Anteil der Fahrbahnnutzung haben können.
- mittlere Anzahl der Anschlussknotenpunkte mit Lichtsignalanlage ($N_{AKP, LSA}$) = 0,66 AKP/km: Dieses Merkmal wird hinsichtlich des Mittelwertes fixiert, um sowohl Straßen mit niedriger als auch mit hoher Anzahl an Anschlussknotenpunkten zu repräsentieren.

Bild 7-13 zeigt den Anteil Radfahrenden auf der Fahrbahn auf einstreifigen Richtungsfahrbahnen in Abhängigkeit der Kfz-Verkehrsstärke und der zulässigen Geschwindigkeit. Wie die Analyse der Modelle bereits gezeigt hat, wirken sich Markierungen (Piktogramme oder Schutzstreifen), eine niedrige Kfz-Verkehrsstärke sowie eine $v_{zul} < 50$ km/h positiv auf den Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn aus (vgl. Kapitel 7.3.1). Dabei zeigt sich auch, dass der Einfluss der genannten Merkmale mit zunehmender Kfz-Verkehrsstärke erst zunimmt und im weiteren Verlauf wieder abnimmt, was die in Kapitel 7.3.1 (Abschnitt „Vergleich der Modelle“) angesprochenen Schwierigkeiten bei der Interpretation der Koeffizienten innerhalb der logistischen Regression verdeutlicht. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass dem Kollektiv der Piktogramme lediglich 13 Straßenseiten (3 % des Gesamtkollektives) zugrunde liegen. Unter der Annahme, dass ein mittlerer Anteil der Fahrbahnnutzung von 85 % (ohne Kinder und Begleitung) als akzeptabel angesehen wird, zeigen sich folgende Grenzwerte hinsichtlich der Kfz-Verkehrsstärke je Fahrtrichtung, die nicht überschritten werden sollten:

- Mischverkehr, $v_{zul} = 50$ km/h: ca. 200 Kfz/h (Empfehlung nach FGSV (2010a, S. 22): ca. 200 Kfz/h)
- Mischverkehr, $v_{zul} < 50$ km/h: ca. 400 Kfz/h (Empfehlung nach FGSV (2010a, S. 22): ca. 400 Kfz/h)
- Mischverkehr mit Piktogrammen, $v_{zul} = 50$ km/h: ca. 500 Kfz/h (keine Empfehlungen bisher)
- Mischverkehr mit Piktogrammen, $v_{zul} < 50$ km/h: ca. 700 Kfz/h (keine Empfehlungen bisher)
- Schutzstreifen, $v_{zul} = 50$ km/h: ca. 500 Kfz/h (Empfehlung nach FGSV (2010a, S. 22): ca. 600 Kfz/h)
- Schutzstreifen, $v_{zul} < 50$ km/h: ca. 700 Kfz/h (Empfehlung nach FGSV (2010a, S. 22): ca. 900 Kfz/h)

Es zeigt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den derzeitigen Vorgaben nach FGSV (2010a). Lediglich auf Abschnitten mit Schutzstreifen werden durch das Modell niedrigere Grenzwerte ermittelt. Legt man für Abschnitte mit Schutzstreifen die Grenzwerte nach FGSV (2010a) zugrunde, ergeben sich durch das Modell mittlere Anteile der Fahrbahnnutzung bei $v_{zul} = 50$ km/h von ca. 82 % und bei $v_{zul} < 50$ km/h von ca. 75 %. Nicht zu bewerten sind dabei Abschnitte mit Piktogrammen, da bisher keine Empfehlungen für die Anwendung vorliegen.

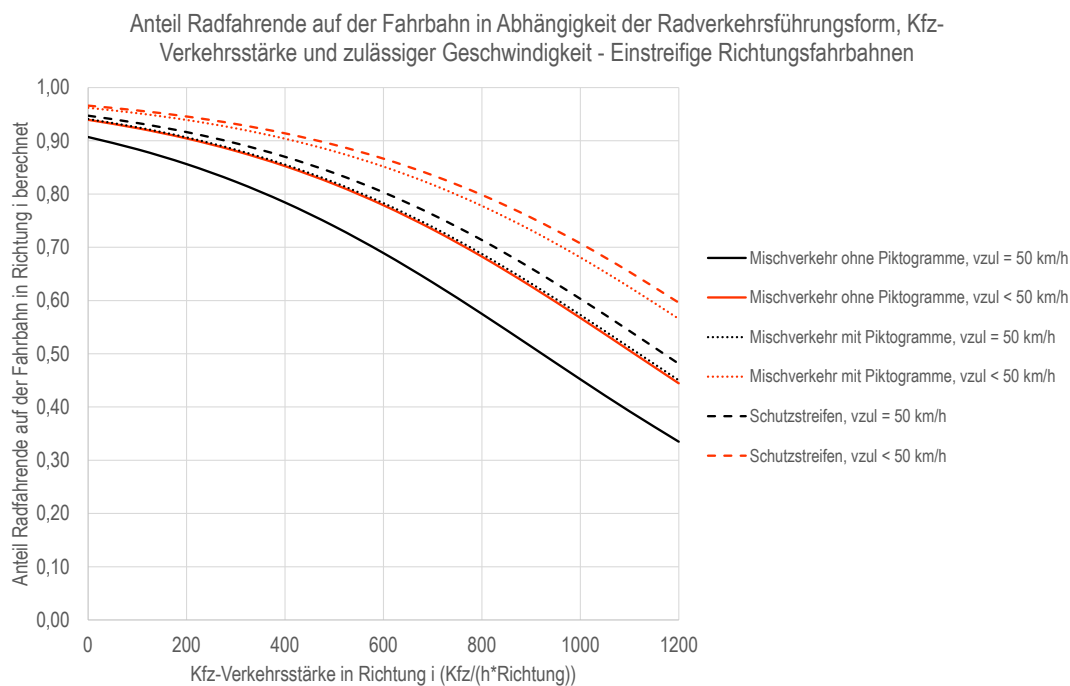


Bild 7-13 Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn auf einstreifigen Richtungsfahrbahnen in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform, Kfz-Verkehrsstärke und der zulässigen Geschwindigkeit

Dieses Ergebnis ist allerdings auch darauf zurückzuführen, dass die Mehrzahl Untersuchungsabschnitte in den nach FGSV (2010a, S. 19) empfohlenen Belastungsbereichen liegen (siehe Kapitel 7.1, Tab. 7-1) und im Mittel 83 % der Radfahrenden die entsprechenden Führungsformen im Kollektiv akzeptiert (siehe Kapitel 7.1, Tab. 7-2), ggf. auch weil es gesetzlich vorgeschrieben ist und nicht, weil sich die Radfahrenden damit wohl fühlen

(vgl. Schüller et al. 2020b, S. 83). Will man das Akzeptanzniveau demnach deutlicher erhöhen (bspw. dargestellt für 90 %) so ergeben sich folgende Grenzwerte hinsichtlich der Kfz-Verkehrsstärke in Richtung i:

- Mischverkehr, $v_{zul} = 50$ km/h: nicht zulässig
- Mischverkehr, $v_{zul} < 50$ km/h: ca. 200 Kfz/h
- Mischverkehr mit Piktogrammen, $v_{zul} = 50$ km/h: ca. 300 Kfz/h
- Mischverkehr mit Piktogrammen, $v_{zul} < 50$ km/h: ca. 450 Kfz/h
- Schutzstreifen, $v_{zul} = 50$ km/h: ca. 300 Kfz/h
- Schutzstreifen, $v_{zul} < 50$ km/h: ca. 450 Kfz/h

Für zweistreifige Richtungsfahrbahnen wird die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr nach FGSV (2010a) nicht ohne weitere Maßnahmen empfohlen. Auch die Modellanwendung ergibt keinen sinnvollen Bereich hinsichtlich der Kfz-Verkehrsstärke, wonach ein Anteil der Fahrbahnnutzung von 85 % erreicht wird. Somit werden lediglich für die Führung mit Schutzstreifen mögliche Grenzwerte aufgezeigt. Dabei ergeben sich unter der Annahme, dass ein mittlerer Anteil der Fahrbahnnutzung von 85 % (ohne Kinder und Begleitung) als akzeptabel angesehen wird, folgende Grenzwerte hinsichtlich der Kfz-Verkehrsstärke auf dem rechten Fahrstreifen, die nicht überschritten werden sollten (siehe Anlage 12, Bild-A 12):

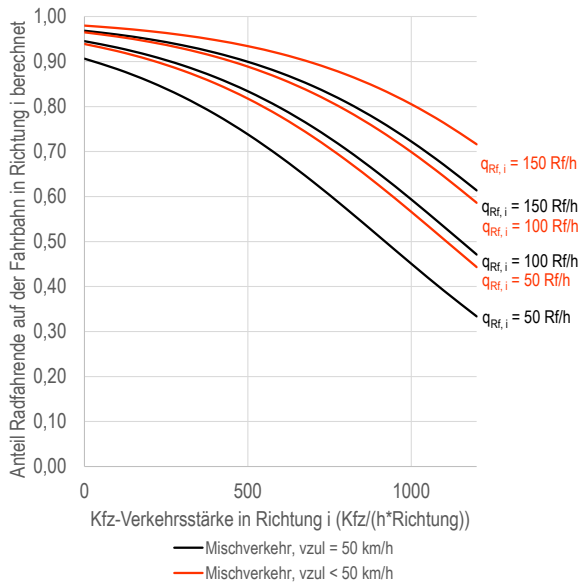
- Schutzstreifen, $v_{zul} = 50$ km/h: ca. 200 Kfz/h (Empfehlung nach FGSV (2010a, S. 22): ca. 400 Kfz/h³⁵)
- Schutzstreifen, $v_{zul} < 50$ km/h: ca. 350 Kfz/h (Empfehlung nach FGSV (2010a, S. 22): ca. 500 Kfz/h³⁵)

Zusammenfassend ergeben sich durch das Modell im Vergleich zu den Empfehlungen nach FGSV (2010a) geringere Grenzwerte³⁵ für Abschnitte mit Schutzstreifen, wenn ein Anteil der Fahrbahnnutzung von mind. 85 % angestrebt werden soll. Legt man der Modellanwendung die Grenzwerte nach FGSV (2010a) zugrunde, ergeben sich mittlere Anteile der Fahrbahnnutzung bei $v_{zul} = 50$ km/h von ca. 75 % und bei $v_{zul} < 50$ km/h von ca. 67 %. Nicht zu bewerten sind wiederum Abschnitte mit Piktogrammen. Dieses Ergebnis spricht grundsätzlich dafür, dass auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen generell Radverkehrsanlagen vorgesehen werden sollten.

Um unabhängig von den o.g. Auswertungen den Acceptance-in-Numbers-Effekt zu visualisieren wird beispielhaft für einstreifige Richtungsfahrbahnen zusätzlich nach der Verkehrsstärke der Radfahrenden differenziert. Bild 7-14 (Mischverkehr ohne und mit Piktogrammen) und Bild 7-15 (Schutzstreifen) zeigen den Zusammenhang analog zu Bild 7-13 ergänzt um Kurven für eine Verkehrsstärke der Radfahrende in Richtung i ($q_{Rf, i}$) von 50 Rf/h, 100 Rf/h und 150 Rf/h für Abschnitte mit Mischverkehr ohne Piktogramme, mit Piktogrammen sowie mit Schutzstreifen. Diese Auswertung lässt generell nicht den Rückschluss zulässt, dass mit zunehmender Radverkehrsstärke auch eine höhere Kfz-Verkehrsstärke verträglich ist, da Aspekte wie bspw. der Flächenanspruch oder der Verkehrsablauf nicht betrachtet wurden. Daher folgt auch keine Interpretation der konkreten Werte. Es zeigt sich allerdings die deutliche Tendenz, dass mit zunehmender Radverkehrsstärke auch der Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn deutlich zunimmt. Dieser Effekt könnte damit erklärt werden, dass sich (analog zum Safety-in-Numbers-Effekt; vgl. Kapitel 4.1.4 und 8.5) ein Individuum als Teil einer größeren Gruppe bzw. mit zunehmender Gruppengröße auch sicherer auf der Fahrbahn fühlt und zeigt den Einfluss netzplanerischer oder infrastruktureller Maßnahmen zur Erhöhung der Attraktivität des Radverkehrs auf den Anteil der Fahrbahnnutzung.

³⁵ Unter der Annahme, dass sich die Verkehrsstärke gleichmäßig auf die Fahrstreifen aufteilt.

Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Abhängigkeit der Radverkehrs-
führungsform, Kfz-Verkehrsstärke, zulässiger Geschwindigkeit
und Radverkehrsstärke - Einstreifige Richtungsfahrbahnen mit Mischverkehr



Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Abhängigkeit der Radverkehrs-
führungsform, Kfz-Verkehrsstärke, zulässiger Geschwindigkeit
und Radverkehrsstärke - Einstreifige Richtungsfahrbahnen mit Piktogrammen

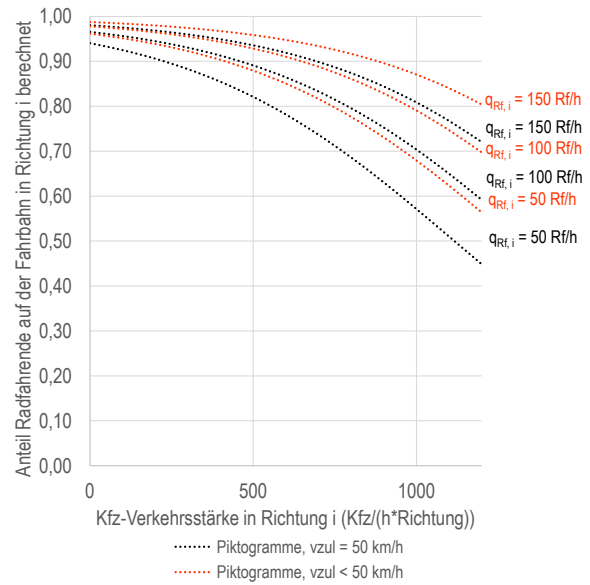


Bild 7-14 Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Abhängigkeit der Kfz-Verkehrsstärke, der zulässigen Geschwindigkeit und der Radverkehrsstärke auf einstreifigen Richtungsfahrbahnen mit Mischverkehr ohne (links) und mit Piktogrammen (rechts)

Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Abhängigkeit der Radverkehrs-
führungsform, Kfz-Verkehrsstärke, zulässiger Geschwindigkeit
und Radverkehrsstärke - Einstreifige Richtungsfahrbahnen mit Schutzstreifen

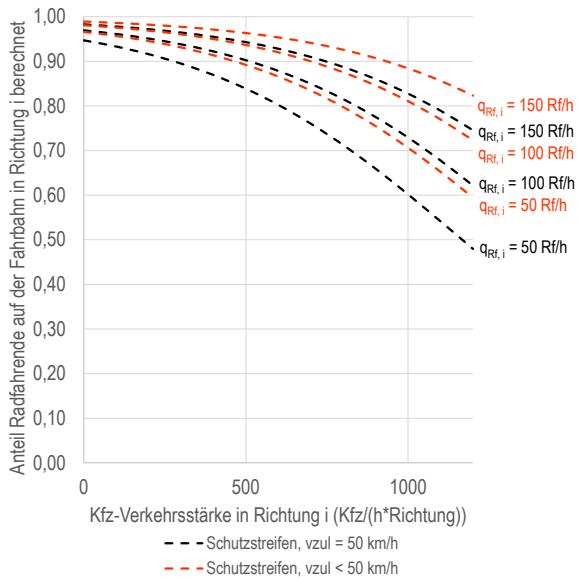


Bild 7-15 Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Abhängigkeit der Kfz-Verkehrsstärke, der zulässigen Geschwindigkeit und der Radverkehrsstärke auf einstreifigen Richtungsfahrbahnen mit Schutzstreifen

7.6 Fazit

Die Analyse der Fahrbahnnutzung durch Radfahrende ergibt zusammenfassend, dass sich der Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn signifikant ($p < 0,1$) erhöht, wenn

- die Gesamtverkehrsstärke der Radfahrenden zunimmt, was analog zum Safety-in-Numbers-Effekt (siehe Kapitel 4.1.4) auf einen Acceptance-in-Numbers-Effekt hinweisen könnte. Das heißt, je mehr Menschen Rad fahren, desto höher ist die Akzeptanz des Radverkehrs im Mischverkehr.
- die Kfz-Verkehrsstärke (auf dem rechten Fahrstreifen, sofern zwei Fahrstreifen je Richtung vorhanden sind) abnimmt.
- die Anzahl an Fahrstreifen abnimmt.
- Piktogramme oder Schutzstreifen vorhanden sind, was die bisherigen Erkenntnisse zur Akzeptanz von unterschiedlichen Radverkehrsführungsformen im Mischverkehr bestätigt (siehe Kapitel 4.2.3).
- die zulässige Geschwindigkeit < 50 km/h ist.
- die Dichte lightsignalgeregelter Anschlussknotenpunkte zunimmt.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass neben den betrachteten Merkmalen weitere nicht erhobene Merkmale einen Einfluss auf die Fahrbahnnutzung haben können. Zum Beispiel zeigt der Erkenntnisstand zur subjektiven Sicherheit und den Präferenzen (siehe Kapitel 4.3.2), dass selbstbewusste und engagierte Radfahrende das Fahren auf der Fahrbahn ggü. anderen Radverkehrsführungsformen zum Teil bevorzugen (Christmas 2010, S. 60 ff.; Damant-Sirois et al. 2014, S. 1164; Dill und McNeil 2013, S. 14 ff.; Hardinghaus und Cyganski 2019, S. 14; Rossetti et al. 2018, S. 262). Grundsätzlich kommen aber auch weitere nicht berücksichtigte Merkmale in Frage (bspw. Qualität der Fahrbahnoberfläche oder die Einstellung der Kfz-Führenden ggü. Radfahrenden).

Die zusätzlich erstellten Teilmodelle zum Anteil der Fahrbahnnutzung auf zweistreifigen Abschnitten mit Mischverkehr ohne sowie mit Schutzstreifen zeigen deutlich, dass die Einflüsse auf Abschnitten mit Schutzstreifen andere sind, als im Mischverkehr ohne Schutzstreifen. Dabei sind vor allem die Kfz-Verkehrsstärke, der Schwerverkehrsanteil sowie die nutzbare Fahrstreifenbreite hervorzuheben. Während die Kfz-Verkehrsstärke auf den Abschnitten mit Schutzstreifen einen deutlich geringeren Erklärungsgehalt aufweist, sind sowohl der Schwerverkehrsanteil als auch die Fahrstreifenbreite innerhalb der Modelle der Abschnitte mit Mischverkehr ohne Markierung nicht signifikant bzw. besitzen einen sehr geringen Erklärungsgehalt. Eine mögliche Erklärung für den geringeren Einfluss der Kfz-Verkehrsstärke könnte sein, dass mit dem Vorhandensein von Schutzstreifen eine Fläche für den Radverkehr zur Verfügung steht, die auch bei hohen Kfz-Verkehrsstärken verhältnismäßig unbeeinflusst (ohne Berücksichtigung der subjektiven Empfindungen) von Radfahrenden befahren werden kann. Der im Gegensatz dazu höhere Einfluss des SV-Anteils sowie der nutzbaren Fahrstreifenbreite könnte damit erklärt werden, dass die Überholabstände auf Abschnitten mit Schutzstreifen geringer sind als im Mischverkehr (vgl. Kapitel 4.2.4) und deshalb Schwerverkehrsfahrzeuge als unangenehmer wahrgenommen werden. Allerdings ist bei der Interpretation auch zu berücksichtigen, dass Abschnitte mit Schutzstreifen einen signifikant höheren Anteil der Fahrbahnnutzung mit deutlich geringerer Streuung ggü. der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr aufweisen. Die zusätzliche Berücksichtigung der Schutzstreifenbreite ergibt die Tendenz, dass der Anteil der Radfahrenden mit zunehmender Schutzstreifenbreite zunimmt. Allerdings erreicht die Variable das Signifikanzniveau $p < 0,1$ hinsichtlich der Signifikanz der Modelleffekte nicht.

Das Teilmodell der zweistreifigen Abschnitte mit Mischverkehr weist grundsätzlich ähnliche Tendenzen wie das Gesamtmodell auf, was darauf zurückzuführen ist, dass diese Abschnitte etwa 80 % des Gesamtkollektives repräsentieren. Die Berücksichtigung der Fahrstreifenbreite ergibt, dass der Anteil der Fahrbahnnutzung auf schmalen Querschnitten am höchsten ist, was darauf zurückgeführt werden könnte, dass weniger Überholungen im Vergleich zu den breiten Querschnitten möglich sind. Fahrstreifenbreiten von $> 3,00$ m reduzieren den Anteil der Fahrbahnnutzung. Zudem kann Schüller (2010, S. 135) zeigen, dass sich die tatsächlichen Geschwindigkeiten der Kfz mit zunehmender Fahrbahnbreite erhöhen, was zumindest mittelbar auch einen Einfluss auf Anteil der

Radfahrenden auf der Fahrbahn haben kann. Allerdings zeigt sich auch, dass die Variable zu einer sehr geringen Reduzierung der Devianz führt, so dass die Ergebnisse lediglich als Tendenzen zu bewerten sind.

Um zu ermitteln, unter welchen gestalterischen, betrieblichen und verkehrlichen Bedingungen ein möglichst hoher Wert hinsichtlich des Anteils der Fahrbahnnutzung durch Radfahrende erreicht wird, wurde das logistische Gesamtmodell in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform (Mischverkehr mit und ohne Piktogramme, Schutzstreifen), der Kfz-Verkehrsstärke (auf dem rechten Fahrstreifen), der zulässigen Geschwindigkeit sowie der Anzahl der Fahrstreifen angewendet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Grenzwerte hinsichtlich der Kfz-Verkehrsstärke für zweistreifige Abschnitte (einstreifige Richtungsfahrbahnen) mit Mischverkehr nach FGSV (2010a) einen mittleren Anteil der Fahrbahnnutzung von 85 % gewährleisten. Für zweistreifige Abschnitte mit Schutzstreifen ergeben sich unter diesen Voraussetzungen geringere Grenzwerte. Soll der Anteil der Radfahrenden allerdings (auf bspw. 90 %) erhöht werden, ergeben sich deutlich geringere Grenzwerte hinsichtlich der Kfz-Verkehrsstärke. Für vierstreifige Abschnitte (zweistreifige Richtungsfahrbahnen) ergibt das Modell analog zu den Vorgaben nach FGSV (2010a), dass die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr nicht empfehlenswert bzw. wenig akzeptiert wird. Auch das Ergebnis für Abschnitte mit Schutzstreifen führt grundsätzlich zu dem Resultat, dass auf vierstreifigen Abschnitten generell Radverkehrsanlagen vorgesehen werden sollten.

Die Modelle zur Erklärung der Einflüsse auf den Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg weisen im Vergleich zu den Modellen zum Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn einen deutlich geringeren Erklärungsgehalt auf, was zeigt, dass nicht alle Variablen im Modell vorhanden sind, die einen Einfluss besitzen. Das könnten vor allem netzplanerische Aspekte sein. Denn der Erkenntnisstand zur Akzeptanz hat gezeigt (siehe Kapitel 4.2.3), dass Straßenseiten, die Radfahrenden Umwege ersparen oder von denen wichtige bzw. stark frequentierte Netzabschnitte abzweigen, einen Einfluss auf den Anteil linksfahrender Radfahrender haben können (Alrutz 2009, S. 31). Das Modell mit den im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigten Merkmalen hat ergeben, dass der Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg abnimmt, wenn

- die Verkehrsstärke der Radfahrenden zunimmt, was die Acceptance-in-Numbers-These bestätigt: Je mehr Radfahrende sich insgesamt in Richtung i bewegen, umso geringer ist der Anteil der Radfahrenden auf linken Gehwegen.
- die Kfz-Verkehrsstärke abnimmt.
- die Anzahl der Fahrstreifen abnimmt.
- die zulässige Geschwindigkeit < 50 km/h ist.
- der Anteil der Länge des Geschäftsbesatzes an der gesamten Bebauungslänge auf der linken Straßenseite abnimmt.

Im Unterschied zur ersten deskriptiven Einordnung haben sich innerhalb der Modellierung hinsichtlich Breite markierter Sicherheitsräume bei Schutzstreifen sowie dem Vorhandensein einer baulichen Mittelrennung keine signifikanten (Signifikanz der Modelleffekte $< 0,1$) Einflüsse auf den Anteil der Fahrbahnnutzung bzw. den Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg ergeben. Zudem konnte dem Vorhandensein von Gleisen sowie dem ruhenden Verkehr (differenziert nach Art und Lage) sowohl deskriptiv als auch modellhaft kein Einfluss auf die Akzeptanz nachgewiesen werden.

Zur Beantwortung der methodischen Fragestellung, welche Modellform am besten geeignet ist, die Flächenwahl der Radfahrenden zu beschreiben, wurden die Ergebnisse der linearen und logistischen Regression gegenübergestellt. Im Resultat erzielen beide Modellformen ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Wirkung der Variablen. Die logistischen Modelle erreichen aber insgesamt eine geringfügig bessere Anpassung, wie die Gegenüberstellung der empirischen und berechneten Anteile sowie die Analyse der Residuen zeigt. Außerdem erlaubt die logistische Regression in ihrer Grundform im Gegensatz zur linearen Regression keine Anteile > 1 bzw. < 0 , was der Grundannahme des Untersuchungsgegenstandes besser entspricht.

8 ANALYSE UNFÄLLE

8.1 Unfallkollektiv

Der Analyse des Unfallgeschehens liegen insgesamt 1.736 Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) auf den insgesamt 204 Untersuchungsabschnitten (vgl. Kapitel 5.1.1) innerhalb der in Tab. 5-4 (siehe Kapitel 5.3) dokumentierten Zeiträume zugrunde. Bild 8-1 zeigt die Verteilung der Unfälle differenziert Unfalltypen (links) und Beteiligtenkonstellationen (rechts). Analog dazu zeigt Anlage 13 (Bild-A 13) die Verteilung nach Unfallkategorien. Da die Analyse des Kenntnisstandes (siehe Kapitel 4.1.3) gezeigt hat, dass zwischen Streckenabschnitten mit und ohne Schutzstreifen unfallstrukturelle Unterschiede bestehen können (u.a. Alrutz et al. 2015, S. 80; Jensen 2008, S. 10; Ohm et al. 2015, S. 49), erfolgt diese Strukturanalyse differenziert nach Strecken mit und ohne Schutzstreifen. Ziel der folgenden deskriptiven Betrachtungen ist es, geeignete Unfallkollektive für die Unfallmodellierung (siehe Kapitel 8.4) zu identifizieren.

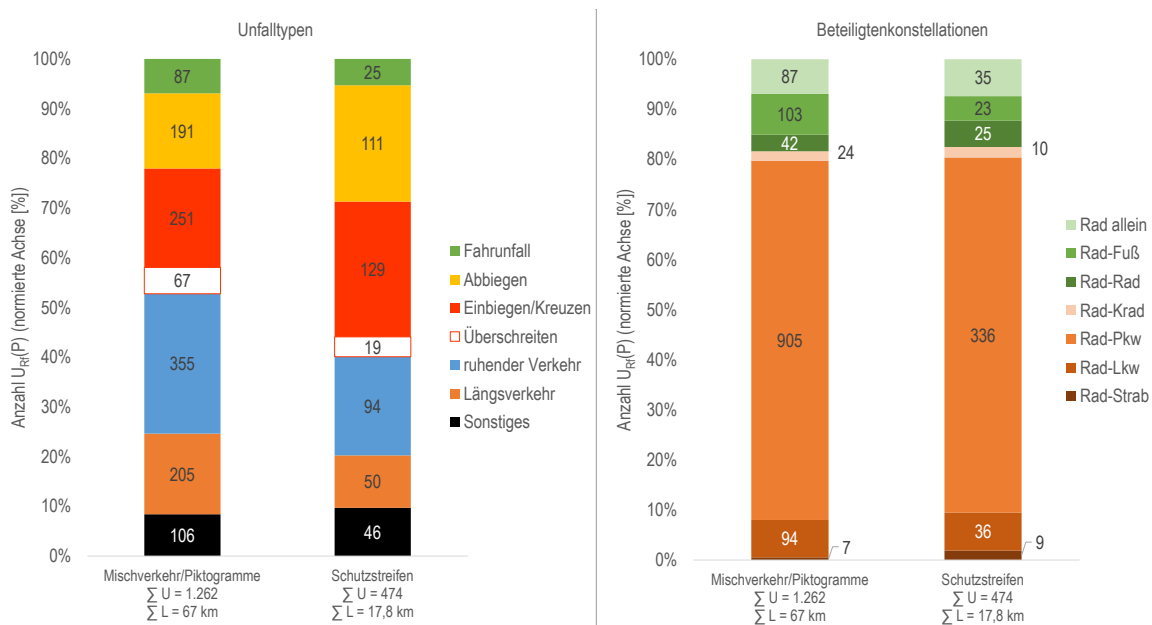


Bild 8-1 Verteilung der Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) differenziert nach Unfalltypen (links) und Beteiligtenkonstellationen (rechts)

Hinsichtlich der Unfalltypen zeigen sich deutliche strukturelle Unterschiede zwischen Abschnitten mit und ohne Schutzstreifen, wenngleich sich die Tendenzen aus der Analyse des Kenntnisstandes (siehe Kapitel 4.1.3) nur zum Teil bestätigen: Es zeigt sich, dass

- auf Abschnitten ohne Schutzstreifen (Mischverkehr mit und ohne Piktogramme) anteilig mehr Unfälle durch ruhenden Verkehr, Unfälle im Längsverkehr sowie Fahrunfälle registriert wurden während
- auf Abschnitten mit Schutzstreifen deutlich höhere Anteile von Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfällen zu verzeichnen sind.

Die anteilsmäßig relevantesten Unfalltypen über alle Abschnitte sind Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle sowie Unfälle durch ruhenden Verkehr und im Längsverkehr.

Die Analyse der Beteiligtenkonstellationen ergibt, dass etwa 72 % (Mischverkehr/ Piktogramme) bzw. 71 % (Schutzstreifen) der Unfälle zwischen Pkw und Radfahrenden sind. Unfälle zwischen Radfahrenden und Schwerverkehr machen etwa 7 % bis 8 % der $U_{Rf}(P)$ aus. Unfälle mit ausschließlich Radverkehrsbeteiligung (Alleinunfälle und Unfälle zwischen Radfahrenden) repräsentieren etwa 7 % des Kollektives beider Führungsformen. Der einzige Unterschied zwischen den Führungsformen ergibt sich hinsichtlich von Unfällen zwischen Radfahrenden und Gehenden, welche auf Abschnitten mit Mischverkehr anteilig etwa doppelt so hoch sind, im Vergleich zu Abschnitten mit Schutzstreifen (4 % ggü. 8 %).

Die Verteilung der Unfallkategorien ergibt, dass etwa 86 % (Abschnitte mit Schutzstreifen) bzw. 89 % (Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen) der $U_{Rf}(P)$ Unfälle mit Leichtverletzten ($U_{Rf}(Lv)$) sind (siehe Anlage 13, Bild-A 13). Der Anteil der Unfälle mit schwerem Personenschaden ($U_{Rf}(Gt) + U_{Rf}(Sv)$) ist auf Abschnitten mit Schutzstreifen höher.

Diese Ergebnisse – vor allem die Verteilung der Unfalltypen – sprechen grundsätzlich dafür, neben einem Gesamtmodell (siehe Kapitel 8.4.1) auch Teilmodelle differenziert nach Abschnitten ohne (siehe Kapitel 8.4.2) und mit Schutzstreifen (siehe Kapitel 8.4.3) sowie nach Unfalltypen zu erstellen (siehe Kapitel 8.4.4). Denn einerseits zeigen sich hinsichtlich der Verteilung der Unfalltypen deutliche Unterschiede zwischen Abschnitten mit und ohne Schutzstreifen und andererseits wird davon ausgegangen, dass die betrachteten Infrastrukturmerkmale je nach Unfallkonstellation auch eine unterschiedliche Wirkung haben können (vgl. Aurich et al. 2015, S. 85). Dabei erreichen die Unfalltypen Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle sowie Unfälle durch ruhenden Verkehr und im Längsverkehr anteilmäßig die höchsten Werte, so dass diese innerhalb der Modellierung vorrangig betrachtet werden. Hinsichtlich der Unfallkategorie wird nicht differenziert, d.h. es werden Radverkehrsunfälle mit Personenschaden $U_{Rf}(P)$ betrachtet, da die Anzahl der Unfälle mit schwerem Personenschaden zu gering ist.

8.2 Datengrundlage im Überblick

Wie in Kapitel 8.1 bereits erwähnt, liegen der Analyse des Unfallgeschehens insgesamt 204 Streckenabschnitte mit einer Gesamtlänge von 84,8 km zugrunde (vgl. Kapitel 5.1.1). Im Gegensatz zur Analyse der Akzeptanz wurden auch innerhalb der Unfallanalyse Abschnitte mit für den Radverkehr freigegebenen Gehwegen berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wurden hingegen 3 Abschnitte die einseitig mit Schutzstreifen und einseitig mit Piktogrammen markiert sind (vgl. Kapitel 5.1.1). Tab. 8-1 zeigt alle metrischen Variablen, deren Einfluss auf das Unfallgeschehen geprüft wird (vgl. Kapitel 5.1.3). Grundsätzlich ist anzumerken, dass im Gegensatz zur Akzeptanzanalyse keine einzelnen Straßenseiten, sondern die gesamten Querschnitte betrachtet werden, da die vorliegenden Unfalldaten eine entsprechende Zuordnung zu einzelnen Straßenseiten nicht möglich machen (vgl. Kapitel 5.3). Weiterhin wird im Gegensatz zur Akzeptanzanalyse nicht die Verkehrsstärke im Zählzeitraum, sondern der durchschnittliche tägliche Verkehr verwendet (vgl. Kapitel 5.2), da das Unfallgeschehen für vollständige Jahre gegenübergestellt wird.

Da das Kollektiv der Untersuchungsabschnitte (mit Ausnahme des genannten Querschnittsbezuges) mit dem der Akzeptanzanalyse übereinstimmt, zeigen sich auch die gleichen Tendenzen (vgl. Kapitel 7.1):

- Die Werte des DTV des Kfz-Verkehrs decken die gesamte Bandbreite der Grenzwerte der nationalen Regelwerke für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen ab (vgl. Kapitel 3.1 und Tab. 3-2).
- Alle durch das Regelwerk genannte Fahrbahnbreiten (< 6,00 m (<3,00 m), zwischen 6,00 m (3,00 m) und 7,00 m (3,50 m) sowie > 7,00 m (> 3,50 m)) sind im Kollektiv vertreten (vgl. Kapitel 3.1 und Tab. 3-3). Dabei weisen mehr als die Hälfte aller Abschnitte mit Mischverkehr ohne Schutzstreifen die „kritische“ Profilbreite auf (siehe Tab. 8-2) – der mittlere DTV_{Kfz} auf diesen Abschnitten beträgt etwa 7.600 Kfz/24 h und liegt damit über den Empfehlungen nach FGSV (2010a, S. 22) (siehe Kapitel 3.1, Tab. 3-1).
- Die vorgegebene nutzbare Mindestfahrstreifenbreite auf Abschnitten mit Schutzstreifen von 4,50 m (2,25 m) wird nicht unterschritten (vgl. Kapitel 3.1 und Tab. 3-3).
- Es sind im Kollektiv Schutzstreifen mit Mindestbreite (1,25 m), Regelbreite (1,50) aber auch mit Breiten > 1,50 m vertreten.
- Markierte Sicherheitsräume zum ruhenden Verkehr sind nicht vorhanden, untermaßig (< 0,50 m) oder mit 0,75 m im Kollektiv vertreten (vgl. Kapitel 3.1 und Tab. 3-3).

Alle weiteren metrischen Variablen sind aufgrund fehlender Vergleichbarkeit bspw. zu Vorgaben in Regelwerken nur schwer interpretierbar. Hinsichtlich des DTV der Radfahrenden (und auch der Gehenden) zeigt sich aber, dass sowohl kaum genutzte als auch sehr stark belastete Abschnitte im Kollektiv vertreten sind.

Tab. 8-1 Überblick metrische Variablen und deren Verteilung – Unfallmodelle

Merkmal	Codierung	Einheit	Min	Q 15	Mittel	Q 85	Max
Länge	L	km	0,150	0,232	0,464	0,698	1,560
DTV Radfahrende auf der Fahrbahn (Querschnitt)	DTV _{Rf, Fb, QS}	Rf/24 h	7	94	608	1.154	5.436
DTV Radfahrende auf dem Gehweg (Querschnitt)	DTV _{Rf, Gw, QS}	Rf/24 h	0	23	116	194	1.275
DTV linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg (Querschnitt)	DTV _{Rf, Gw, li, QS}	Rf/24 h	0	8	48	75	716
DTV Radfahrende Gesamt (Querschnitt)	DTV _{Rf, Ges, QS}	Rf/24 h	41	148	724	1.275	6.494
DTV Kfz (Querschnitt)	DTV _{Kfz, QS}	Kfz/24 h	146	4.771	10.088	15.307	27.769
DTV SV (Querschnitt)	DTV _{SV, QS}	Kfz/24 h	9	124	379	604	4.360
SV-Anteil (Querschnitt)	SV _{Anteil}	%	0%	1%	4%	6%	76%
DTV Gehende (Querschnitt) ³⁶	DTV _{Fg, QS}	Fg/24 h	4	120	1.741	2.383	20.793
Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn (Querschnitt)	A _{Fb, QS}	%	10%	63%	80%	95%	100%
Anteil linksfahrende Radfahrende auf dem Gehweg (Querschnitt)	A _{Gw, li, QS}	%	0%	2%	9%	14%	55%
nutzbare Fahrstreifenbreite Mischverkehr und Piktogramme	B _{FS (MV, Pikto)}	m	2,50	3,00	3,36	3,75	4,125
nutzbare Fahrstreifenbreite Schutzstreifen	B _{FS (SSF)}	m	2,25	2,44	3,08	3,70	4,75
Breite Schutzstreifen	B _{SSF}	m	1,25	1,25	1,56	1,82	2,00
Breite Sicherheitsraum ruhender Verkehr Schutzstreifen	B _{RVFSich (SSF)}	m	0,00	0,00	0,33	0,52	0,75
Breite Sicherheitsraum ruhender Verkehr Piktogramme	B _{RVFSich (Pikto)}	m	0,00	0,50	0,63	0,78	1,00
Breite Gehweg (Mittelwert beider Straßenseiten)	B _{GW}	m	0,00	2,00	2,64	3,45	4,90
Anteil Länge ruhender Verkehr (Mittelwert beider Straßenseiten)	AL _V	%	0%	0%	49%	83%	100%
Anteil Länge Geschäftsbesatz (Mittelwert beider Straßenseiten)	AL _G	%	0%	3%	25%	58%	98%
Umfeldfaktor (Mittelwert beider Straßenseiten)	UF	-	0,42	1,02	1,53	2,06	2,92
Anzahl Bus-Haltestellen	N _{BushST}	HST/km	0,00	0,00	1,69	3,88	7,58
Anzahl Strab-Haltestellen	N _{StrabhST}	HST/km	0,00	0,00	0,36	0,00	6,58
Anzahl Mittelinseln (Querungsanlage)	N _{FBT}	QA/km	0,00	0,00	0,33	0,00	5,78
Anzahl LSA (Querungsanlage)	N _{FLSA}	QA/km	0,00	0,00	0,49	1,48	5,62
Anzahl FGÜ (Querungsanlage)	N _{FGÜ}	QA/km	0,00	0,00	0,38	0,00	7,09
Anzahl Grundstückszufahrten Wohnen	N _{Zf, W}	Zf/km	0,00	2,30	19,17	38,67	107,76
Anzahl Grundstückszufahrten Geschäftlich	N _{Zf, G}	Zf/km	0,00	0,00	3,58	7,53	39,22
Anzahl Anschlussknotenpunkte Lichtsignalanlage	N _{AKP, LSA}	AKP/km	0,00	0,00	0,68	2,24	8,26
Anzahl Anschlussknotenpunkte Vorfahrtzeichen	N _{AKP, VZ}	AKP/km	0,00	2,16	5,96	10,13	17,54
Anzahl Knotenpunktarme	N _{KPA}	KPA/km	0,00	3,46	8,40	13,25	22,81

³⁶ Liegt nicht für alle Untersuchungsabschnitte vor (vgl. Kapitel 5.2.1; Tab. 5-3).

Für eine erste deskriptive Einordnung des Unfallgeschehens vor dem Hintergrund der kategorialen Attribute, die innerhalb der Unfallmodellierung berücksichtigt werden, zeigt Tab. 8-2 die entsprechenden Merkmale, deren Verteilung im Kollektiv sowie die Verteilung der Unfallraten der Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($UR_{Rf}(P)$). Wie bei den Akzeptanzmodellen wurde die Fahrstreifen-, Schutzstreifen- und Sicherheitsraumbreite neben der metrischen Form auch in Anlehnung an das Regelwerk (vgl. vgl. Kapitel 3.1 und Tab. 3-3) kategorisiert berücksichtigt. Zum Einfluss der Merkmale auf die $UR_{Rf}(P)$ lassen sich die folgenden gröberen Tendenzen (Interpretation der Mittelwerte) ableiten (Art der Anordnung und Lage des ruhenden Verkehrs sowie Zusatzzeichen Gehweg „Radverkehr frei“ werden aufgrund sehr geringer Zahlen innerhalb einzelner Kategorien nicht interpretiert):

- höhere $UR_{Rf}(P)$ bei vierstreifigen als bei zweistreifigen Querschnitten (N_{FS})
- höhere $UR_{Rf}(P)$ auf Abschnitten mit beidseitig Schutzstreifen im Vergleich zum Mischverkehr ohne Schutzstreifen (RVF)
- höhere $UR_{Rf}(P)$ bei zunehmenden Profilbreiten ($B_{FS, KLS (MV, Piktto)} / B_{FS, KLS (SSF)}$)
- niedrigere $UR_{Rf}(P)$ bei einer Breite der Schutzstreifen $> 1,50$ m im Vergleich zu $1,50$ m ($B_{SSF, KLS}$)
- höhere $UR_{Rf}(P)$ mit zunehmender Breite markierter Sicherheitsräume bei Schutzstreifen ($B_{RVFSich, KLS (SSF)}$)
- höhere $UR_{Rf}(P)$ bei beidseitig ruhendem Verkehr im Vergleich zu keinem ruhendem Verkehr (rV)
- niedrigere $UR_{Rf}(P)$ mit abnehmender zulässiger Geschwindigkeit (ausgenommen 30 km/h, 22-6 Uhr) (v_{zul})
- höhere $UR_{Rf}(P)$ bei markierter oder baulicher Mitteltrennung (MT)
- höhere $UR_{Rf}(P)$ bei Vorhandensein von Gleisen im Mischverkehr (Gleise)

Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass mit zunehmender Breite markierter Sicherheitsräume bei Schutzstreifen ($B_{RVFSich, KLS (SSF)}$) auch die $UR_{Rf}(P)$ zunehmen. Dies erscheint zunächst nicht plausibel, da davon ausgegangen werden kann, dass breite Sicherheitsräume auch die Anzahl der Unfälle durch ruhenden Verkehr (insbesondere Doring-Unfälle) reduzieren können. Dabei zeigt sich allerdings, dass die Gruppe mit einem Sicherheitsraum zum ruhenden Verkehr $> 0,5$ m lediglich durch 4 Untersuchungsabschnitte repräsentiert wird. Darüber hinaus ist es nicht auszuschließen, dass auch (breitere) Sicherheitsräume markiert wurden, weil das Unfallgeschehen auffällig war. Wie in Kapitel 5.3 bereits erläutert wurde, stellt der angestrebte Betrachtungszeitraum des Unfallgeschehens von 5 Jahren einen Kompromiss zwischen einer hohen Stabilität des Mittelwertes und der Minimierung verkehrlicher oder baulicher Veränderungen innerhalb des Zeitraumes dar – ganz auszuschließen sind angesprochenen Veränderungen allerdings nicht. Keine erkennbaren Unterschiede sind hinsichtlich der Gruppierung der Untersuchungsstädte nach SrV abzuleiten (ZST_SrV).

Tab. 8-2 Überblick kategoriale (ordinale) Variablen und deren Verteilung – Unfallmodelle

Merkmal	Codierung	Einheit	Ausprägung	Anzahl	Anteil	Länge [km]	Anteil	$UR_{Rf}(P) [U_{Rf}(P)/(10^6 Rf^* km)]$				
								Min	Q 15	Mittel	Q 85	Max
Anzahl Fahrstreifen	N_{FS}	-	2	166	81%	69,85	82%	0,00	0,00	12,16	23,51	68,29
			3	3	1%	0,83	1%	4,48	4,69	13,37	22,86	30,43
			4	35	17%	14,15	17%	0,00	0,00	14,00	25,67	33,21
Radverkehrsführungsform	RVF	-	0 Mischverkehr	160	78%	65,26	77%	0,00	0,00	12,25	24,10	68,29
			1 Piktogramme	5	2%	1,74	2%	0,00	1,64	9,46	19,57	21,10
			2 SSF einseitig	5	2%	2,15	3%	0,00	0,00	10,07	23,75	24,48
			3 SSF beidseitig	34	17%	15,69	18%	0,00	2,78	14,46	22,58	47,37
nutzbare Fahrstreifenbreite Mischverkehr und Piktogramme	$B_{FS, KLS (MV, Piktto)}$	m	1 $< 3,00$ m	6	3%	1,42	2%	0,00	0,00	8,14	15,78	20,59
			2 $3,00$ bis $3,50$ m	114	56%	43,86	52%	0,00	0,00	11,57	23,74	68,29
			3 $> 3,50$ m	45	22%	21,72	26%	0,00	3,65	14,19	25,27	37,82
nutzbare Fahrstreifenbreite Schutzstreifen	$B_{FS, KLS (SSF)}$		1 $2,25$ bis $2,75$	16	8%	8,26	10%	0,00	0,00	11,88	24,17	36,09
			2 $> 2,75$ m	23	11%	9,58	11%	0,00	6,22	15,31	21,15	47,37
Breite Schutzstreifen	$B_{SSF, KLS}$	m	1 $< 1,50$ m	12	6%	4,87	6%	0,00	0,00	10,72	22,64	33,21
			2 $1,50$ m	9	4%	5,51	6%	2,31	3,48	20,88	44,74	47,37
			3 $> 1,50$ m	18	9%	7,45	9%	0,00	5,86	12,53	20,50	24,64

Merkmal	Codierung	Einheit	Ausprägung	Anzahl	Anteil	Länge [km]	Anteil	UR _R (P) [UR _R (P)/(10 ⁶ Rf*km)]				
								Min	Q 15	Mittel	Q 85	Max
Breite Sicherheitsraum ruhender Verkehr Schutzstreifen	B _{RVFSich} , KLS (SSF)	m	1 < 0,5 m	10	5%	5,26	6%	0,00	3,22	14,94	24,05	33,21
			2 0,5 m	12	6%	5,27	6%	6,04	6,86	15,08	19,39	46,90
			3 > 0,5 m	4	2%	1,51	2%	6,31	11,03	23,78	37,14	47,37
Breite Sicherheitsraum ruhender Verkehr Piktogramme	B _{RVFSich} , KLS (Pikto)		1 0,5 m	3	1%	1,25	1%	2,73	3,39	9,58	16,24	21,10
			2 > 0,5 m	1	0%	0,18	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ruhender Verkehr	rV	-	0 kein rV	42	21%	16,40	19%	0,00	0,00	10,18	20,28	68,29
			1 einseitig rV	28	14%	11,09	13%	0,00	0,00	10,17	19,94	33,23
			2 einseitig alternierend rV	1	0%	0,69	1%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			3 zweiseitig rV	133	65%	56,64	67%	0,00	1,26	13,81	25,19	47,37
Art der Anordnung des ruhenden Verkehrs	rV-Art	-	0 kein rV	42	21%	16,40	19%	0,00	0,00	10,18	20,28	68,29
			1 Längs einseitig	26	13%	9,42	11%	0,00	0,00	10,88	20,91	33,23
			2 Schräg einseitig	1	0%	0,15	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			3 Senkrecht einseitig	1	0%	1,53	2%	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91
			4 Längs beidseitig	112	55%	48,25	57%	0,00	0,00	13,67	25,96	46,90
			5 Schräg beidseitig	3	1%	1,09	1%	5,11	5,86	9,83	14,04	16,79
			6 Senkrecht beidseitig	4	2%	1,39	2%	8,34	11,82	24,11	37,14	47,37
			7 gemischt beidseitig	15	7%	6,60	8%	0,00	3,79	12,00	19,80	29,13
Lage des ruhenden Verkehrs	Lage _{rV}	-	0 kein	42	21%	16,40	19%	0,00	0,00	10,18	20,28	68,29
			1 Fahrbahn einseitig	12	6%	4,42	5%	0,00	9,74	15,64	21,10	33,23
			2 Fahrbahn markiert einseitig	2	1%	0,41	0%	6,04	6,38	7,19	7,99	8,33
			3 Fahrbahn baulich einseitig	4	2%	0,87	1%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			4 Seitenraum einseitig	8	4%	4,67	5%	0,00	0,00	9,59	23,54	24,48
			5 Fahrbahn/Seitenraum eins.	2	1%	0,72	1%	0,00	0,91	3,04	5,17	6,09
			6 Fahrbahn beidseitig	37	18%	15,82	19%	0,00	4,69	14,08	22,86	37,82
			7 Fahrbahn markiert beidseitig	20	10%	8,30	10%	0,00	4,80	16,25	29,00	46,90
			8 Fahrbahn baulich beidseitig	32	16%	11,29	13%	0,00	5,55	14,28	24,29	47,37
			9 Seitenraum beidseitig	25	12%	11,27	13%	0,00	0,00	8,25	16,79	33,21
			10 Fahrbahn/Seitenraum beids.	6	3%	3,11	4%	2,73	4,37	14,97	24,85	36,11
			11 gemischt beidseitig	14	7%	7,54	9%	0,00	0,00	17,01	26,69	45,53
zulässige Geschwindigkeit	V _{zul}	km/h	0 50 km/h	160	78%	67,52	80%	0,00	0,00	13,17	24,49	68,29
			1 40 km/h	4	2%	1,30	2%	0,00	0,00	1,66	3,64	6,63
			2 30 km/h, 22-6 Uhr	7	3%	3,63	4%	0,00	2,71	18,73	28,46	47,37
			3 30 km/h, 6-18 Uhr	2	1%	0,58	1%	0,00	0,85	2,82	4,80	5,65
			4 30 km/h	31	15%	11,81	14%	0,00	0,00	9,65	18,66	36,11
Verkehrszeichen Gehweg "Radverkehr frei"	VZ _{GW}	-	0 Gehweg nicht freigegeben	200	98%	82,74	98%	0,00	0,00	12,40	23,88	68,29
			1 Gehweg eins. freigegeben	1	0%	0,37	0%	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59
			2 Gehweg beids. freigegeben	3	1%	1,72	2%	18,55	19,97	22,10	24,11	24,48
Mitteltrennung	MT	-	0 keine	75	37%	31,19	37%	0,00	0,00	9,80	19,31	37,79
			1 markiert	98	48%	41,52	49%	0,00	0,00	14,05	26,78	68,29
			2 baulich	31	15%	12,12	14%	0,00	0,00	14,08	25,40	33,21
Gleise im Mischverkehr	Gleise	-	0 nein	181	89%	76,36	90%	0,00	0,00	11,59	23,64	47,37
			1 ja	23	11%	8,47	10%	0,00	7,87	19,65	33,93	68,29
Gruppierung SrV Untersuchungsstadt (vgl. Kapitel 5.2.2 und Anlage 5)	ZST_SrV	-	1 Oberz., ≥ 500.000 EW, flach	138	68%	55,11	65%	0,00	3,51	13,99	26,02	47,37
			2 Oberz., < 500.000 EW, flach	24	12%	12,56	15%	0,00	2,09	14,39	23,17	68,29
			3 Oberz., < 500.000 EW, hügel.	24	12%	10,25	12%	0,00	0,00	4,86	11,27	36,11
			4 Mittelzentren, flach	1	0%	0,22	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			5 Mittelzentren, hügelig	17	8%	6,68	8%	0,00	0,00	9,18	20,41	24,48
Gesamt				204	100%	84,83	100%	0,00	0,00	12,50	23,98	68,29

8.3 Innere Abhängigkeiten

Tab. 8-3 zeigt die Korrelationsmatrix der unabhängigen Variablen für die Erstellung der Unfallmodelle. Wie im Bereich der Akzeptanzanalyse (vgl. Kapitel 7.2) sind jeweils starke (rosa) und mittlere (gelb) Zusammenhänge gekennzeichnet, wobei die Einordnung der Intensität des Zusammenhanges nach Cohen (1992, S. 157) erfolgt (vgl. Kapitel 6.1). Da das Kollektiv der Untersuchungsabschnitte mit dem der Akzeptanzanalyse übereinstimmt (der Unterschied besteht lediglich darin, dass sich die Unfallmodelle auf gesamte Querschnitte bezieht (vgl. Kapitel 8.2)), zeigen sich für die Variablen, die in beiden Analysen berücksichtigt wurden, auch nahezu die gleichen Tendenzen (vgl. Kapitel 7.1):

So korrelieren vor allem Merkmale stark miteinander, die denselben Sachverhalt beschreiben, wie die

- Verkehrsstärke ($DTV_{Rf, Ges, QS}$ ggü. $DTV_{Rf, Fb, QS}$, $DTV_{Rf, Gw, QS}$ und $DTV_{Rf, Gw, li, QS}$; $DTV_{Rf, Fb, QS}$ ggü. $A_{Fb, QS}$; $DTV_{Rf, Gw, li, QS}$ ggü. $A_{Gw, li, QS}$; $A_{Fb, QS}$ ggü. $A_{Gw, li, QS}$; $DTV_{Kfz, QS}$ ggü. $DTV_{SV, QS}$ und SV_{Anteil} ; SV_{Anteil} ggü. $DTV_{SV, QS}$),
- metrischen Fahrstreifenbreiten mit den entsprechenden klassierten Variablen (B_{FS} ggü. $B_{FS, KLS (MV, Piktto)}$ und $B_{FS, KLS (SSF)}$),
- metrischen Schutzstreifenbreiten mit den entsprechenden klassierten Variablen (B_{SSF} ggü. $B_{FS, KLS (SSF)}$)
- Radverkehrsführungsform mit der Breite der Schutzstreifen und der Breite der markierten Sicherheitsräume zum ruhenden Verkehr (und RVF ggü. B_{SSF} und $B_{RVFSich}$), was darauf zurückzuführen ist, dass beim Mischverkehr ohne Piktogramme oder Schutzstreifen die genannten Variablen den Wert Null annehmen,
- Merkmale zum ruhenden Verkehr (rV ggü. $Lage_{rV}$, rV -Art und AL_{rV}), was darauf zurückzuführen ist, dass „kein ruhender Verkehr“ innerhalb der genannten Variablen durch den Wert Null repräsentiert wird sowie
- Merkmale zur Umfeldnutzung (UF ggü. AL_G).

Eine gemeinsame Berücksichtigung dieser Variablen innerhalb eines Modells erscheint auch vor kausalem Hintergrund nicht sinnvoll. Weitere starke aber auch plausible Korrelationen ergeben sich, wie auch schon im Bereich der Akzeptanzanalyse hinsichtlich (vgl. Kapitel 7.2)

- der Anzahl der Fahrstreifen (N_{FS}) ggü. der Kfz-Verkehrsstärke ($DTV_{Kfz, QS}$), des SV-Anteils (SV_{Anteil}) sowie dem Merkmal Mitteltrennung (MT),
- der Schutzstreifenbreite (B_{SSF}), der Breite der markierten Sicherheitsräume zum ruhenden Verkehr ($B_{RVFSich}$) und der klassierten nutzbaren Fahrstreifenbreite ($B_{FS, KLS (SSF)}$),
- der Fußverkehrsstärke ($DTV_{Fg, QS}$) und der Radverkehrsstärke ($DTV_{Rf, Ges, QS}$, $DTV_{Rf, Fb, QS}$),
- Merkmalen der Umfeldnutzung (UF , AL_G) und der Fußverkehrsstärke ($DTV_{Fg, QS}$) sowie
- der Anzahl der Straßenbahnhaltstellen ($N_{StrabHST}$) und dem Vorhandensein von Gleisen (Gleise).

Auch diese Variablen werden nicht gemeinsam in einem Modell berücksichtigt. Ausnahmen stellen die Fuß- ($DTV_{Fg, QS}$) und Radverkehrsstärke ($DTV_{Rf, Ges, QS}$, $DTV_{Rf, Fb, QS}$) dar. Beide Variablen repräsentieren die Exposition der Unfälle zwischen Radfahrenden und Gehenden. Ohne eine dieser Verkehrsarten können diese Unfälle nicht entstehen.

Weniger gut bzw. lediglich auf Vermutungen gestützt erklärbar, sind die starken Korrelationen zwischen

- ruhendem Verkehr (rV) und der klassierten nutzbaren Fahrstreifenbreite ($B_{FS, KLS (SSF)}$), weil der Zusammenhang positiv ist (d.h. ist ruhender Verkehr vorhanden, steigt auch die nutzbare Fahrstreifenbreite) sowie
- der Umfeldnutzung (UF) und der klassierten nutzbaren Fahrstreifenbreite ($B_{FS, KLS (SSF)}$).

Wie auch im Bereich der Akzeptanzmodelle werden hinsichtlich von Variablen, zwischen denen mittlere Zusammenhänge bestehen, zunächst keine Einschränkungen getroffen. Bei der schrittweisen Aufnahme der Variablen in die Modelle wird aber der Einfluss auf bereits geschätzte Koeffizienten geprüft (vgl. Kapitel 7.2).

8.4 Modelle

8.4.1 Gesamtmodell

Tab. 8-4 zeigt das Gesamtmodell der Radverkehrsunfälle mit Personenschaden auf allen Untersuchungsabschnitten. Der Betrachtungszeitraum und die Länge der Untersuchungsabschnitte wurden in diesem und in den folgenden Modellen als Offset-Variable im Modell berücksichtigt, so dass das Modell $U_{Rf}(P)/(km*a)$ prognostiziert (vgl. Kapitel 6.3.2). Von den Expositionsgrößen wurde lediglich die Radverkehrsstärke logarithmiert in das Modell (gilt für dieses und die folgenden Modelle) aufgenommen, da in Kapitel 8.1, Bild 8-1 gezeigt wurde, dass zwar bei der deutlichen Mehrheit der Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) Kfz beteiligt waren, aber nicht bei allen. Bei einer logarithmierten Berücksichtigung der Kfz-Verkehrsstärke, würde das Modell bei einer Kfz-Verkehrsstärke = 0 auch 0 $U_{Rf}(P)$ prognostizieren, was nicht der Realität entspricht. Grundsätzlich wird durch das Modell 88 % der systematischen Varianz erklärt.

Tab. 8-4 Gesamtmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), alle Abschnitte

$U_{Rf}(P) / (km*a)$		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante		-	-6,599 ****	0,417	****
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)		Rf/24 h	0,893 ****	0,064	****
A _{Fb, QS}	Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn im Querschnitt		%	0,015 ***	0,004	***
DTV _{Kfz, QS}	DTV Kfz Querschnitt		Kfz/24 h	3,990E-05 ****	9,9E-06	***
Gleise	Gleise im Mischverkehr		nein	Ref.		**
			ja	0,470 **	0,154	
V _{zul}	zulässige Geschwindigkeit		50 km/h	Ref.		*
			< 50 km/h	-0,358 *	0,150	
N _{KPA}	Anzahl Knotenpunktarme		KPA/km	0,025 *	0,011	*

n_{Stellen} = 204
n_{Unfälle} = 1.736
Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 20,61
Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 3,27
erklärte Varianz = 88 %
AIC = 1252,07

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

Im Einzelnen zeigt sich, dass

- die Radverkehrsstärke ($\ln_DTV_{Rf, Ges, QS}$) mit einem Regressionskoeffizienten von 0,893 einen positiv degressiven Einfluss auf die $U_{Rf}(P)$ hat. Das heißt der Safety-in-Numbers-Effekt (vgl. Kapitel 4.1.4) kann grundsätzlich bestätigt werden – mit steigender Radverkehrsstärke steigt die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ unterproportional.
- sich mit zunehmenden Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($A_{Fb, QS}$) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ erhöht (bei einem mittleren $A_{Fb, QS} = 80\%$ beträgt der Faktor 3,4; vgl. Tab. 8-1). Dies bildet den Zusammenhang ab, dass die Mehrzahl der Unfälle mit auf der Fahrbahn fahrenden Radfahrenden registriert werden (vgl. Schüller et al. 2020b, S. 65 ff.).
- sich mit zunehmender Kfz-Verkehrsstärke ($DTV_{Kfz, QS}$) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ je Kfz/24h erhöht (bei einem mittleren $DTV_{Kfz, QS} = 10.088$ Kfz/24h beträgt der Faktor 1,5; vgl. Tab. 8-1).
- das Vorhandensein von Gleisen im Mischverkehr (Gleise) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ um den Faktor 1,6 erhöht, was auf einen Zusammenhang hindeutet, der vor allem Unfälle des Unfalltyps 1 (Fahrnfälle) beeinflussen könnte (vgl. Schüller et al. 2020b, S. 65).

- eine zulässige Geschwindigkeit (v_{zul}) von < 50 km/h die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ um den Faktor 0,7 verringert.
- die Anzahl der Knotenpunktarme (N_{KPA}) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ erhöht (um den Faktor 1,2 bei einer mittleren $N_{KPA} = 8,4$ KPA/km; vgl. Tab. 8-1), was auf einen Zusammenhang hindeutet, der vor allem Unfälle des Unfalltyps 3 (Einbiegen/Kreuzen-Unfälle) beeinflussen könnte (vgl. Schüller et al. 2020b, S. 66).

Im Vergleich zur ersten deskriptiven Einordnung (vgl. Kapitel 8.2) lässt sich der Fahrstreifenanzahl (N_{FS}), der Radverkehrsführungsform (RVF), der Fahr- (B_{FS}) und Schutzstreifenbreite (B_{SSF}), dem ruhenden Verkehr (rV) sowie der Mitteltrennung (MT) kein signifikanter Einfluss (Signifikanz der Modelleffekte $< 0,1$; vgl. Kapitel 6.3.2) im Gesamtmodell nachweisen. Hinsichtlich der Fahrstreifenanzahl (N_{FS}) ist allerdings zu berücksichtigen, dass diese mit dem $DTV_{Kfz, QS}$ stark korreliert, so dass der Einfluss im Modell mittelbar abgebildet ist. Bei einer kombinierten Berücksichtigung der Fahrstreifenanzahl mit dem $DTV_{Kfz, QS, FS1}$ (Kfz-Verkehrsstärke auf dem rechten Fahrstreifen), wie dies auch bei den Akzeptanz-Modellen zur Anwendung kam (vgl. Kapitel 7.3 und 7.5), ist die Fahrstreifenanzahl einerseits nicht signifikant (Signifikanz der Modelleffekte $< 0,1$) und andererseits verschlechtert sich der Erklärungsgehalt des Modells.

Die Betrachtung des Erklärungsgehaltes der einzelnen Variablen ergibt (siehe Bild 8-2), dass allein durch die Radverkehrsstärke ($\ln_DTV_{Rf, Ges, QS}$) 95 % der Varianz (ohne nicht erklärten Anteil) erklärt werden – mit Berücksichtigung des unerklärten Anteils beträgt dieser Wert 84 %. Darüber hinaus werden durch das Vorhandensein von Gleisen im Mischverkehr (Gleise) 2,5 %, den Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($A_{Fb, QS}$) 1,9 %, die zulässige Geschwindigkeit (v_{zul}) 0,5 %, die Kfz-Verkehrsstärke ($DTV_{Kfz, QS}$) 0,3 % und die Anzahl der Knotenpunktarme (N_{KPA}) 0,1 % der Varianz erklärt.

Anteil Erklärung Pearson-Chi-Quadrat / df, Modell $U_{Rf}(P)$, alle Abschnitte (ohne nicht erklärten Anteil)

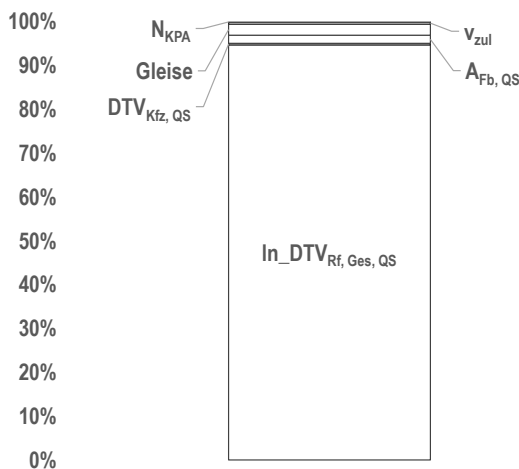


Bild 8-2 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat/ df) der Variablen – Gesamtmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), alle Abschnitte

Die Gegenüberstellung der mit dem Modell berechneten und den empirischen $U_{Rf}(P)$ (siehe Bild 8-3, links) ergibt, dass die Punkte relativ gleichmäßig um die Gerade streuen, das heißt, es liegt sowohl Über- als auch Unterschätzung der Empirie vor. Mit zunehmender Anzahl der empirischen Unfallanzahl nimmt auch die Streuung zu (und die Anzahl der Untersuchungsabschnitte deutlich ab). Die Quadratwurzel des durchschnittlichen Prognosefehlers (RMSE) der Rohresiduen (kein Bezug auf Länge und Betrachtungszeitraum) beträgt $3,2 U_{Rf}(P)$ bei einem Mittelwert von $8,4 U_{Rf}(P)$ je Abschnitt.

Eine genauere Einschätzung der Abweichungen in Abhängigkeit der Radverkehrsstärke wird durch die Darstellung der kumulierten Rohresiduen über der Radverkehrsstärke (siehe Bild 8-3, rechts) möglich. Ist ein Modell über den gesamten Wertebereich gut angepasst, oszilliert die kumulative Kurve zufällig um 0 und endet in der Nähe von 0. Unter der Berücksichtigung, dass 85 % der Untersuchungsabschnitte eine Radverkehrsstärke von ≤ 1.275 Rf/24 h

aufweisen (siehe Kapitel 8.2; Tab. 8-1), zeigt sich grundsätzlich, dass die kumulierten Residuen zufällig oszillieren, wobei

- die Unfallzahl in einem Bereich bis 500 Rf/24 h durch das Modell unterschätzt wird (es wurden mehr Unfälle registriert, als das Modell prognostiziert).
- die Unfallzahl in einem Bereich zwischen 500 Rf/24 h und 1.000 Rf/24 h durch das Modell überschätzt wird.
- die kumulative Kurve nicht bei 0 endet, was vor allem auf einen Untersuchungsabschnitt (mit Schutzstreifen) zurückzuführen ist, der mit Abstand die höchste Radverkehrsstärke aufweist (6.494 Rf/24 h, vgl. Tab. 8-1), was bedeutet, dass das Modell in diesem Wertebereich keine gute Anpassung erreicht.

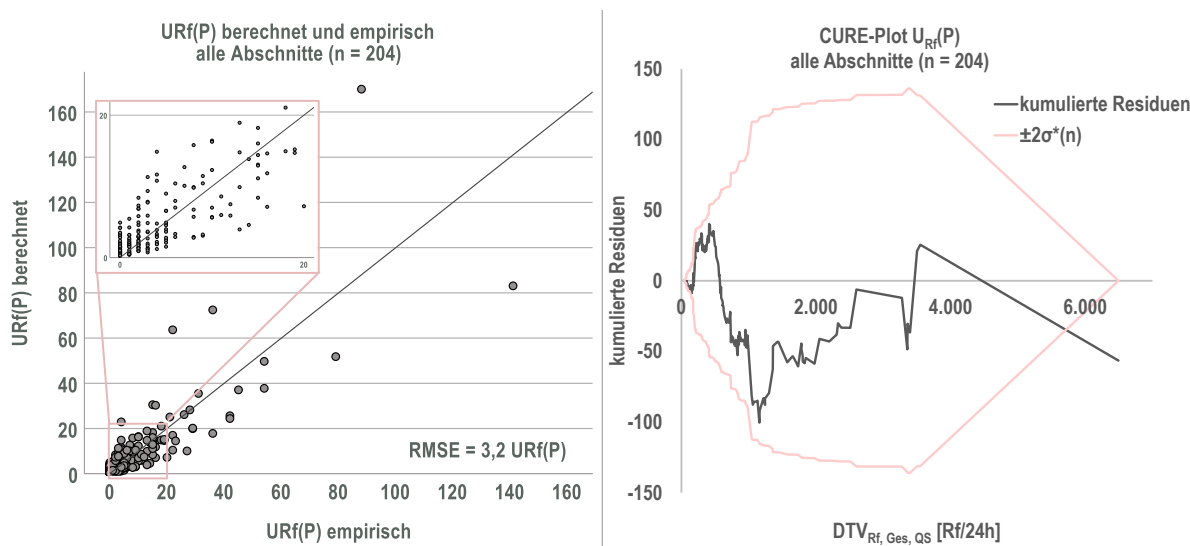


Bild 8-3 Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (links) und CURE-Plot (rechts) – Gesamtmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), alle Abschnitte

Die Analyse der einflussreichen Fälle ergibt insgesamt 8 Abschnitte mit auffälligen Cook-Distanzen (starker Einfluss auf die Ermittlung der Regressionskoeffizienten) und 7 Abschnitten mit auffälligen Hebelwerten (starker Einfluss auf den Erwartungswert). Hinsichtlich der Cook-Distanz zeigt sich, dass es sich ausschließlich um zweistreifige Abschnitte im inneren Bereich der Städte (intensive Randnutzung) handelt – 4 mit Mischverkehr (ohne Piktogramme) und 4 mit Schutzstreifen. Diese Abschnitte weisen

- eine überdurchschnittliche Unfallanzahl (im Mittel 21 $U_{Rf}(P)$ ggü. Mittelwert über alle Abschnitte = 8,4 $U_{Rf}(P)$),
- einen überdurchschnittlichen $DTV_{Rf, Ges, QS}$ (im Mittel 1.075 Rf/24 h ggü. Mittelwert über alle Abschnitte = 724 Rf/24 h) sowie
- einen unterdurchschnittlichen $DTV_{Kfz, QS}$ (im Mittel 8.340 Kfz/24 h ggü. Mittelwert über alle Abschnitte 10.088 Kfz/24 h)

auf. Hinsichtlich der Hebelwerte weisen mit einer Ausnahme alle Abschnitte Mischverkehr ohne Markierungen auf. Zudem ergibt sich die folgende Systematik:

- Alle Abschnitte weisen ein überdurchschnittliches Unfallgeschehen (im Mittel 15 $U_{Rf}(P)$ ggü. Mittelwert über alle Abschnitte = 8,4 $U_{Rf}(P)$) auf.
- 3 der 7 Abschnitte weisen mehr als 2 Fahrstreifen mit einem entsprechend hohen $DTV_{Kfz, QS} > 20.000$ Kfz/24 h auf.
- 3 der 7 Abschnitte weisen eine $v_{zul} = 30$ km/h auf, wobei im Umfeld von 2 dieser 3 Abschnitte keine Gründe für Anordnung nach § 45. Abs. 9, Punkt 6 StVO vorliegen (vgl. Kapitel 5.1.3), was darauf schließen lassen könnte, dass die Geschwindigkeitsbegrenzung aufgrund einer Gefahrenlage angeordnet wurde (vgl. Kapitel 2).

8.4.2 Teilmodell Mischverkehr / Piktogramme

In Kapitel 8.1 wurde gezeigt, dass sich die Verteilung der Unfalltypen auf Abschnitten mit und ohne Schutzstreifen unterscheidet. Zudem ist es ein Ziel dieser Arbeit, die Vorgaben der technischen Regelwerke zu überprüfen bzw. deren Einfluss auf Akzeptanz und Unfallgeschehen zu quantifizieren. In Kapitel 3.1 und 3.2 wurde bereits gezeigt, dass sowohl im nationalen als auch internationalen Raum Empfehlungen für Fahrbahnbreiten bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr zum Einsatz kommen, die zwischen schmalen und breiten Profilen differenzieren (vgl. Kapitel 7.3.2). Da die Anlage von (beidseitigen) Schutzstreifen bei schmalen oder kritischen Profildbreiten nicht möglich ist, und hinsichtlich von Schutzstreifen andere Einflussfaktoren hinsichtlich der Querschnittsaufteilung (bspw. Breite der Schutzstreifen, Breite der für den Kfz-Verkehr nutzbaren Fahrbahnbreite) vermutet werden, werden (wie auch in der Akzeptanzanalyse) separate Teilmodelle nach Abschnitten mit Mischverkehr/Piktogrammen und Schutzstreifen erstellt (vgl. Kapitel 7.3.2). Auf eine zusätzliche Einschränkung hinsichtlich der Anzahl der Fahrstreifen wird innerhalb der Unfallanalyse verzichtet, da die Ergebnisse des Gesamtmodells (siehe Kapitel 8.4.1) gezeigt haben, dass die Fahrstreifenanzahl keinen signifikanten Einfluss auf das Unfallgeschehen besitzt und der Einfluss mittelbar über die Kfz-Verkehrsstärke ($DTV_{Kfz, QS}$) im Modell abgebildet ist, da beide Variablen stark korrelieren (vgl. Kapitel 8.3).

Das Ergebnis der Modellierung des Radverkehrsunfallgeschehens mit Personenschaden für die 165 Untersuchungsstrecken mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit und ohne Piktogramme zeigt Tab. 8-5. Das Modell erklärt 94 % der systematischen Varianz, wobei sich im Einzelnen zeigt, dass

- die Radverkehrsstärke ($\ln_DTV_{Rf, Ges, QS}$) mit einem Regressionskoeffizienten von 0,875 einen positiv degressiven Einfluss auf die $U_{Rf}(P)$ hat (mit steigender Radverkehrsstärke steigt die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ unterproportional).
- der Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($A_{Fb, QS}$) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ (bei einem mittleren $A_{Fb, QS} = 80\%$ um den Faktor 1,9; vgl. Tab. 8-1) erhöht (Mehrzahl der Unfälle mit Radfahrenden auf der Fahrbahn; vgl. Kapitel 8.4.1 und Schüller et al. 2020b, S. 65 ff.).
- die Kfz-Verkehrsstärke ($DTV_{Kfz, QS}$) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ (bei einem mittleren $DTV_{Kfz, QS} = 10.088$ Kfz/24h um den Faktor 1,3; vgl. Tab. 8-1) erhöht.
- die Fußverkehrsstärke ($DTV_{Fg, QS}$) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ (bei einem mittleren $DTV_{Fg, QS} = 1.741$ Fg/24h um den Faktor 1,1; vgl. Tab. 8-1) erhöht, was auf einen Zusammenhang mit Überschreiten-Unfällen (Unfalltyp 4) und weiteren Unfällen zwischen Rad- und Fußverkehr hindeutet.
- eine nutzbare Fahrstreifenbreite $> 3,50$ m ($B_{FS, KLS (MV, Plikto)}$) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ um den Faktor 1,2 erhöht, was damit zu erklären sein könnte, dass auf breiteren Querschnitten Rad- und Kfz-Verkehr häufiger nebeneinander fahren (bzw. mehr Überholungen stattfinden; vgl. Ohm et al. 2015, S. 61). Dies kann die Wahrscheinlichkeit auf Unfälle im Längsverkehr (Unfalltyp 6) erhöhen und einen Einfluss auf die Sicht an Knotenpunkten haben (Verdeckung der Radfahrenden, wenn diese überholt werden), was wiederum einen Einfluss auf Abbiege- (Unfalltyp 2) und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle (Unfalltyp 3) haben kann. Darüber hinaus kann Schüller (2010, S. 135) zeigen, dass sich die tatsächlichen Geschwindigkeiten der Kfz mit zunehmender Fahrbahnbreite erhöhen, was zumindest mittelbar auch einen Einfluss auf das Unfallgeschehen haben kann.
- das Vorhandensein von Gleisen im Mischverkehr (Gleise) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ um den Faktor 1,5 erhöht (Zusammenhang mit Fahrunfällen (Unfalltyp 1); vgl. Kapitel 8.4.1 und Schüller et al. 2020b, S. 65).
- eine zulässige Geschwindigkeit (v_{zul}) von < 50 km/h die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ um den Faktor 0,7 verringert.
- die Anzahl der Knotenpunktarme (N_{KPA}) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ (bei einer mittleren $N_{KPA} = 8,4$ KPA/km um den Faktor 1,2; vgl. Tab. 8-1) erhöht (Zusammenhang mit Einbiegen/Kreuzen-Unfälle (Unfalltyp 3); vgl. Kapitel 8.4.1 und Schüller et al. 2020b, S. 66).

Kein signifikanter Einfluss zeigt sich vor dem Hintergrund der deskriptiven Einordnung (vgl. Kapitel 8.2) hinsichtlich der Fahrstreifenanzahl (N_{FS}), der Radverkehrsführungsform (RVF), dem ruhenden Verkehr (rV) sowie der Mitteltrennung (MT).

Tab. 8-5 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen

$U_{Rf}(P) / (km^2 \cdot a)$					
	Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante	-	-6,009 ****	0,498	****
$\ln_DTV_{Rf, Ges, QS}$	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)	Rf/24 h	0,875 ****	0,066	****
$A_{Fb, QS}$	Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn im Querschnitt	%	0,008 ^{0,07}	0,004	0,09
$DTV_{Kfz, QS}$	DTV Kfz Querschnitt	Kfz/24 h	2,91E-05 *	1,20E-05	*
$DTV_{Fg, QS}$	DTV Gehende Querschnitt	Fg/24 h	6,31E-05 ***	1,63E-05	**
$B_{FS, KLS (MV, Pkto)}$	nutzbare Fahrstreifenbreite Mischverkehr und Piktogramme	≤ 3,50 m	Ref.		0,09
		> 3,50 m	0,214 ^{0,07}	0,119	
Gleise	Gleise im Mischverkehr	nein	Ref.		**
		ja	0,413 **	0,150	
v_{zul}	zulässige Geschwindigkeit	50 km/h	Ref.		*
		< 50 km/h	-0,431 *	0,172	
N_{KPA}	Anzahl Knotenpunktarme	KPA/km	0,025 *	0,011	*

$n_{Stellen} = 165$
 $n_{Unfälle} = 1.262$
 Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 22,84
 Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 2,4
 erklärte Varianz = 94 %
 AIC = 836,99

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * $p < ,05$ ** $p < ,01$ *** $p < ,001$ **** $p < ,0001$

Hinsichtlich der Variablen zeigt sich im Vergleich zum Gesamtmodell somit ein sehr ähnliches Ergebnis. Das betrifft sowohl die signifikanten Einflussgrößen als auch deren Wirkung auf das Unfallgeschehen (Regressionskoeffizienten). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass 165 der insgesamt 204 Untersuchungsabschnitte Mischverkehr mit und ohne Piktogramme aufweisen. Abweichend vom Gesamtmodell haben sich innerhalb dieses Teilmodells die Fußverkehrsstärke ($DTV_{Fg, QS}$; liegt für die Mehrzahl der Abschnitte mit Schutzstreifen nicht vor und konnte daher im Gesamtmodell nicht berücksichtigt werden; vgl. Kapitel 5.2.1; Tab. 5-3) sowie die nutzbare Fahrstreifenbreite ($B_{FS, KLS (MV, Pkto)}$) als Einflussfaktoren herausgestellt.

Vergleicht man die Ergebnisse mit der Untersuchung von Schüller et al. (2020b), so ergibt sich ein nahezu identisches Modell mit sehr ähnlichen Regressionskoeffizienten (vgl. Schüller et al. 2020b, S. 65). Im Gegensatz zu Schüller et al. (2020b) wurde die Kfz-Verkehrsstärke nicht logarithmiert im Modell berücksichtigt, was in Kapitel 8.4.1 erläutert und begründet wurde.

Hinsichtlich des Erklärungsgehaltes der einzelnen Variablen (siehe Bild 8-4) ergibt im Vergleich zum Gesamtmodell (vgl. Kapitel 8.4.1) ebenfalls ein sehr ähnliches Bild: So wird allein durch die Radverkehrsstärke ($\ln_DTV_{Rf, Ges, QS}$) 95 % der Varianz (ohne nicht erklärten Anteil) erklärt – mit Berücksichtigung des unerklärten Anteils beträgt dieser Wert 89 %. Darüber hinaus werden durch die Fußverkehrsstärke ($DTV_{Fg, QS}$) 2 %, das Vorhandensein von Gleisen im Mischverkehr (Gleise) ca. 1,3 %, die Kfz-Verkehrsstärke ($DTV_{Kfz, QS}$) 0,8 %, die zulässige Geschwindigkeit (v_{zul}) 0,6 %, den Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($A_{Fb, QS}$) und der Anzahl der Knotenpunktarme (N_{KPA}) jeweils 0,2 % sowie durch die nutzbare Fahrstreifenbreite ($B_{FS, KLS (MV, Pkto)}$) 0,1 % der Varianz erklärt.

Die Gegenüberstellung der mit dem Modell berechneten und den empirischen $U_{Rf}(P)$ (siehe Bild 8-5, links) zeigt wie im Gesamtmodell eine relativ gleichmäßige Verteilung der Punkte um die Gerade (die empirische Unfallzahl wird sowohl über- als auch unterschätzt), deren Streuung mit zunehmender empirischer Unfallzahl zunimmt. Die Quadratwurzel des durchschnittlichen Prognosefehlers (RMSE) der Rohresiduen (kein Bezug auf Länge und Betrachtungszeitraum) beträgt $2,3 U_{Rf}(P)$ bei einem Mittelwert von $7,6 U_{Rf}(P)$ je Abschnitt, was auch vor dem Hintergrund der Varianzerklärung auf eine gute Anpassung des Modells schließen lässt.

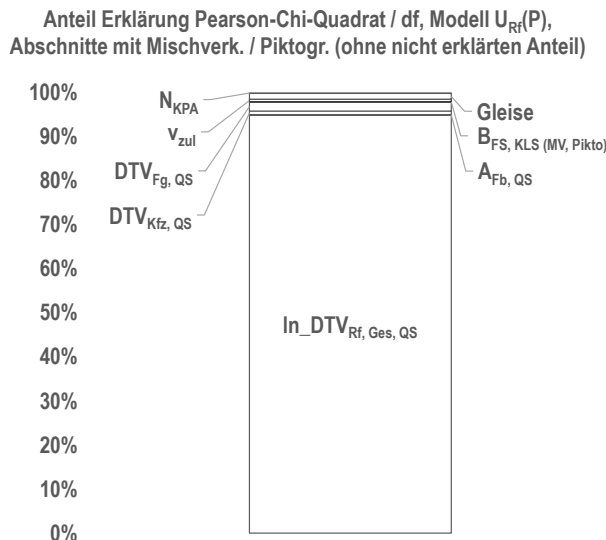


Bild 8-4 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat/ df) der Variablen – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen

Die Analyse des CURE-Plots (siehe Bild 8-5, rechts) zeigt bis zu einem $DTV_{Rf, Ges, QS}$ von etwa 1.000 Rf/24 h (entspricht 85 % der Untersuchungsabschnitte mit Mischverkehr mit und ohne Piktogramme) ein zufälliges oszillieren der kumulativen Residuen um 0. Dabei werden die empirischen Unfallzahlen ähnlich dem Gesamtmodell (vgl. Kapitel 8.4.1) bis 500 Rf/24 h eher unterschätzt und zwischen 500 Rf/24 h und 1.000 Rf/24 h eher überschätzt. Ab einem $DTV_{Rf, Ges, QS}$ von etwa 1.000 Rf/24 h wird die empirische Unfallzahl systematisch unterschätzt.

Die Analyse der einflussreichen Fälle ergibt insgesamt 6 Abschnitte mit auffälligen Cook-Distanzen (2 dieser 6 Abschnitte zeigten bereits im Gesamtmodell eine Auffälligkeit). Alle Abschnitte weisen Mischverkehr ohne Piktogramme und eine intensive Randnutzung auf. Bei 4 der 6 Abschnitten sind Gleise im Mischverkehr vorhanden. Auf 2 der 6 Abschnitte beträgt die $v_{zul} = 30$ km/h, wobei im Umfeld Gründe für Anordnung nach § 45. Abs. 9, Punkt 6 StVO vorliegen (vgl. Kapitel 5.1.3). Darüber hinaus zeigt sich, dass die Abschnitte

- eine überdurchschnittliche Unfallanzahl (im Mittel $26 U_{Rf}(P)$ ggü. Mittelwert über alle Abschnitte = $8,4 U_{Rf}(P)$),
- einen unterdurchschnittlichen $DTV_{Rf, Ges, QS}$ (im Mittel 597 Rf/24 h ggü. Mittelwert über alle Abschnitte = 724 Rf/24 h),
- einen unterdurchschnittlichen $DTV_{Kfz, QS}$ (im Mittel 8.340 Kfz/24 h ggü. Mittelwert über alle Abschnitte 10.088 Kfz/24 h)

aufweisen. Hinsichtlich der Hebelwerte ergeben sich 6 auffällige Abschnitte, wobei 3 dieser 6 Abschnitte bereits im Gesamtmodell auffällig sind. Es ergibt sich entsprechend auch eine ähnliche Systematik (vgl. Kapitel 8.4.1): Alle Abschnitte weisen ein deutlich überdurchschnittliches Unfallgeschehen (im Mittel $37 U_{Rf}(P)$ ggü. Mittelwert über alle Abschnitte = $8,4 U_{Rf}(P)$) auf. 2 der 6 Abschnitte weisen mehr als 2 Fahrstreifen mit einem entsprechend hohem $DTV_{Kfz, QS} > 20.000$ Kfz/24 h auf. Weitere 2 der 6 Abschnitte weisen eine $v_{zul} = 30$ km/h auf, wobei im Umfeld keine Gründe für Anordnung nach § 45. Abs. 9, Punkt 6 StVO vorliegen (vgl. Kapitel 5.1.3), was darauf schließen lassen könnte, dass die Geschwindigkeitsbegrenzung aufgrund einer Gefahrenlage angeordnet wurde (vgl. Kapitel 2).

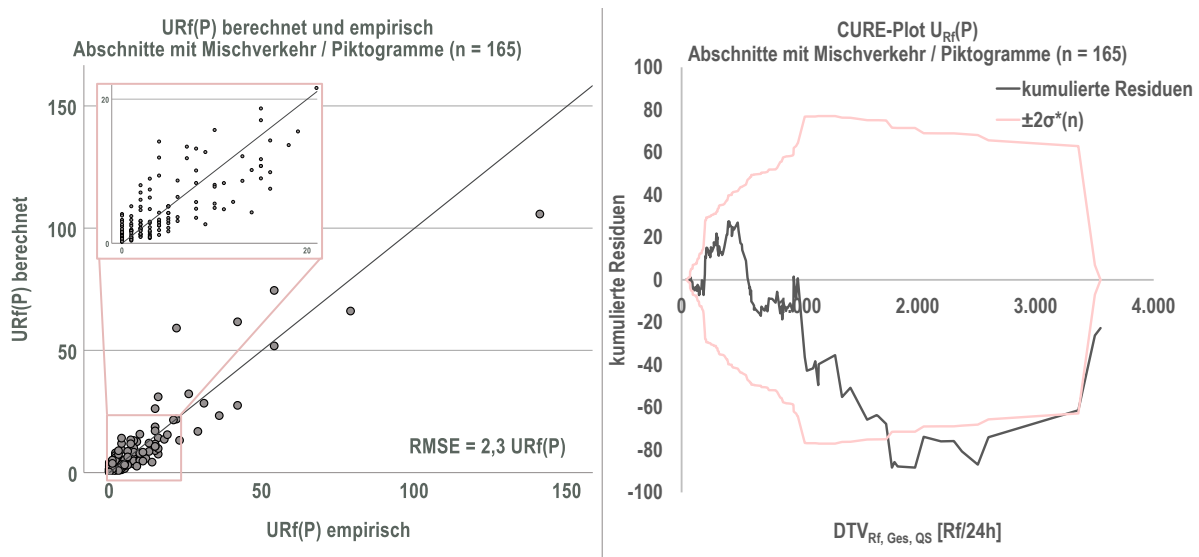


Bild 8-5 Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (links) und CURE-Plot (rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen

8.4.3 Teilmodell Schutzstreifen

Das Ergebnis der Modellierung des Radverkehrsunfallgeschehens mit Personenschaden für die 39 Untersuchungsstrecken mit Schutzstreifen zeigt Tab. 8-6. Das Modell erklärt 85 % der systematischen Varianz. Hinsichtlich der Variablen mit Einfluss auf das Radverkehrsunfallgeschehen zeigen sich im Vergleich zum Gesamtmodell (vgl. Kapitel 8.4.1; Tab. 8-4) sowie zum Teilmodell der Abschnitte mit Mischverkehr mit und ohne Piktogramme (vgl. Kapitel 8.4.2; Tab. 8-5), wie im Rahmen der Unfallstrukturanalyse bereits vermutet (vgl. Kapitel 8.1), teilweise Unterschiede. Im Einzelnen zeigt sich, dass

- die Radverkehrsstärke ($\ln_DTV_{Rf, Ges, QS}$) mit einem Regressionskoeffizienten von 0,516 einen positiv degressiven Einfluss auf die $U_{Rf}(P)$ hat (mit steigender Radverkehrsstärke steigt die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ unterproportional) – im Vergleich zum Gesamtmodell sowie zum Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme ist der Einfluss deutlich degressiver. Dieses Ergebnis bestätigt auch die Erkenntnisse von Alrutz et al. (2015, S. 58) (Prüfung des Zusammenhangs zwischen Unfallzahl und Radverkehrsstärke auf Basis einer linearen Einfachregression: Regressionskoeffizient bei Mischverkehr höher als bei Schutzstreifen). Eine mögliche Erklärung dieses Zusammenhangs besteht darin, dass Radfahrende auf Schutzstreifen weniger exponiert ggü. dem Kfz-Verkehr sind, da ihnen eine Fläche zur Verfügung steht.
- der Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($A_{Fb, QS}$) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ (bei einem mittleren $A_{Fb, QS} = 80\%$ um den Faktor 12,8; vgl. Tab. 8-1) erhöht – im Vergleich zum Gesamtmodell sowie zum Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme ist der Faktor größer, was darauf zurückgeführt wird, dass aufgrund der höheren Akzeptanz auch mehr Unfälle auf der Fahrbahn geschehen.
- die Kfz-Verkehrsstärke ($DTV_{Kfz, QS}$) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ (bei einem mittleren $DTV_{Kfz, QS} = 10.088$ Kfz/24h um den Faktor 1,8; vgl. Tab. 8-1) erhöht. Im Vergleich zum Gesamtmodell sowie zum Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme hat die Kfz-Verkehrsstärke einen höheren Faktor. Dies kann ggf. darauf zurückgeführt werden, dass auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen mit zunehmender Verkehrsstärke im Querschnitt die Überholungen bzw. Überholmöglichkeiten für Kfz ggü. Radfahrenden (aufgrund einer höheren Verkehrsstärke im Gegenverkehr) abnehmen. Währenddessen gewährleistet das Vorhandensein von Schutzstreifen ein Nebeneinanderfahren auch bei hohen Verkehrsstärken (vgl. Ohm et al. 2015, S. 60 ff.). Das führt wiederum zu mehr Interaktionen (bei Überholungen/ Nebeneinanderfahrten) und ggf. zu Einschränkungen der Sichtbeziehungen an Knotenpunkten auf Abschnitten mit Schutzstreifen.
- der Umfeldfaktor (stellvertretend für die Fußverkehrsstärke, die für die Mehrzahl der Abschnitte mit Schutzstreifen nicht vorliegt; vgl. Kapitel 5.2.1; Tab. 5-3) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ (bei einem mittleren $UF = 1,53$ um den Faktor 2; vgl. Tab. 8-1) erhöht.

- Beidseitige Schutzstreifen im Vergleich zu einseitigen Schutzstreifen (RVF) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ um den Faktor 0,5 verringert.
- die Anzahl der LSA als Querungsanlage (N_{FLSA}) die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ (bei einer mittleren $N_{FLSA} = 0,48$ QA/km um den Faktor 1,1; vgl. Tab. 8-1) erhöht. Diese signalisierten Querungsanlagen befinden im Zuge der Untersuchungsabschnitte häufig in der Nähe von Anschlussknotenpunkten, in einer Zufahrt der Hauptrichtung. Dies kann auch durch Medicus et al. (2021, S. 46) bestätigt werden, wobei 61 % der innerhalb dieser Untersuchung betrachteten LSA als Querungsanlagen (F-LSA) an Knotenpunkten liegen. Solche Konstellationen werden auch als nicht vollständig signalisierte Knotenpunkte bezeichnet (FGSV 2010c, S. 51). Warum sich hinsichtlich dieses Merkmals ein signifikanter Einfluss (vorrangig auf Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle; siehe Kapitel 8.4.4) auf das Radverkehrsfallgeschehen ergibt, kann nicht abschließend geklärt werden. Es wird vermutet, dass ggf. Missverständnisse durch die unvollständige Signalisierung zu dieser Auffälligkeit führen könnten. Zum Vergleich: Bei Medicus et al. (2021, S. 41), welche ausschließlich F-LSA betrachten, sind bei 46 % der Unfälle mit Personenschaden an F-LSA Radfahrende beteiligt. Darüber hinaus ist allerdings keine Untersuchung bekannt, die die Verkehrssicherheitswirkung von F-LSA im Vergleich zu anderen Verkehrsregelungsarten insbesondere auf Radverkehrsunfälle quantifiziert. Dass dieses Merkmal stellvertretend für ggf. andere Einfluss steht, kann zumindest auf Basis der innerhalb dieser Untersuchung erhobenen Merkmale ausgeschlossen werden (vgl. Kapitel 8.3; Tab. 8-3).

Im Vergleich zum Gesamtmodell und zum Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme konnte dem Vorhandensein von Gleisen im Mischverkehr (Gleise) sowie der zulässigen Geschwindigkeit (v_{zul}) kein signifikanter Einfluss nachgewiesen werden. Dass dem Merkmal Gleise kein Einfluss nachgewiesen wird, ist plausibel, da dem Radverkehr eine markierte Fläche zur Verfügung steht und somit ein Fahren in der Nähe der Gleise ausgeschlossen werden kann. Warum der zulässigen Geschwindigkeit kein Einfluss nachgewiesen wird, ist im Rahmen dieses Teilmodells nicht abschließend zu klären. Für eine weitere Interpretation wird auf die Teilmodelle differenziert nach Unfalltypen verwiesen (vgl. Kapitel 8.4.4).

Tab. 8-6 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Schutzstreifen

$U_{Rf}(P) / (km^2 \cdot a)$		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante	-	-	-5,750 ****	0,871	****
$\ln_DTV_{Rf, Ges, QS}$	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)	Rf/24 h		0,516 ****	0,116	***
$A_{Fb, QS}$	Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn im Querschnitt	%		0,032 **	0,011	*
$DTV_{Kfz, QS}$	DTV Kfz Querschnitt	Kfz/24 h		5,70E-05 **	1,96E-05	*
UF	Umfeldfaktor (Mittelwert beider Straßenseiten)	-		0,450 *	0,213	*
RVF	Radverkehrsführungsform	Schutzstreifen einseitig		Ref.		0,07
		Schutzstreifen beidseitig		-0,695 ^{0,12}	0,451	
N_{FLSA}	Anzahl LSA (Querungsanlage)	FLSA/km		0,224 **	0,072	*

$n_{Stellen} = 39$

$n_{Unfälle} = 474$

Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 13,97

Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 2,92

erklärte Varianz = 85 %

AIC = 252,71

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * $p < ,05$ ** $p < ,01$ *** $p < ,001$ **** $p < ,0001$

Im Vergleich zur ersten deskriptiven Einordnung (vgl. Kapitel 8.2) lässt sich, unabhängig von den Merkmalen Gleise und zulässige Geschwindigkeit (v_{zul}), der Fahrstreifenanzahl (N_{FS}), der Fahr- (B_{FS}) und Schutzstreifenbreite (B_{SSF}), dem ruhenden Verkehr (rV) sowie der Mitteltrennung (MT) kein signifikanter Einfluss (Signifikanz der Modelleffekte $< 0,1$) im Gesamtmodell nachweisen.

Hinsichtlich des Erklärungsgehaltes der Variablen wird, wie auch im Gesamtmodell sowie dem Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme, der mit Abstand größte Anteil der Varianz durch die Radverkehrsstärke ($\ln_DTV_{Rf, Ges, QS}$) erklärt (83,5 %; siehe Bild 8-6). Den nächsthöheren Erklärungsgehalt weist die Anzahl der LSA als Querungsanlage (bzw. nicht vollständig signalisierte Knotenpunkte) (N_{FLSA}) auf (9,3 %). Zudem werden durch die Radverkehrsführungsform (RVF; Schutzstreifen ein- oder beidseitig) 3,2 %, den Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($A_{Fb, QS}$) 1,9 %, die Kfz-Verkehrsstärke ($DTV_{Kfz, QS}$) 1,2 % und den Umfeldfaktor (UF) 0,9 % der Varianz erklärt.

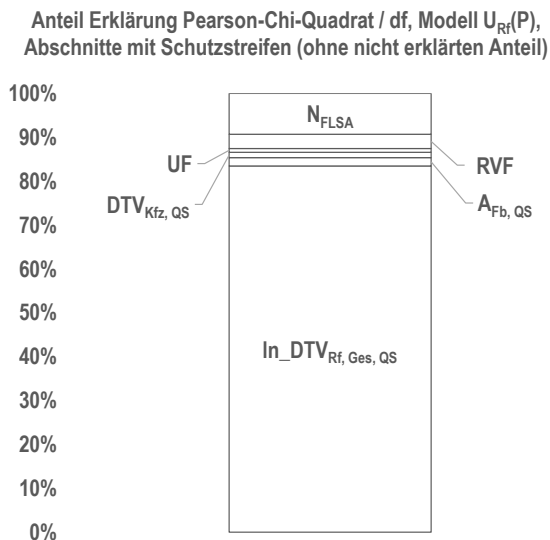


Bild 8-6 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat/ df) der Variablen – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Schutzstreifen

Der Vergleich der mit dem Modell berechneten und den empirischen $U_{Rf}(P)$ (siehe Bild 8-7, links) zeigt, dass die Punkte gleichmäßig um die Gerade streuen. Im Vergleich zum Gesamtmodell sowie zum Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme zeigt sich auch keine Zunahme der Streuung mit zunehmender Anzahl der empirischen Unfallanzahl. Die Quadratwurzel des durchschnittlichen Prognosefehlers (RMSE) der Rohresiduen (kein Bezug auf Länge und Betrachtungszeitraum) beträgt 2,3 $U_{Rf}(P)$ bei einem Mittelwert von 12,1 $U_{Rf}(P)$ je Abschnitt und liegt damit relativ gesehen deutlich unter denen des Gesamtmodells und des Teilmodells Mischverkehr/ Piktogramme.

Die Darstellung der kumulierten Rohresiduen über der Radverkehrsstärke (siehe Bild 8-7, rechts) zeigt, dass die Abweichungen bis zu einer Radverkehrsstärke von etwa 1.700 Rf/24 h zufällig um 0 oszillieren – 85 % der Untersuchungsabschnitte mit Schutzstreifen überschreiten eine Radverkehrsstärke von 1.815 Rf/ 24 h nicht (vgl. Kapitel 8.2, Tab. 8-1). Darüber hinaus zeigt sich ähnlich wie im Gesamtmodell und Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme, dass

- die Unfallzahl in einem Bereich bis 500 Rf/24 h durch das Modell unterschätzt wird und
- die Unfallzahl in einem Bereich zwischen 500 Rf/24 h und 1.700 Rf/24 h durch das Modell überschätzt wird.

Ab einer Verkehrsstärke von 1,700 Rf/24 h wird die Unfallzahl wieder unterschätzt. Im Gegensatz zum Gesamtmodell und Teilmodell Mischverkehr/ Schutzstreifen endet die kumulative Kurve näher bei 0.

Die Analyse der einflussreichen Fälle ergibt insgesamt 4 Abschnitte mit auffälligen Cook-Distanzen, wobei einer dieser Abschnitte auch im Gesamtmodell auffällig war. Alle 4 Abschnitte haben einseitige Schutzstreifen (von 5 Abschnitten mit einseitigen Schutzstreifen im gesamten Kollektiv). Hinsichtlich des Hebelwertes hat sich kein Abschnitt als auffällig erwiesen.

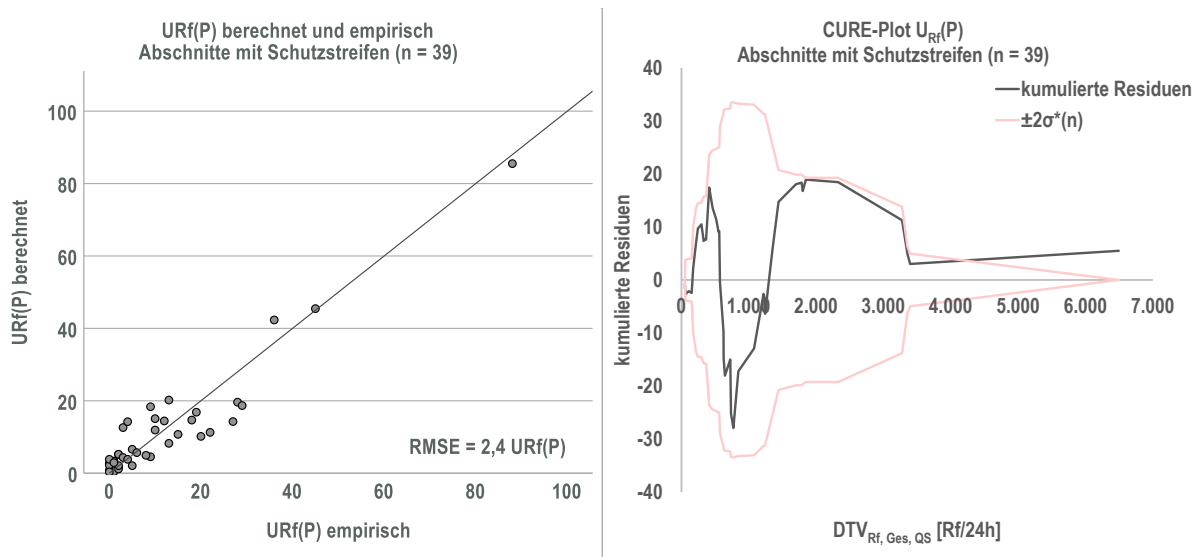


Bild 8-7 Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (links) und CURE-Plot (rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Abschnitte mit Schutzstreifen

Die Ergebnisse des Gesamtmodells (vgl. Kapitel 8.4.1) sowie der Teilmodelle Mischverkehr/ Piktogramme (vgl. Kapitel 8.4.2) und Schutzstreifen (vgl. Kapitel 8.4.3) haben gezeigt, dass das Unfallgeschehen (wie bereits in Kapitel 8.1 vermutet wurde) besser durch separate Teilmodelle für Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme und Schutzstreifen beschrieben werden kann, was wie folgt zusammenfassend begründet wird:

- Innerhalb der Teilmodelle wurden unterschiedliche Einflussgrößen identifiziert aber auch unterschiedliche Wirkungen von Einflussgrößen festgestellt, die in beiden Teilmodellen signifikant sind. Das Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme zeigt dabei eine hohe Ähnlichkeit mit dem Gesamtmodell, was darauf zurückzuführen ist, dass 165 der insgesamt 204 Untersuchungsabschnitte diese Führungsform aufweisen.
- Dem Merkmal Radverkehrsführungsform (RVF) konnte im Gesamtmodell kein signifikanter Einfluss (Signifikanz der Modelleffekte $< 0,1$) auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden – das heißt zwischen Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen und solchen mit Schutzstreifen ist kein signifikanter Unterschied im Verkehrssicherheitsniveau abzuleiten, obwohl hinsichtlich der Einflussgrößen Unterschiede festgestellt werden können. Dabei ist aber auch zu berücksichtigen, dass Schutzstreifen unter anderen verkehrlichen Bedingungen empfohlen werden (vgl. Kapitel 3.1).
- Durch die Teilmodelle ist eine bessere Anpassung an die Empirie (berechnete vs. empirische $U_{Rf}(P)$; kumulierte Residuen in Abhängigkeit der Radverkehrsstärke) im Vergleich zum Gesamtmodell zu verzeichnen.

8.4.4 Teilmodelle nach Unfalltypen

Während sich das Gesamtmodell sowie die Teilmodelle Mischverkehr/ Piktogramme und Schutzstreifen vorrangig zur Prognose von Unfallzahlen eignen, wird durch die differenzierte Modellierung nach Unfalltypen das Ziel verfolgt, Infrastrukturmerkmale zu identifizieren, die einen Einfluss auf das Unfallgeschehen bzw. auf unterschiedliche Unfallkonstellationen haben. Dabei werden die Teilmodelle für Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen und separat für Schutzstreifen betrachtet, wobei für alle Unfalltypen Modelle berechnet werden. Der Fokus liegt dabei auf den Unfalltypen 2 (Abbiege-Unfälle), 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle), 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) sowie 6 (Unfälle im Längsverkehr) liegt (vgl. Kapitel 8.1). Tab. 8-7 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der Modellierung für o.g. Unfalltypen. Die Modellbeschreibungen inklusive der Standardfehler der

Regressionskoeffizienten sowie Abbildungen zum Erklärungsgehalt der einzelnen Variablen, der Gegenüberstellung der berechneten und empirischen Unfallanzahl, der CURE-Plots sowie den Cook-Distanzen und Hebelwerten sind in Anlage 15 (Unfalltyp 1: Fahrurfälle), Anlage 16 (Unfalltyp 2: Abbiege-Unfälle), Anlage 17 (Unfalltyp 3: Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle), Anlage 18 (Unfalltyp 4: Überschreiten-Unfälle), Anlage 19 (Unfalltyp 5: Unfälle durch ruhenden Verkehr), Anlage 20 (Unfalltyp 6: Unfälle im Längsverkehr) und Anlage 21 (Unfalltyp 7: Sonstige Unfälle) zu finden.

Hinsichtlich der Expositionsgrößen wurde, wie auch im Gesamtmodell sowie den Teilmodellen Mischverkehr/ Piktogramme und Schutzstreifen, lediglich die Radverkehrsstärke logarithmiert berücksichtigt, da auch bei der Betrachtung der Unfalltypen neben Kfz auch andere Verkehrsarten beteiligt sind (siehe Anlage 12, Bild-A 14 und Bild-A 15). Einzige Ausnahme stellen hierbei Überschreiten-Unfälle (Unfalltyp 4) dar, da diese ausschließlich zwischen Rad- und Fußverkehr stattfinden, so dass die Fußverkehrsstärke innerhalb dieses Modells logarithmiert berücksichtigt wird (siehe Anlage 18).

Die Analyse der Modellergebnisse der Unfalltypen 2, 3, 5 und 6 ergibt, dass zwischen 67 % und 98 % der systematischen Streuung erklärt werden kann. Dabei zeigen die Modelle der Unfalltypen 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) sowie 6 (Unfälle im Längsverkehr) die beste Anpassung. Etwas geringer ist der Erklärungsgehalt der Modelle für die Unfalltypen 2 (Abbiege-Unfälle) und 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle), was darauf zurückzuführen ist, dass die Expositionsgröße durch die erhobenen Daten nicht vollständig beschrieben werden kann (bspw. Verkehrsstärke in der Nebenrichtung/ untergeordneten Ströme). Nichtsdestotrotz werden auch durch diese Modelle mindestens zwei Drittel der systematischen Streuung erklärt. Hinsichtlich der einzelnen Variablen, denen in unterschiedlichen Teilmodellen ein Einfluss auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden kann, ist Folgendes festzustellen:

Radverkehrsstärke

- Die Verkehrsstärke der Radfahrenden ist in allen Modellen signifikant, wobei der Einfluss, mit Ausnahme der Teilmodelle Mischverkehr/ Piktogramme für Unfalltyp 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) und Unfalltyp 6 (Unfälle im Längsverkehr), positiv degressiv ist (Regressionskoeffizienten zwischen 0,407 und 0,782), womit der Safety-in-Numbers-Effekt bestätigt werden kann. Warum die Radverkehrsstärke bei den Teilmodellen Unfalltyp 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) und Unfalltyp 6 (Unfälle im Längsverkehr) einen nahezu proportionalen Einfluss auf das Unfallgeschehen besitzt (Regressionskoeffizient ≈ 1 ; vgl. Schüller et al. 2020b, S. 67), kann nicht abschließend erklärt werden. Zumindest hinsichtlich des Unfalltyps 6 ist festzustellen, dass dieser den höchsten Anteil von Unfällen zwischen Radfahrenden aufweist (vgl. Anlage 12).
- Mit Ausnahme des Unfalltyps 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle) hat die Radverkehrsstärke auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen einen höheren Regressionskoeffizienten als auf Abschnitten mit Schutzstreifen. Wie in Kapitel 8.4.3 bereits erklärt wurde, bestätigt dieses Ergebnis auch die Erkenntnisse von Alrutz et al. (2015, S. 58) und kann ggf. darauf zurückgeführt werden, dass Radfahrende auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen ggü. dem Kfz-Verkehr exponierter sind, weshalb der Einfluss der Radverkehrsstärke unmittelbarer ist, im Vergleich zum Vorhandensein einer Fläche für den Radverkehr.
- Bei Unfällen der Unfalltypen 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle) und 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) besitzt der DTV der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($\ln_DTV_{Rf, Fb, QS}$) einen höheren Erklärungsgehalt, während die Unfälle der Unfalltypen 2 (Abbiege-Unfälle) und 6 (Unfälle im Längsverkehr) besser durch die Gesamtverkehrsstärke der Radfahrenden ($\ln_DTV_{Rf, Ges, QS}$; Radfahrende auf der Fahrbahn und auf dem Gehweg) beschrieben wird, wobei sich innerhalb des Unfalltyps 2 auch der Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($A_{Fb, QS}$) als signifikant erweist. Dies kann zumindest hinsichtlich der Längsverkehrs-Unfälle dadurch erklärt werden, dass dieser Unfalltyp den höchsten Anteil von Unfällen zwischen Radfahrenden untereinander und Radfahrenden und Gehenden (abgesehen von Überschreiten-Unfällen) aufweist (vgl. Anlage 12).

Kfz-Verkehrsstärke

- Der Kfz-Verkehrsstärke kann mit Ausnahme der Unfälle des Unfalltyps 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) ein signifikanter Einfluss in allen Teilmodellen nachgewiesen werden. Je nach Teilmodell wird die Anzahl der $U_{Rf}(P)$ bei einem mittleren $DTV_{Kfz, QS} = 10.088$ Kfz/24h (vgl. Tab. 8-1) um den Faktor 1,4 (Unfalltyp 3, Abschnitte mit Mischverkehr) bis 4 (Unfalltyp 2, Abschnitte mit Schutzstreifen) erhöht.
- Dass die Kfz-Verkehrsstärke auf Unfälle des Unfalltyps 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) keinen signifikanten Einfluss hat, wird darauf zurückgeführt, dass die Exposition besser durch Ein- und Ausparkvorgänge beschrieben wird, als durch die Kfz-Verkehrsstärke im Querschnitt. Dies wird auch durch den signifikanten Einfluss des Anteils der Geschäftsnutzung (AL_G) deutlich, da davon ausgegangen wird, dass sich mit zunehmender geschäftlicher Nutzung im Umfeld des Abschnittes auch die Anzahl der Ein- und Ausparkvorgänge erhöht.
- Die Kfz-Verkehrsstärke hat auf Abschnitten mit Schutzstreifen einen höheren Regressionskoeffizienten, als auf Abschnitten mit Mischverkehr mit oder ohne Piktogramme. Wie in Kapitel 8.4.3 bereits erläutert, kann dies ggf. darauf zurückgeführt werden, dass die Überholmöglichkeiten (Kfz-Rad) auf Abschnitten mit Mischverkehr mit zunehmender Verkehrsstärke im Querschnitt abnehmen, währenddessen Schutzstreifen auch ein Nebeneinanderfahren/Überholen bei höheren Verkehrsstärken gewährleisten (vgl. Ohm et al. 2015, S. 60 ff.). Mit steigender Anzahl der Überholungen nehmen auch die Interaktionen zu und je mehr nebeneinander gefahren wird, desto größer könnten Einschränkungen von Sichtbeziehungen an Anschlussknotenpunkten sein.
- Dass die Kfz-Verkehrsstärke bei Unfällen des Unfalltyps 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle) und 6 (Unfälle im Längsverkehr) einen geringeren Einfluss im Vergleich zu Unfällen des Unfalltyps 2 (Abbiege-Unfälle) haben, wird darauf zurückgeführt, dass die Exposition nicht exakt beschrieben ist (Unfalltyp 3: Verkehrsstärke in der Nebenrichtung; Unfalltyp 6: Anzahl der Überholvorgänge).

Zulässige Geschwindigkeit

- Die zulässige Geschwindigkeit von < 50 km/h wirkt sich insbesondere auf Abschnitten mit Mischverkehr mit oder ohne Piktogramme unfallreduzierend auf Unfälle der Unfalltypen 2 (Abbiege-Unfälle), 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle) und 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) aus. Je nach Teilmodell wird die Unfallzahl um den Faktor 0,6 bis 0,3 reduziert.
- Dass die zulässige Geschwindigkeit häufiger in den Teilmodellen für Abschnitte mit Mischverkehr einen Einfluss hat, könnte darauf zurückgeführt werden, dass der Radverkehr auf Abschnitten ohne Schutzstreifen gegenüber dem Kfz-Verkehr exponierter ist (vgl. Abschnitt Radverkehrsstärke).
- Dass die zulässige Geschwindigkeit auf Unfälle des Unfalltyps 6 (Unfälle im Längsverkehr) keinen Einfluss hat, wird darauf zurückgeführt, dass bei der Entstehung dieser Unfälle eher die lateralen und longitudinalen Abstände zwischen den Verkehrsteilnehmenden relevant sind, als die Geschwindigkeiten.

Anteil Länge Geschäftsbesatz

Der Anteil der Länge des Geschäftsbesatzes hat einen Einfluss auf die Unfälle des Unfalltyps 2 (Abbiege-Unfälle), 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) und 6 (Unfälle im Längsverkehr). Diese Variable wird innerhalb der Unfalltypen 2 (Abbiege-Unfälle) und 6 (Unfälle im Längsverkehr) tendenziell als stellvertretend für eine hohe Komplexität des Straßenumfelds und der Nutzung dessen (bspw. hohe Fußverkehrsstärken) interpretiert, wobei sich die Unfallzahl bei einem mittleren $AL_G = 25$ % (vgl. Tab. 8-1) um den Faktor 1,4 erhöht. Hinsichtlich des Unfalltyps 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) wird diese Variable als stellvertretend für Ein- und Ausparkvorgänge interpretiert (vgl. Abschnitt Kfz-Verkehrsstärke), wobei sich die Unfallzahl bei einem mittleren $AL_G = 25$ % um den Faktor 1,5 (Abschnitte mit Schutzstreifen) bis 1,7 (Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen) erhöht.

Anzahl Lichtsignalanlagen als Querungsanlage

Diesem Merkmal wurde bereits ein signifikanter Einfluss im Teilmodell Schutzstreifen nachgewiesen (vgl. Kapitel 8.4.3). Innerhalb dieser Auswertung zeigt sich ein unfallerhöhender Einfluss für Abschnitte mit Schutzstreifen auf den Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle) sowie für alle Abschnitte auf den Unfalltyp 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle). In Kapitel 8.4.3 wurde bereits erwähnt, dass sich diese signalisierten Querungsanlagen im Zuge der Untersuchungsabschnitte häufig in der Nähe von Anschlussknotenpunkten befinden (nicht vollständig signalisierte Knotenpunkte). Medicus et al. (2021, S. 41) zeigen, dass bei 46 % der Unfälle mit Personenschaden an F-LSA Radfahrende beteiligt sind (vgl. Kapitel 8.4.3). Eine abschließende Erklärung dieses Zusammenhangs ist allerdings nicht möglich ist, da keine Untersuchung bekannt ist, die die Verkehrssicherheitswirkung dieser Verkehrsregelungsart insbesondere auf Radverkehrsunfälle quantifiziert. Es wird aber vermutet, dass ggf. Missverständnisse durch die unvollständige Signalisierung zu dieser Auffälligkeit führen könnten (vgl. Kapitel 8.4.3).

Weitere Variablen

Darüber hinaus haben sich die Merkmale Mitteltrennung (MT), Anteil Länge ruhender Verkehr (AL_{RV}) sowie die Anzahl der vorfahrtzeichengeregelten Anschlussknotenpunkte ($N_{AKP, VZ}$) jeweils hinsichtlich eines Unfalltyps als signifikant herausgestellt:

- Dabei reduziert das Vorhandensein einer baulichen Mitteltrennung in der Hauptrichtung die Anzahl der Abbiege-Unfälle (Unfalltyp 2), da bei einer durchgängigen baulichen Mitteltrennung das Linksabbiegen von der Hauptrichtung und Linkseinbiegen/ Geradeausfahren aus der Nebenrichtung nicht möglich ist und sich damit die Anzahl der Konfliktpunkte reduziert.
- Der Anteil Länge ruhender Verkehr (AL_{RV}) hat auf Abschnitten mit Schutzstreifen einen unfallerhöhenden Einfluss auf Unfälle durch ruhenden Verkehr (Unfalltyp 5). Dies wird darauf zurückgeführt, dass bei Vorhandensein eines Schutzstreifens in der Mehrzahl der Situationen nur geparkt oder gehalten wird, wenn dafür Flächen neben dem Schutzstreifen zur Verfügung stehen. Auf Abschnitten mit Mischverkehr finden ggf. häufiger auch Ein- und Ausparkvorgänge am Fahrbahnrand (im Halte- oder Parkverbot) statt, ohne dass dafür Flächen ausgewiesen sind. Dieses Ergebnis kann vor dem Hintergrund o.g. Erklärung ggf. auch dadurch begründet werden, dass die Länge des ruhenden Verkehrs auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen nicht immer zuverlässig bestimmt werden kann, sofern keine baulich oder markierten Flächen für den ruhenden Verkehr vorhanden sind (vgl. Kapitel 5.1.3). Ein weiterer Grund könnte sein, dass nicht das Vorhandensein des ruhenden Verkehrs allein einen Einfluss hat, sondern vor allem die Parkwechselfrequenz auf das Unfallgeschehen wirkt. Dafür spricht auch, dass der Anteil der Länge des Geschäftsbesatzes an der Gesamtlänge sowohl auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen als auch auf Abschnitten mit Schutzstreifen einen signifikanten Einfluss auf Unfälle mit ruhendem Verkehr hat.
- Das Merkmal Anzahl der vorfahrtzeichengeregelten Anschlussknotenpunkte ($N_{AKP, VZ}$) wirkt sich unfallerhöhend auf Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle (Unfalltyp 3) im Zuge von Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen aus. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass auf Abschnitten mit Schutzstreifen allein durch das Vorhandensein des Schutzstreifens eine erhöhte Aufmerksamkeit für den Radverkehr erreicht wird. Einbiegen/Kreuzen-Unfälle an vorfahrtzeichengeregelten Knotenpunkten ist eine der häufigsten Unfallkonstellationen im Radverkehr auf Innerortsstraßen (vgl. Schüller et al. 2020b, S. 49).

Der Breite der Schutzstreifen (B_{SSF}), der Breite der Sicherheitsräume ($B_{RVFSich}$), der Anzahl der Fahrstreifen (N_{FS}) sowie der Fahrstreifenbreite (B_{FS}) konnte kein Einfluss nachgewiesen werden.

Tab. 8-7 Teilmodelle Radverkehrsunfälle mit Personenschaden (U_{Rf(P)}) differenziert nach Radverkehrsführungsform und Unfalltypen

Variable	Einheit/ Ausprägung	Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle)				Unfalltyp 3 (Einbiegen/Kreuzen-Unfälle)				Unfalltyp 5 (Unfälle d. ruhenden Verkehr)				Unfalltyp 6 (Unfälle im Längsverkehr)			
		Mischv./ Pkto.		Schutzstreifen		Mischv./ Pkto.		Schutzstreifen		Mischv./ Pkto.		Schutzstreifen		Mischv./ Pkto.		Schutzstreifen	
		β	$\rho_{\text{Koeff.}^1}$ ρ_{Modell}	β	$\rho_{\text{Koeff.}^1}$ ρ_{Modell}	β	$\rho_{\text{Koeff.}^1}$ ρ_{Modell}	β	$\rho_{\text{Koeff.}^1}$ ρ_{Modell}	β	$\rho_{\text{Koeff.}^1}$ ρ_{Modell}	β	$\rho_{\text{Koeff.}^1}$ ρ_{Modell}	β	$\rho_{\text{Koeff.}^1}$ ρ_{Modell}	β	$\rho_{\text{Koeff.}^1}$ ρ_{Modell}
k	Konstante	-															
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)	Rf/24 h	0,782 ****	0,637 ****										1,096 ****	0,742 ****		
In_DTV _{Rf, Fb, QS}	DTV Radfahrende Fahrbahn Querschnitt (logarithmiert)	Rf/24 h			0,599 ****	0,708 ****			1,081 ****	0,407 **							
DTV _{Kfz, QS}	DTV Kfz im Querschnitt	Kfz/24 h	8E-05 **	1E-04 **	4E-05 *	5E-05 0,116 0,089							4E-05 *	7E-05 *			
A _{Fb, QS}	Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn im Querschnitt	%	0,027 **	0,068 **													
AL _G	Anteil Länge Geschäftsbesatz (Mittelwert beider Straßenseiten)	%		0,015 *					0,021 ****	0,016 *			0,013 **				
AL _{Rv}	Anteil Länge ruhender Verkehr (Mittelwert beider Straßenseiten)	-								2,679 ***							
MT	Mitteltrennung	keine/markiert	Ref.	Ref.													
		baulich	-0,941 *	-1,395 **													
V _{zul}	zulässige Geschwindigkeit	50 km/h	Ref.		Ref.	Ref.	Ref.	Ref.									
		< 50 km/h	-1,151 **			-0,426 0,089 0,099	-1,116 **		-0,847 *								
N _{FLSA}	Anzahl LSA (Querungsanlage)	FLSA/km		0,327 **		0,196 **	0,292 *										
N _{AKP, VZ}	Anzahl Anschlussknotenpunkte Vorfahrtzeichen	AKP/km			0,078 **												
	n _{Stellen}		165	39	165	39	165	39	165	39	165	39	165	39			
	n _{Unfälle}		191	111	251	129	355	94	106	46							
	Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson)		3,43	3,64	3,00	6,59	12,78	5,37	7,39	3,61							
	Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson)		1,60	1,34	1,67	2,40	1,31	1,21	1,41	1,06							
	erklärte Varianz		75%	87%	67%	75%	97%	95%	94%	98%							
	AIC		407	136	493	166	366	113	331	92							

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001
 Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

Das Merkmal Gleise ist in den Teilmodellen Unfalltyp 1 (Fahrnfälle) sowie Unfalltyp 7 (Sonstige Unfälle) auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen signifikant (vgl. Anlage 15, Tab.-A 14 und Anlage 21, Tab.-A 26). Hinsichtlich des Unfalltyps 4 (Überschreiten-Unfälle; vgl. Anlage 18) zeigen vor allem die Anzahl der Strab-Haltestellen in Mittellage ($N_{\text{StrabHST, Mitte}}$) sowie überfahrbares Kap ($N_{\text{StrabHST, KapÜ}}$) und die Anzahl der Fußgängerüberwege ($N_{\text{FGÜ}}$) eine unfallerhöhende Wirkung auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen (siehe Tab.-A 20).

Der Anteil an der erklärten Varianz der einzelnen Merkmale innerhalb der Teilmodelle für die Unfalltypen 2 (Abbiege-Unfälle), 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle), 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) und 6 (Unfälle im Längsverkehr), jeweils differenziert nach Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen sowie Schutzstreifen zeigt Bild 8-8. Die Merkmale wurden dabei absteigend nach der Anzahl der Teilmodelle, in denen sie jeweils signifikant sind, sortiert. Dabei ist festzustellen, dass die den mit Abstand größten Erklärungsgehalt aufweist Radverkehrsstärke ($DTV_{\text{Rf, Fb, QS}}$ und $DTV_{\text{Rf, Ges, QS}}$; wurden der Übersicht halber in Bild 8-8 zusammengefasst). So werden im Mittel über alle Unfalltypen 86 % (Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen) bzw. 70 % (Abschnitte mit Schutzstreifen) der systematischen Varianz (ohne nicht erklärten Anteil) allein durch die Radverkehrsstärke erklärt. Hinsichtlich der weiteren Merkmale zeigt sich Folgendes:

- Die zulässige Geschwindigkeit (v_{zul}) ist in 4 der 8 Teilmodelle bei einem durchschnittlichen Erklärungsgehalt von 4 % enthalten. Der höchste Erklärungsgehalt wird in den Teilmodellen Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle) und 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) der Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen mit jeweils 6 % erreicht.
- Der Anteil Länge Geschäftsbesatz ist in 4 der 8 Teilmodelle bei einem durchschnittlichen Erklärungsgehalt von 6 % enthalten. Der höchste Erklärungsgehalt wird innerhalb des Teilmodells Unfalltyp 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) der Abschnitte mit Schutzstreifen mit 18 % erreicht. Dies wird, wie bereits erwähnt, darauf zurückgeführt, dass das Merkmal in diesem Modell stellvertretend für die Anzahl der Ein- und Ausparkvorgänge steht.
- Die Anzahl der Lichtsignalanlagen als Querungsanlage bzw. nicht vollständig signalisierte Knotenpunkte (N_{FLSA}) ist in 3 der 8 Teilmodelle bei einem durchschnittlichen Erklärungsgehalt von 12,5 % enthalten. Der höchste Erklärungsgehalt wird in dem Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle) der Abschnitte mit Schutzstreifen erreicht (25 %).
- Der Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($A_{\text{Fb, QS}}$; nur Verbindung mit der Exposition $DTV_{\text{Rf, Ges, QS}}$; DTV aller Radfahrenden im Querschnitt) ist in 2 der 8 Teilmodelle bei einem durchschnittlichen Erklärungsgehalt von 10 % enthalten. Der höchste Erklärungsgehalt wird in dem Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle) der Abschnitte mit Schutzstreifen mit 19 % erreicht.
- Das Vorhandensein einer baulichen Mittelrennung (MT) ist in den Teilmodellen des Unfalltyps 2 (Abbiege-Unfälle) bei einem durchschnittlichen Erklärungsgehalt von 7 % enthalten. Der höchste Erklärungsgehalt wird in dem Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle) der Abschnitte mit Schutzstreifen mit 12 % erreicht.
- Die Merkmale Anteil Länge ruhender Verkehr (AL_{rv}) sowie Anzahl der vorfahrtschweigend geregelten Anschlussknotenpunkte ($N_{\text{AKP, vZ}}$) sind jeweils nur in einem Teilmodell erhalten, erklären aber mit 27 % bzw. 16 % einen vergleichsweise hohen Anteil der Varianz.

Die Gegenüberstellung der berechneten und empirischen Unfallzahlen (vgl. Anlage 16: Bild-A 18 und Bild-A 19 für Unfalltyp 2, Anlage 17: Bild-A 20 und Bild-A 21 für Unfalltyp 3, Anlage 19: Bild-A 24 und Bild-A 25 für Unfalltyp 5 und Anlage 20: Bild-A 26 und Bild-A 27 für Unfalltyp 6) weist bei RMSE-Werten zwischen $0,5 U_{\text{Rf}}(P)$ und $1,2 U_{\text{Rf}}(P)$ auf eine vergleichsweise gute Anpassung der Teilmodelle hin, wobei bei den Unfalltypen 2 (Abbiege-Unfälle) und 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle) die Teilmodelle der Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen und bei den Unfalltypen 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) und 6 (Unfälle im Längsverkehr) die Teilmodelle der Abschnitte mit Schutzstreifen einen leicht geringeren RMSE-Wert aufweisen. Die entsprechenden CURE-Plots (ebenfalls in den o.g. Abbildungen zu finden) können dies bestätigen, da die kumulativen Kurven bei allen genannten Teilmodellen bis zu einer Radverkehrsstärke von etwa 2.000 Rf/ 24 h gleichmäßig um Null oszillieren.

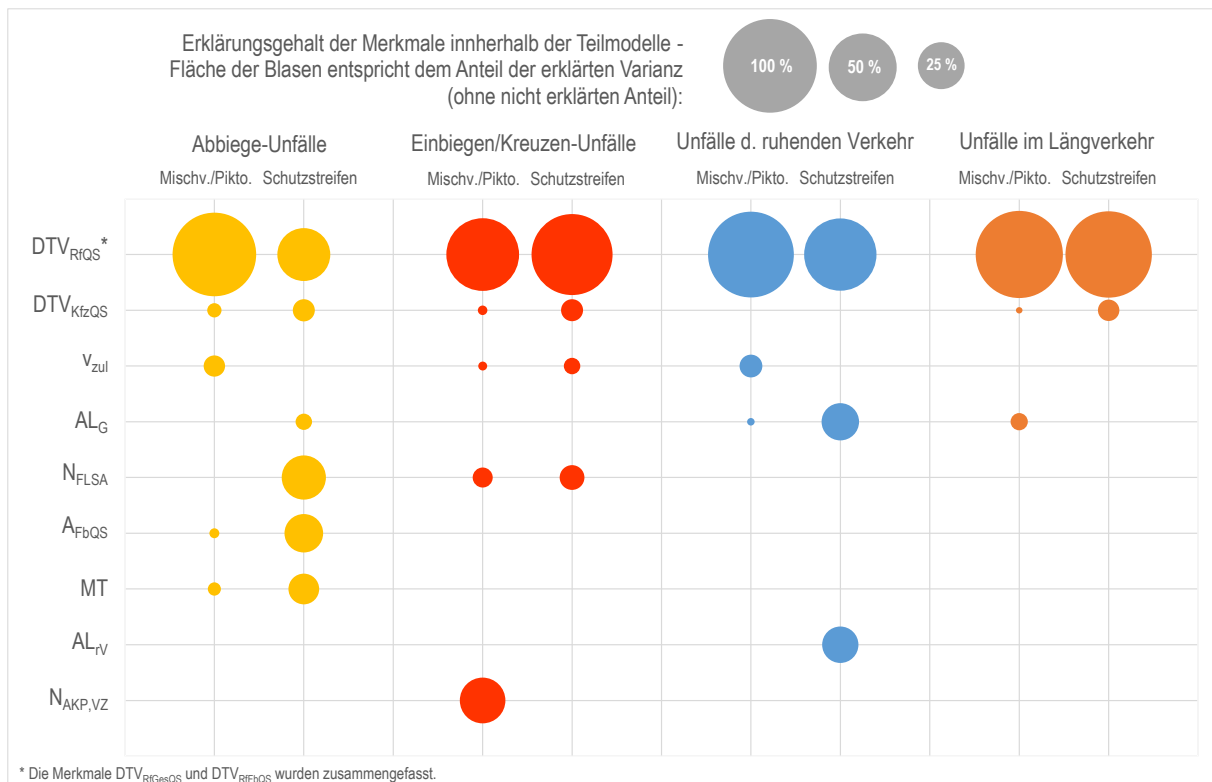


Bild 8-8 Erklärungsgehalt der Merkmale innerhalb der Teilmodelle differenziert nach Radverkehrsführungsform und Unfalltypen

8.5 Modellanwendung Radverkehrsunfälle in Abhängigkeit ausgewählter Merkmale

Analog zur Modellanwendung im Rahmen des Anteils der Fahrbahnnutzung sollen auch auf Basis des Radunfallgeschehens Erkenntnisse abgeleitet werden, unter welchen gestalterischen, betrieblichen und verkehrlichen Bedingungen ein möglichst hohes Verkehrssicherheitsniveau erreicht wird. Da sowohl Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen als auch solche mit Schutzstreifen betrachtet werden sollen, werden die entsprechenden Teilmodelle (vgl. Kapitel 8.4.2 und 8.4.3) angewendet. Dies ist damit zu begründen, dass Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen und Abschnitte mit Schutzstreifen deutliche Unterschiede in der Unfallstruktur aufweisen (vgl. Kapitel 8.1). Dies führt in der Folge dazu, dass innerhalb der Teilmodelle unterschiedliche Merkmale signifikant sind, und Merkmale, die in beiden Teilmodelle signifikant sind, unterschiedlich auf das Unfallgeschehen wirken.

Einschränkend ist zu erwähnen, dass die Fahrstreifenanzahl (in Verbindung mit der Kfz-Verkehrsstärke auf dem rechten Fahrstreifen) in beiden Teilmodellen (wie auch im Gesamtmodell) nicht signifikant ist. Um die Anzahl der Abschnitte, insbesondere derer mit Schutzstreifen nicht zu reduzieren, wurden innerhalb der Modellierung dennoch zwei- und vierstreifige Abschnitte betrachtet (vgl. Kapitel 8.4.2 und 8.4.3), wobei zu berücksichtigen ist, dass das Kollektiv zu 80 % durch zweistreifige Abschnitte repräsentiert wird (vgl. Kapitel 8.2, Tab. 8-2). Die folgenden Ausführungen werden daher vorrangig auf zweistreifige Abschnitte bezogen – nach FGSV (2010a, S. 22) sollte die Führung mit Mischverkehr auf vierstreifigen Abschnitten ohnehin nicht zu Anwendung kommen (vgl. Kapitel 3.1).

In Anlehnung an die bisherigen Vorgaben nach FGSV (2010a) und zur Modellanwendung im Rahmen des Anteils der Fahrbahnnutzung (vgl. Kapitel 7.5) werden mit Hilfe der Teilmodelle Unfallraten in Abhängigkeit der Kfz-Verkehrsstärke und der zulässigen Geschwindigkeit für Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen ermittelt. Im Teilmodell der Abschnitte mit Schutzstreifen hat die zulässige Geschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss. Für die Anwendung der Teilmodelle werden hinsichtlich der weiteren Variablen (ähnlich dem Vorgehen bei der Modellanwendung im Rahmen des Anteils der Fahrbahnnutzung; vgl. Kapitel 7.5) die folgenden Festlegungen getroffen:

Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme:

- Mittlere Radverkehrsstärke ($DTV_{Rf, Ges}$) auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen = 629 Rf/24 h: Anhand des Teilmodells hat sich gezeigt, dass die Radverkehrsstärke einen signifikanten, positiv-degressiven Einfluss auf das Unfallgeschehen besitzt – den sog. Safety-in-Numbers-Effekt. Da je nach Führungsform separate Modelle angewendet werden, wird (im Gegensatz zur Modellanwendung im Rahmen des Anteils der Radfahrenden auf der Fahrbahn; vgl. Kapitel 7.5) die mittlere Radverkehrsstärke je nach Führungsform differenziert betrachtet und jeweils als Konstante berücksichtigt. Zur Quantifizierung/Visualisierung des Safety-in-Numbers-Effekts bzw. dem Einfluss der Radverkehrsstärke auf die UR(P) erfolgt eine separate Auswertung (siehe Bild 8-10).
- Mittlerer Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($A_{Fb, QS}$) auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen = 78 %: Da in Kapitel 7.3.1 gezeigt werden konnte, dass sich Abschnitte mit Mischverkehr und Abschnitte mit Schutzstreifen hinsichtlich des Anteils der Radfahrenden auf der Fahrbahn signifikant unterscheiden, wird der mittlere Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn nur auf Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen bezogen. Der mittlere Anteil wird gewählt, um Abschnitte mit hoher und niedriger Akzeptanz zu berücksichtigen.
- Mittlere Fußverkehrsstärke ($DTV_{Fg, QS}$) = 1.741 Fg/24 h: Die Mittelwertbildung erfolgt hier über alle Abschnitte, da zwischen dem betrachteten Merkmal und der Radverkehrsführungsform kein Zusammenhang besteht und eine möglichst hohe Bandbreite abgedeckt werden soll.
- Nutzbare Fahrstreifenbreite ($B_{FS, KLS (MV, Picto)} \leq 3,50$ m): Das Teilmodell weist lediglich für Abschnitte $> 3,50$ m bzw. $\leq 3,50$ m einen Einfluss auf das Unfallgeschehen nach. Da ab einer Fahrstreifenbreite von $> 3,50$ m mindestens die Führung auf Schutzstreifen in Frage kommt, werden im Rahmen der Anwendung nur Abschnitte mit einer $B_{FS, KLS (MV, Picto)} \leq 3,50$ m betrachtet
- Mittleres Vorhandensein von Gleisen im Mischverkehr (Gleise) = 0,13: Die Mittelwertbildung erfolgt hier über Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen, da dieses Merkmal auch nur da vorkommen kann. Das Ergebnis der Modellierung hat zwar gezeigt, dass die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr bei Vorhandensein von Gleisen nicht zu empfehlen ist. Um diese Konstellation, die vor allem im Bestand eine Relevanz hat dennoch zu berücksichtigen, wird hier der Mittelwert von 0,13 verwendet.
- Mittlere Anzahl der Knotenpunktarme (N_{KPA}) = 13,25 KPA/km: Die Mittelwertbildung erfolgt hier über alle Abschnitte, da zwischen dem betrachteten Merkmal und der Radverkehrsführungsform kein Zusammenhang besteht und eine möglichst hohe Bandbreite abgedeckt werden soll.

Teilmodell Schutzstreifen:

- Mittlere Radverkehrsstärke ($DTV_{Rf, Ges}$) auf Abschnitten mit Schutzstreifen = 1.128 Rf/24 h: Erläuterung siehe Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme:
- Mittlerer Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn ($A_{Fb, QS}$) auf Abschnitten mit Schutzstreifen = 85 %: Der mittlere Anteil wird hier nur auf Abschnitte mit Schutzstreifen bezogen (Erläuterung siehe Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme).
- Mittlerer Umfeldfaktor (UF) = 1,53: Die Mittelwertbildung erfolgt hier über alle Abschnitte, da zwischen dem betrachteten Merkmal und der Radverkehrsführungsform kein Zusammenhang besteht und eine möglichst hohe Bandbreite abgedeckt werden soll.
- Radverkehrsführungsform (RVF) = Schutzstreifen beidseitig: Da einseitige Schutzstreifen der Regelfall nach FGSV (2010a, S. 22 ff.) sind, wird die Modellanwendung nur auf beidseitige Schutzstreifen bezogen.
- Mittlere Anzahl der LSA als Querungsanlage (bzw. nicht vollständig signalisierte Knotenpunkte) (N_{FLSA}) = 1,48 QA/km: Die Mittelwertbildung erfolgt hier über alle Abschnitte, da zwischen dem betrachteten Merkmal und der Radverkehrsführungsform kein Zusammenhang besteht und eine möglichst hohe Bandbreite abgedeckt werden soll.

Bild 8-9 zeigt das Ergebnis der Modellanwendung in Form von auf die Radverkehrsstärke bezogenen Unfallraten der Unfälle mit Personenschaden ($UR_{Rf}(P)$) in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform (Mischverkehr/ Piktogramme, Schutzstreifen), Kfz-Verkehrsstärke (DTV_{Kfz}) und der zulässigen Geschwindigkeit (v_{zul}). Zur Einordnung ist zusätzlich

- der Median der Unfallraten im Kollektiv (als durchschnittliches Verkehrssicherheitsniveau; $Q50-UR_{Rf}(P) \approx 10 UR_{Rf}(P) / (10^6 Rf \cdot km)$) sowie
- die Unfallrate, die von einem Drittel der Abschnitte im Kollektiv nicht überschritten wird (als mögliche Verbesserung des Verkehrssicherheitsniveaus; $Q33-UR_{Rf}(P) \approx 7 UR_{Rf}(P) / (10^6 Rf \cdot km)$),

dargestellt. Diese Werte gelten als Orientierung und sind vor dem Hintergrund normativer und politischer Aspekte zu diskutieren. Grundsätzlich bietet die Darstellung auch die Möglichkeit, Empfehlungen auf Basis eines höheren Verkehrssicherheitsniveaus abzuleiten.

Bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h und unter der Voraussetzung, dass $Q50-UR_{Rf}(P) \approx 10 UR_{Rf}(P) / (10^6 Rf \cdot km)$ nicht überschritten werden soll, zeigt sich, dass die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr bis zu einem DTV_{Kfz} von ca. 3.000 Kfz/24 h empfohlen werden sollte. Nach FGSV (2010a, S. 22) beträgt der Grenzwert hinsichtlich des $DTV_{Kfz} = 4.000$ Kfz/24 h. Soll das Verkehrssicherheitsniveau auf $Q33-UR_{Rf}(P) \approx 7 UR_{Rf}(P) / (10^6 Rf \cdot km)$ erhöht werden, ist die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr bei einer $v_{zul} = 50$ km/h nicht zu empfehlen – die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Abschnitten mit Mischverkehr sollte reduziert werden.

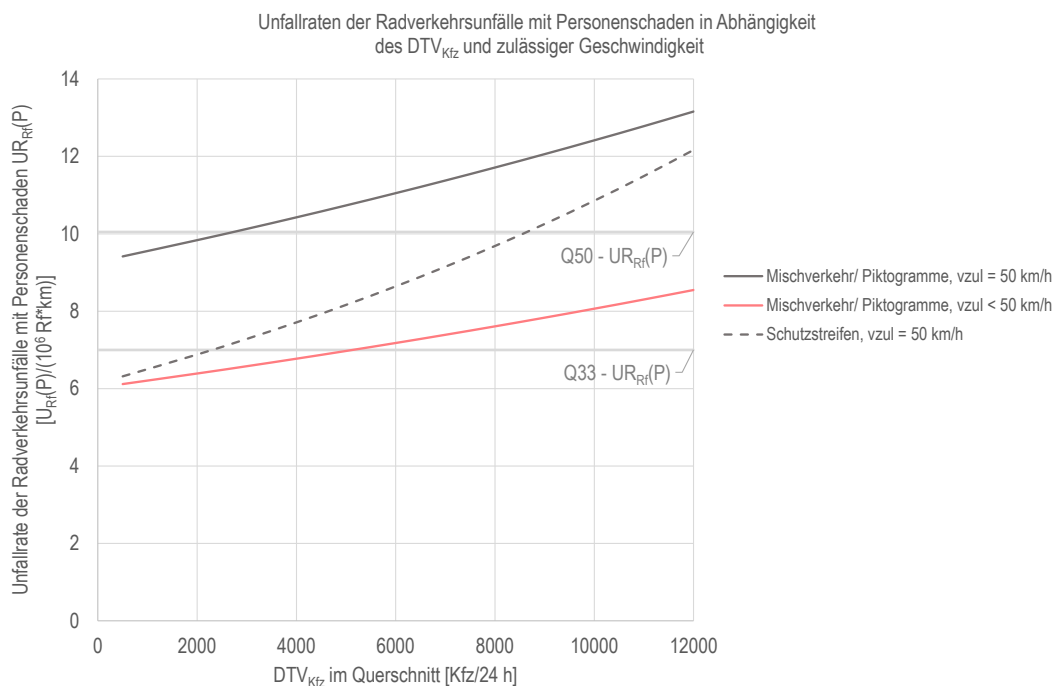


Bild 8-9 Unfallraten in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform, Kfz-Verkehrsstärke und der zulässigen Geschwindigkeit

Hinsichtlich der Abschnitte mit Schutzstreifen zeigt sich (ohne Differenzierung nach v_{zul}), dass diese ein höheres Verkehrssicherheitsniveau aufweisen als Abschnitte mit Mischverkehr ($v_{zul} = 50$ km/h) – allerdings nimmt dieser Unterschied im Verkehrssicherheitsniveau mit zunehmender Kfz-Verkehrsstärke ab. Soll eine $Q50-UR_{Rf}(P) = 10,05 UR_{Rf}(P) / (10^6 Rf \cdot km)$ nicht überschritten werden, sollten Schutzstreifen bis zu einem $DTV_{Kfz} = 9.000$ Kfz/ 24 h zur Anwendung kommen – nach FGSV (2010a, S. 22) liegt dieser Wert derzeit bei 12.000 Kfz/ 24 h. Bei höheren Verkehrsstärken sollte die Anlage von Radfahrstreifen oder Radwegen geprüft werden. Eine Verbesserung des Verkehrssicherheitsniveaus ist auf Basis der angewendeten Modelle nicht darstellbar, da ein Einfluss der zulässigen Geschwindigkeit im Teilmodell Schutzstreifen, wie bereits erwähnt, nicht nachgewiesen werden konnte (vgl. Kapitel 8.4.3). Allerdings hat sich im Teilmodell der Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle ein unfallreduzierender

Einfluss der v_{zul} gezeigt. Da dieser Unfalltyp eine hohe Relevanz auf Abschnitten mit Schutzstreifen besitzt (28 % aller Unfälle auf Abschnitten mit Schutzstreifen; vgl. Bild 8-1), ist davon auszugehen, dass sich mit einer Reduzierung der zulässigen Geschwindigkeit auch auf Abschnitten mit Schutzstreifen das Verkehrssicherheitsniveau erhöhen wird.

Wie bereits erwähnt, wurde in den Kapiteln 8.4.1, 8.4.2 und 8.4.3 festgestellt, dass das Unfallgeschehen unterproportional zu einem zunehmenden Radverkehrsaufkommen steigt – der sog. Safety-in-Numbers-Effekt. Um die zu verdeutlichen zeigt Bild 8-10 die Unfallraten analog zu Bild 8-9 ergänzt um Kurven für unterschiedliche Radverkehrsstärken (500 Rf/ 24 h, 1.000 Rf/ 24 h und 1.500 Rf/ 24 h). Dabei zeigt sich, dass der unterproportionale Zusammenhang zwischen Radverkehrsstärke und Unfallanzahl dazu führt, dass die Unfallraten ($UR(P)$) mit steigenden Radverkehrsaufkommen abnehmen. Dieser Effekt kann grundsätzlich damit erklärt werden, dass ein Individuum als Teil einer größeren Gruppe bzw. mit zunehmender Gruppengröße sicherer ist, bzw. die Wahrscheinlichkeit einen Unfall zu erleiden, sinkt. Ein möglicher Grund ist eine erhöhte Aufmerksamkeit der Kfz-Führenden ggü. Radfahrenden, wenn diese in einer gewissen Anzahl auftreten. Auf Abschnitten mit Schutzstreifen wirkt dieser Effekt stärker, da der Regressionskoeffizient des $DTV_{Rf, QS}$ im Teilmodell Schutzstreifen (vgl. Kapitel 8.4.3) geringer ist, als im Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme (vgl. Kapitel 8.4.2). Eine mögliche These zur Erklärung: Durch die Anlage von Schutzstreifen wird ein Nebeneinanderfahren von Kfz- und Radverkehr gefördert, was wiederum zu Sichtverdeckungen an Grundstückszufahrten, Knotenpunkten oder auch für ein- und ausparkende Kfz führen kann. Ist in solchen Situationen eine hohe Radverkehrsstärke zu verzeichnen, sind Kfz-Führende auch trotz evtl. Sichtverdeckungen sensibilisiert darauf, dass Radfahrende jederzeit „auftauchen“ könnten. Auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen ist es für Radfahrende möglich mittiger zu fahren, so dass sie, auch bei geringer Radverkehrsstärke, eine höhere Präsenz im Straßenraum besitzen.

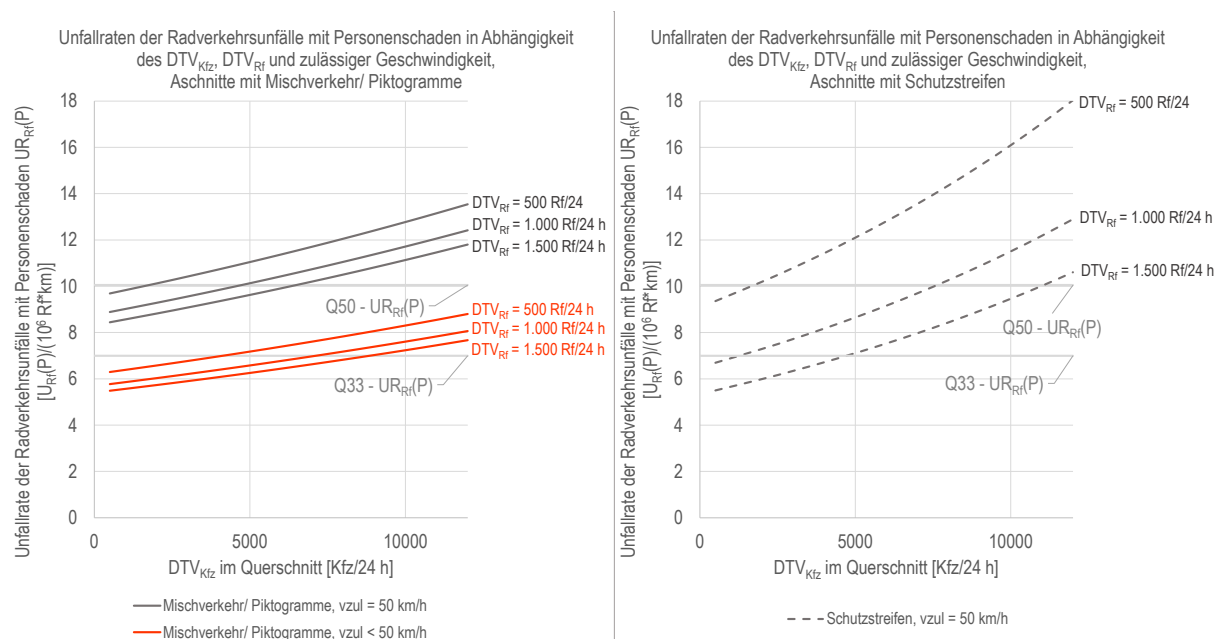


Bild 8-10 Unfallraten in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform, Rad- und Kfz-Verkehrsstärke für Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen (links; zusätzlich in Abhängigkeit der zulässigen Geschwindigkeit) und Abschnitte mit Schutzstreifen (rechts)

Es ist zu berücksichtigen, dass die Analyse nicht den Rückschluss zulässt, dass mit zunehmender Radverkehrsstärke auch eine höhere Kfz-Verkehrsstärke verträglich ist (aus diesem Grund erfolgt auch keine Interpretation der konkreten Werte), da Aspekte wie bspw. der Flächenanspruch oder der Verkehrsablauf nicht betrachtet wurden. Es sollen lediglich Tendenzen aufgezeigt werden, wonach mit einer Attraktivierung des Straßenraumes für den Radverkehr aber auch durch verhaltensbeeinflussende Maßnahmen ein erhebliches Potential besteht, das Verkehrssicherheitsniveau für den Radverkehr zu erhöhen.

8.6 Fazit

Die Analyse des Unfallgeschehens hat gezeigt, dass sich die Unfallstruktur von Abschnitten mit Mischverkehr/Piktogrammen³⁷ und Schutzstreifen deutlich unterscheidet. Während auf Abschnitten mit Mischverkehr/Piktogrammen anteilig mehr Unfälle durch ruhenden Verkehr, Unfälle im Längsverkehr sowie Fahrnfälle registriert wurden, sind auf Abschnitten mit Schutzstreifen deutlich höhere Anteile von Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfällen zu verzeichnen. Außerdem weisen Abschnitte mit Mischverkehr/Piktogrammen einen höheren Anteil von Unfällen zwischen Radfahrenden und Gehenden auf, was auch die Unterschiede im Bereich der Unfalltypen erklärt. Die anteilmäßig relevantesten Unfalltypen über alle Abschnitte sind Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle sowie Unfälle durch ruhenden Verkehr und im Längsverkehr.

Diese Unterschiede resultieren allerdings nicht in einem generell unterschiedlichen Verkehrssicherheitsniveau der Radverkehrsführungsformen, wie die Modellierung über alle Abschnitte ergeben hat. Vielmehr ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der einflussreichen Merkmale bzw. der Wirkung dieser. So zeigt sich grundsätzlich ein höherer Regressionskoeffizient der Radverkehrsstärke auf Abschnitten mit Mischverkehr und Piktogrammen und ein höherer Regressionskoeffizient der Kfz-Verkehrsstärke auf Abschnitten mit Schutzstreifen. Eine mögliche These zu Erklärung dieses Effektes: Im Mischverkehr ohne Schutzstreifen ist der Radverkehr zwar einerseits exponierter ggü. dem Kfz-Verkehr (höherer Regressionskoeffizient der Radverkehrsstärke), andererseits werden Überholungen von Radfahrenden durch Kfz mit zunehmender Kfz-Verkehrsstärke seltener (niedrigerer Regressionskoeffizient der Kfz-Verkehrsstärke; vgl. Ohm et al. 2015, S. 60 ff.). Auf Abschnitten mit Schutzstreifen steht dem Radverkehr zwar eine markierte Fläche zur Verfügung (niedrigerer Regressionskoeffizient der Radverkehrsstärke), diese gewährleistet allerdings auch bei Vorhandensein von Gegenverkehr Überholungen von Radfahrenden durch Kfz. Damit erhöht sich die Anzahl der Interaktionen und kann bei einem Nebeneinanderfahren von Kfz und Radfahrenden zu Sichteinschränkungen an Anschlussknotenpunkten führen (höherer Regressionskoeffizient der Kfz-Verkehrsstärke). Auf Basis der dieser Untersuchung vorliegenden Daten kann diese These nicht abschließend belegt werden – Aufschluss könnte eine Erhebung des Verkehrsverhaltens zu genannten Aspekten geben. Neben den Rad- und Kfz-Verkehrsstärken haben sich auf Abschnitten mit Mischverkehr die folgenden Merkmale als signifikant herausgestellt:

- Fußverkehrsstärke (mehr Unfälle mit zunehmender Fußverkehrsstärke; Teilmodell Mischverkehr/Piktogramme und Teilmodell Unfalltyp 4)
- Anteil Länge Geschäftsbesatz (mehr Unfälle mit zunehmenden Anteil; Teilmodell Unfalltyp 5 und 6)
- Nutzbare Fahrstreifenbreite (mehr Unfälle bei $B_{FS, KLS (MV, Picto)} > 3,50$ m; Teilmodell Mischverkehr/Piktogramme)
- Gleise (mehr Unfälle, wenn Gleise vorhanden sind; Teilmodell Mischverkehr/Piktogramme; sowie Teilmodelle Unfalltyp 1 und 7)
- zulässige Geschwindigkeit (weniger Unfälle bei $v_{zul} < 50$ km/h; Teilmodell Mischverkehr/Piktogramme sowie Teilmodelle Unfalltyp 2, 3 und 5)

³⁷ Eine separate Analyse der Abschnitte mit Piktogrammen konnte aufgrund der geringen Anzahl an Untersuchungsabschnitten mit Piktogrammen (5 von 204) nicht erfolgen.

- Anzahl der Knotenpunktarme (mehr Unfälle mit zunehmender Anzahl; Teilmodell Mischverkehr/ Piktogramme) bzw. konkreter die Anzahl LSA als Querungsanlage bzw. nicht vollständig signalisierte Knotenpunkte und die Anzahl der vorfahrtzeichengeregelten Anschlussknotenpunkte (Teilmodell Unfalltyp 3)

Auf den Abschnitten mit Schutzstreifen haben die folgenden Attribute einen signifikanten Einfluss auf das Unfallgeschehen:

- Umfeldfaktor bzw. Anteil Länge Geschäftsbesatz (mehr Unfälle mit zunehmenden Anteil; Teilmodell Schutzstreifen sowie Teilmodelle Unfalltyp 2 und 5)
- einseitigen Schutzstreifen (mehr Unfälle im Vergleich zu beidseitigen Schutzstreifen; Teilmodell Schutzstreifen)
- Anteil Länge ruhender Verkehr (mehr Unfälle mit zunehmenden Anteil; Teilmodell Unfalltyp 5)
- zulässige Geschwindigkeit (Teilmodell Unfalltyp 3)
- Anzahl LSA als Querungsanlage bzw. nicht vollständig signalisierte Knotenpunkte (mehr Unfälle mit zunehmender Anzahl; Teilmodelle Unfalltyp 2 und 3)

Das Vorhandensein einer baulichen Mitteltrennung hat auf allen Abschnitten einen Einfluss auf Unfälle des Unfalltyps 2.

Im Vergleich zur ersten deskriptiven Einordnung hat sich, abgesehen von der Radverkehrsführungsform, kein signifikanter Einfluss (Signifikanz der Modelleffekte $< 0,1$) der folgenden Attribute auf das Unfallgeschehen ergeben:

- Fahrstreifenanzahl (wird aber durch die Kfz-Verkehrsstärke mittelbar mit abgebildet)
- Schutzstreifenbreite bzw. Breite des Sicherheitsraumes zum ruhenden Verkehr
- Fahrstreifenbreite auf Abschnitten mit Schutzstreifen

Die Modellanwendung der Teilmodelle Mischverkehr/ Piktogramme und Schutzstreifen hat darauf aufbauend ein differenziertes Bild zum Verkehrssicherheitsniveau der Radverkehrsführungsformen in Abhängigkeit der zulässigen Geschwindigkeiten und der Verkehrsstärken ergeben. Die Anwendung der ermittelten Modelle zeigt, dass die Anlage von Schutzstreifen nicht zwangsläufig geeignet ist, um den Radverkehr im Mischverkehr auch bei höheren Verkehrsstärken sicher zu führen, da der Verkehrssicherheitsvorteil ggü. der nicht markierten Führung mit zunehmender Kfz-Verkehrsstärke abnimmt. Neben der Ableitung von Grenzwerten hinsichtlich der Kfz-Verkehrsstärke konnte mit Hilfe der Modellanwendung auch gezeigt werden, dass sich das Verkehrssicherheitsniveau für den Radverkehr deutlich verbessert, je mehr Radfahrende im Straßenbild vorhanden sind – den sog. Safety-in Numbers-Effekt. Dabei zeigt sich ein Rückgang der Unfallrate mit zunehmender Radverkehrsstärke, weil die Unfallzahl unterproportional zur Radverkehrsstärke zunimmt. Der Rückschluss, dass mit einer hohen Radverkehrsstärke auch eine höhere Kfz-Verkehrsstärke verträglich sein kann, ist dabei nicht zulässig. Dieser Zusammenhang zeigt lediglich auf, dass aus einer Attraktivierung des Straßenraumes für den Radverkehr, aber auch durch verhaltensbeeinflussende Maßnahmen ein erhebliches Potential vorhanden ist, das Unfallrisiko für Radfahrende zu reduzieren.

Zusammenfassend zeigt sich somit, dass grundsätzlich schmale Profile ($\leq 7,00$ m) mit niedrigen Geschwindigkeiten ($v_{zul} < 50$ km/ h) und niedriger Kfz-Verkehrsstärke ($DTV_{Kfz} = 6.000$ Kfz/ 24 h) ein hohes Verkehrssicherheitsniveau für Radfahrende im Mischverkehr gewährleisten. Die Anwendung von Schutzstreifen ist bis zu einem $DTV_{Kfz} = 9.000$ Kfz/ 24 h ($v_{zul} = 50$ km/ h) empfehlenswert (durchschnittliches Verkehrssicherheitsniveau), wobei zu berücksichtigen ist, dass dem Modell für Abschnitte mit Schutzstreifen im Vergleich zu nicht markierten Führung deutlich weniger Abschnitte zugrunde liegen. Zur Wirkung von Piktogrammen auf der Fahrbahn ist keine Bewertung möglich, da die Anzahl der Abschnitte mit diesem Merkmal zu gering ist.

9 SYNTHESE

Innerhalb dieses Kapitels werden die Erkenntnisse der Akzeptanzanalyse (siehe Kapitel 7) der Unfallanalyse (siehe Kapitel 8) sowie die Erkenntnisse zur subjektiven Verkehrssicherheit (siehe Kapitel 4.3.1) übergreifend eingeordnet. Diese Einordnung erfolgt vor dem Hintergrund der in der Analyse des Kenntnisstandes formulierten Forschungsfragen (siehe Kapitel 4.4). Dabei ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass innerhalb dieser Arbeit ausschließlich Streckenabschnitte auf Hauptverkehrsstraßen betrachtet wurden.

Wie ist die objektive Verkehrssicherheit unterschiedlicher Mischverkehrsführungen (ohne Markierung, mit Schutzstreifen, mit Piktogrammen) unter Berücksichtigung der Exposition sowie weiterer signifikanter Einflussgrößen zu bewerten?

Ein genereller Unterschied im Verkehrssicherheitsniveau (empirische und auf Basis der Modelle ermittelte Unfallraten der Radverkehrsunfälle mit Personenschaden) zwischen den untersuchten Radverkehrsführungsformen ist grundsätzlich nicht abzuleiten³⁸. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Anlage von Schutzstreifen nicht zweifellos geeignet ist, den Radverkehr auch bei höheren Kfz-Verkehrsstärken sicher zu führen. Unterschiede zwischen den untersuchten Radverkehrsführungen zeigten sich hingegen in der Unfallstruktur sowie daraus resultierend auch hinsichtlich der Wirkung der Exposition und weiterer Einflussgrößen. Die Analyse der Unfallstruktur hat ergeben, dass

- auf Abschnitten ohne Schutzstreifen (Mischverkehr mit und ohne Piktogramme) anteilig mehr Unfälle durch ruhenden Verkehr, Unfälle im Längsverkehr sowie Fahrnfälle auftreten während
- auf Abschnitten mit Schutzstreifen deutlich höhere Anteile von Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfällen registriert wurden.

Hinsichtlich der Exposition zeigt sich ein höherer Regressionskoeffizient der Radverkehrsstärke auf Abschnitten mit Mischverkehr und Piktogrammen und ein höherer Regressionskoeffizient der Kfz-Verkehrsstärke auf Abschnitten mit Schutzstreifen. Woraus dieser Effekt (welcher sich hinsichtlich der Radverkehrsstärke bereits bei Alrutz et al. (2015, S. 58) gezeigt hat) resultiert, ist auf Basis der innerhalb dieser Untersuchung erhobenen Daten nicht abschließend zu klären. Ein möglicher Erklärungsansatz ist der folgende: Im Mischverkehr ohne Schutzstreifen ist der Radverkehr zwar einerseits exponierter ggü. dem Kfz-Verkehr (höherer Regressionskoeffizient der Radverkehrsstärke), andererseits werden Überholungen von Radfahrenden durch Kfz mit zunehmender Kfz-Verkehrsstärke seltener (niedrigerer Regressionskoeffizient der Kfz-Verkehrsstärke; vgl. Ohm et al. 2015, S. 60 ff.). Auf Abschnitten mit Schutzstreifen steht dem Radverkehr zwar eine markierte Fläche zur Verfügung (niedrigerer Regressionskoeffizient der Radverkehrsstärke), diese ist aber einerseits im Vergleich zu Radverkehrsanlagen schmal und gewährleistet andererseits auch bei Vorhandensein von Gegenverkehr Überholungen von Radfahrenden durch Kfz. Damit erhöht sich die Anzahl der Interaktionen insgesamt und kann bei einem Nebeneinanderfahren von Kfz und Radfahrenden zu Sichteinschränkungen an Anschlussknotenpunkten führen (höherer Regressionskoeffizient Kfz-Verkehrsstärke). Betrachtet man vor diesem Hintergrund die Modellanwendung in Abhängigkeit von der Radverkehrsführungsform und der Kfz-Verkehrsstärke zeigt sich, dass der Verkehrssicherheitsvorteil (Differenz der Unfallraten) von Schutzstreifen ggü. der nicht markierten Führung mit zunehmender Kfz-Verkehrsstärke deutlich abnimmt.

Wesentliche Unterschiede hinsichtlich weiterer Einflussgrößen ergeben sich insbesondere zur zulässigen Geschwindigkeit, zur Fahrstreifenbreite und dem Vorhandensein von Gleisen:

³⁸ Dabei ist zu berücksichtigen, dass lediglich 5 der insgesamt 204 analysierten Untersuchungsstrecken Piktogramme aufweisen, so dass eine abschließende Aussage zur Verkehrssicherheitswirkung dieser Markierungsform nicht abgeleitet werden konnte. Bei der Analyse des Unfallgeschehens wurden daher Abschnitte mit Mischverkehr mit und ohne Piktogrammen zusammengefasst – so auch in den folgenden Ausführungen.

- Dabei ist der Zusammenhang, wonach dem Vorhandensein von Gleisen bei Schutzstreifen kein Einfluss nachgewiesen wurde, plausibel und hinsichtlich der Erklärung trivial, weil dem Radverkehr eine Fläche abseits der Gleise zur Verfügung steht.
- Der zulässigen Geschwindigkeit, konnte im Gesamtmodell, im Teilmodell Mischverkehr/Piktogramme sowie bei 4 der 7 Teilmodelle zu den Unfalltypen für Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogrammen ein signifikanter Einfluss auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden (Reduzierung der Unfallzahl durch eine $v_{zul} < 50$ km/h) – für Abschnitte mit Schutzstreifen lediglich im Teilmodell für Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle. Auch hinsichtlich diesen Aspektes ist eine abschließende Erklärung auf Basis dieser Untersuchung nicht möglich. Ein möglicher Erklärungsansatz könnte sein, dass Radfahrende im Mischverkehr ohne Schutzstreifen ggü. dem Kfz-Verkehr exponierter sind und sich ein geringes Geschwindigkeitsniveau dadurch auch auf unterschiedliche Unfalltypen auswirkt – dafür spricht auch die Erkenntnis, dass der zulässigen Geschwindigkeit im Teilmodell der Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle für Abschnitte mit Schutzstreifen ein signifikanter Einfluss nachgewiesen werden konnte. Denn während das Verkehrsgeschehen zwischen Knotenpunkten durch die markierte Fläche für den Radverkehr weitestgehend parallel abläuft, ist an Grundstückszufahrten oder Anschlussknotenpunkten auch bei Schutzstreifen eine stärkere Exponiertheit der Radfahrenden ggü. Kfz vorhanden. Die Modellanwendung ergibt, dass mit einer zulässigen Geschwindigkeit von < 50 km/h das Verkehrssicherheitsniveau auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen deutlich erhöht werden kann.
- Der nutzbaren Fahrstreifenbreite konnte lediglich auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen ein Einfluss nachgewiesen werden, wonach eine nutzbare Fahrstreifenbreite $> 3,50$ m ($B_{FS, KLS (MV, Pkto)}$) die Anzahl der Unfälle im Vergleich zu schmalen Querschnitten erhöht. Dies könnte damit erklärt werden, dass auf breiteren Querschnitten Rad- und Kfz-Verkehr häufiger nebeneinander fahren (Einfluss auf Interaktionen und Sicht an Knotenpunkten) und dass sich die tatsächlichen Geschwindigkeiten der Kfz mit zunehmender Fahrbahnbreite erhöhen, was zumindest mittelbar auch einen Einfluss auf das Unfallgeschehen haben kann (Schüller 2010, S. 135.).

Den Merkmalen zum ruhenden Verkehr konnte lediglich im Teilmodell der Unfälle durch ruhenden Verkehr (Unfalltyp 5) auf Abschnitten mit Schutzstreifen (in Form des Anteils von ruhendem Verkehr an der Gesamtlänge) ein Einfluss nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis ist umso bemerkenswerter, da etwa ein Drittel aller $U_{Rf(P)}$ auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen Unfälle durch ruhenden Verkehr sind. Nach Schüller et al. (2020b, S. 70) sind ein Großteil dieser Unfälle Dooring-Unfälle. Dass Merkmale zum ruhenden Verkehr nur im Teilmodell der Abschnitte mit Schutzstreifen einen signifikanten Einfluss haben, könnte darauf zurückgeführt werden, dass bei Vorhandensein eines Schutzstreifens in der Mehrzahl der Situationen nur geparkt oder gehalten wird, wenn dafür Flächen neben dem Schutzstreifen baulich oder markiert zur Verfügung stehen. Auf Abschnitten mit Mischverkehr finden ggf. häufiger auch Ein- und Ausparkvorgänge am Fahrbahnrand (im Halte- oder Parkverbot) statt, ohne dass dafür Flächen ausgewiesen sind. Unabhängig davon konnte Merkmalen zur Lage und Art des ruhenden Verkehrs in keinem Modell ein Einfluss nachgewiesen werden. Der Grund hierfür könnte sein, dass nicht allein das Vorhandensein, die Art und die Lage des ruhenden Verkehrs einen Einfluss haben, sondern diese vor allem in Verbindung mit der jeweils vorherrschenden Parkwechselfrequenz (Anzahl der Ein- und Ausparkvorgänge) wirken – Daten zur Parkwechselfrequenz wurden im Rahmen vorliegender Untersuchung nicht erhoben. Allerdings hat sich gezeigt, dass der Anteil der Länge des Geschäftsbesatzes an der Gesamtlänge sowohl auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen als auch auf Abschnitten mit Schutzstreifen einen signifikanten Einfluss auf Unfälle mit ruhendem Verkehr hat. Das stützt o.g. These, da davon ausgegangen werden, dass sich mit zunehmenden Geschäftsbesatz auch die Parkwechselfrequenz erhöht.

Unabhängig von der Radverkehrsführungsform haben sich innerhalb der Modelle die Anzahl der Anschlussknotenpunkte mit Vorfahrtzeichenregelung sowie unvollständig signalisierte Knotenpunkte als auffällig erwiesen (zunehmende Unfallzahl mit zunehmender Anzahl der entsprechenden Knotenpunkte). Der Anzahl der Grundstückszufahrten konnte hingegen kein Einfluss auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden.

Welchen Einfluss haben kritische Profile (Fahrbahnbreite = 6,00 m bis 7,00 m) bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen (vor dem Hintergrund der Vorgaben aus FGSV (2010a) und FGSV (2006)) sowie Sicherheitstrennstreifen auf Abschnitten mit Schutzstreifen auf das Unfallgeschehen?

Sowohl im nationalen als auch internationalen Raum kommen Empfehlungen für Fahrbahnbreiten bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr zum Einsatz, die zwischen schmalen (Überholungen von Radfahrenden durch Pkw bei Gegenverkehr nicht möglich) und breiten Profilen (Überholungen von Radfahrenden durch Pkw bei Gegenverkehr möglich) differenzieren. Dabei zeigen sich im internationalen Vergleich aber z.T. deutliche Unterschiede hinsichtlich der entsprechenden Breitenempfehlungen (siehe Kapitel 3.2, Tab. 3-3). Hintergrund im nationalen Raum ist die Definition „kritischer“ Fahrbahnbreiten zwischen 6,00 m und 7,00 m, da diese zwar einerseits eine Möglichkeit des Überholens auch bei Gegenverkehr suggerieren können, diese Überholungen aber andererseits nicht mit Einhaltung eines ausreichenden Sicherheitsabstandes möglich sind (FGSV 2006, S. 83). Diese Definition basiert auf Erkenntnissen von (Reichenbach und Affolter) (2003, S. 46), wonach der Anteil kritischer Überholabstände auf Streckenabschnitten mit einer Fahrbahnbreite von 6,30 m bis 6,50 m mit Abstand am größten ist. Auf das Unfallgeschehen ist den kritischen Profilen hingegen kein Einfluss nachzuweisen, obwohl mehr als die Hälfte aller Abschnitte mit Mischverkehr ohne Schutzstreifen die „kritische“ Profillbreite bei einem mittleren DTV_{Kfz} von etwa 7.600 Kfz/24 h aufweisen – nach FGSV (2010a, S. 22) sind diese Profile bei > 4.000 Kfz/24 h problematisch (siehe Kapitel 3.1, Tab. 3-1). Vielmehr sind es nutzbare Fahrstreifenbreiten von > 3,50 m, die die Unfallzahl signifikant erhöhen. Auf breiteren Querschnitten fahren Rad- und Kfz-Verkehr häufiger nebeneinander (bzw. finden Überholungen statt; vgl. Ohm et al. 2015, S. 61). Die dadurch zunehmende Zahl an Interaktionen kann die Wahrscheinlichkeit auf Unfälle erhöhen und einen Einfluss auf die Sicht an Knotenpunkten haben (vgl. Erläuterung zum Einfluss der Kfz-Verkehrsstärke).

Der Breite markierter Sicherheitsräume bei Schutzstreifen konnte innerhalb der Modellierung kein signifikanter Einfluss auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden. Die deskriptive Analyse zeigt darüber hinaus, dass mit zunehmender Breite der markierten Sicherheitsräume bei Schutzstreifen auch die Unfallraten zunehmen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Gruppe mit einem Sicherheitsraum zum ruhenden Verkehr > 0,5 m lediglich durch 4 Untersuchungsabschnitte repräsentiert wird. Darüber hinaus ist nicht auszuschließen, dass (breitere) Sicherheitsräume auf Abschnitten markiert wurden, weil das Unfallgeschehen auffällig war. Der angestrebte Betrachtungszeitraum des Unfallgeschehens von 5 Jahren stellt zudem einen Kompromiss zwischen einer hohen Stabilität des Mittelwertes und der Minimierung verkehrlicher oder baulicher Veränderungen innerhalb des Zeitraumes dar – ganz auszuschließen sind infrastrukturelle Veränderungen allerdings nicht.

Wie ist die Akzeptanz unterschiedlicher Mischverkehrsführungen (ohne Markierung, mit Schutzstreifen, mit Piktogrammen) unter der Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen zu bewerten?

Innerhalb der Analyse der Akzeptanz wurde grundsätzlich unterschieden zwischen

- dem Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn an allen Radfahrenden sowie
- dem Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg an allen Radfahrenden in der entsprechenden Richtung.

Dabei wurden hinsichtlich der Einflussfaktoren auf die o.g. Anteile auch unterschiedliche Ergebnisse ermittelt:

Sowohl die Markierung von Piktogrammen als auch von Schutzstreifen führen im Vergleich zum Mischverkehr ohne Markierungen etwa im gleichen Maße zu einer signifikanten Erhöhung des Anteils der Radfahrenden auf der Fahrbahn. Allerdings hat die Analyse des Unfallgeschehens auch gezeigt, dass Schutzstreifen nicht geeignet sind, um den Radverkehr im Mischverkehr auch bei höheren Kfz-Verkehrsstärken sicher zu führen. Unabhängig davon zeigt sich, dass mit zunehmender Gesamtverkehrsstärke der Radfahrenden der Anteil der Fahrbahnnutzung erhöht – ein sog. Acceptance-in-Numbers-Effekt. Darüber hinaus wirkt sich ein geringes Geschwindigkeitsniveau (zulässige Geschwindigkeit < 50 km/h) sowie eine hohe Dichte lichtsignalgeregelter Querungsmöglichkeiten positiv auf den Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn aus. Die differenzierte Betrachtung der Abschnitte mit

Mischverkehr/ Piktogrammen sowie mit Schutzstreifen zeigt aber auch, dass Einflüsse auf Abschnitten mit Schutzstreifen teilweise andere sind oder anders wirken, als im Mischverkehr ohne Schutzstreifen. Das betrifft die nutzbare Fahrstreifen- und Schutzstreifenbreite, die Kfz-Verkehrsstärke und den Schwerverkehrsanteil:

- Auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen ist der Anteil der Fahrbahnnutzung bei schmalen Querschnitten (nutzbare Fahrstreifenbreite < 3,00 m) am höchsten. Mit zunehmender Fahrstreifenbreite reduziert sich der Anteil Radfahrender auf der Fahrbahn. Dabei ist die Reduzierung bei den kritischen Profilen (Fahrstreifenbreite zwischen 3,00 m und 3,50 m) geringfügig höher als bei breiten Profilen. Auf Abschnitten mit Schutzstreifen erhöht sich hingegen der Anteil der Fahrbahnnutzung mit zunehmender nutzbarer Fahrstreifenbreite. Die zusätzliche Berücksichtigung der Schutzstreifenbreite (eine gemeinsame Berücksichtigung der Fahrstreifen- und Schutzstreifenbreite ist aufgrund starker Korrelation nicht möglich) zeigt, dass der Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn mit zunehmender Schutzstreifenbreite zunimmt. Dieser Effekt könnte generell auf die Anzahl der Überholungen bzw. den grundsätzlich unterschiedlichen Verkehrsablauf auf Abschnitten mit und ohne Schutzstreifen zurückgeführt werden. Durch die Anlage von Schutzstreifen wird ein Nebeneinanderfahren von Rad- und Kfz-Verkehr grundsätzlich ermöglicht, und eine breitere nutzbare Fahrstreifenbreite führt ggf. dazu, dass sich die Überholabstände vergrößern. Auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen erhöht sich die Anzahl der Überholungen mit zunehmender nutzbarer Fahrstreifenbreite (vgl. Ohm et al. 2015, S. 62), so dass ein Fahren auf der Fahrbahn als unangenehmer empfunden werden kann. Dass kritische Fahrstreifenbreiten zwischen 3,00 m und 3,50 m den Anteil der Fahrbahnnutzung am stärksten reduzieren, lässt den Rückschluss zu, dass höhere Anteile an kritischen Überholungen (vgl. Reichenbach und Affolter 2003, S. 46) einen Einfluss auf den Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn haben können. Dabei ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass die nutzbare Fahrstreifenbreite auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen nur einen geringen Anteil der Reststreuung erklärt, so dass die o.g. Ausführungen eher Tendenzen beschreiben.
- Die Kfz-Verkehrsstärke weist auf den Abschnitten mit Schutzstreifen einen geringeren Regressionskoeffizienten und Erklärungsgehalt auf, als auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogrammen. Dieser Effekt könnte damit erklärt werden, dass mit dem Vorhandensein von Schutzstreifen eine Fläche für den Radverkehr zur Verfügung steht, die auch bei hohen Kfz-Verkehrsstärken i.d.R. ein Nebeneinanderfahren gewährleistet/ gewährleisten soll. Dies führt im Resultat dazu, dass sich der Anteil der Radfahrenden auf Schutzstreifen erst bei deutlich höheren Kfz-Verkehrsstärken im Vergleich zum Mischverkehr ohne Markierung reduziert.
- Der Schwerverkehrsanteil hat lediglich auf Abschnitten mit Schutzstreifen einen signifikanten Einfluss auf den Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn, was darauf zurückgeführt werden könnte, dass die Überholabstände auf Abschnitten mit Schutzstreifen geringer sind als im Mischverkehr (vgl. Kapitel 4.2.4) und deshalb Schwerverkehrsfahrzeuge einerseits als unangenehmer wahrgenommen werden und andererseits insbesondere bei geringer Fahrstreifenbreite Schutzstreifen zum Teil überfahren müssen.

Zur Einordnung der Erkenntnisse ist zu berücksichtigen, dass sich innerhalb der Modellierung noch ein deutliches Potential hinsichtlich der Modellerklärung gezeigt hat. Das wird darauf zurückgeführt, dass neben den betrachteten (vorrangig infrastrukturellen und betrieblichen) Merkmalen weitere nicht erhobene potentielle Einflussgrößen, wie bspw. personenspezifische Merkmale, einen Einfluss auf die Fahrbahnnutzung haben können. So hat der Erkenntnisstand zur subjektiven Sicherheit und den Präferenzen ergeben (siehe Kapitel 4.3.2), dass selbstbewusste und engagierte Radfahrende das Fahren auf der Fahrbahn ggü. anderen Radverkehrsführungsformen zum Teil bevorzugen (Christmas 2010, S. 60 ff.; Damant-Sirois et al. 2014, S. 1164; Dill und McNeil 2013, S. 14 ff.; Hardinghaus und Cyganski 2019, S. 14; Rossetti et al. 2018, S. 262).

Die Modelle zum Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg weisen im Vergleich zu den Modellen zum Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn einen deutlich geringeren Erklärungsgehalt auf, was zeigt, dass die berücksichtigten infrastrukturellen und betrieblichen Merkmale nur bedingt geeignet sind, dieses Verhalten zu erklären. Vielmehr werden hier vor allem netzplanerische Einflüsse vermutet (vgl. Kapitel 4.2.3). Innerhalb der im

Rahmen dieser Untersuchung erstellten Modelle hat sich gezeigt, dass der Anteil der linksfahrenden Radfahrenden reduziert werden kann, wenn das Geschwindigkeitsniveau gering (< 50 km/h), die Kfz-Verkehrsstärke niedrig und die Radverkehrsstärke (Acceptance-in-Numbers) hoch ist. Umso wichtiger sind die genannten Aspekte, wenn der Anteil des Geschäftsbesatzes an der gesamten Bebauungslänge (auf der linken Straßenseite) hoch ist, denn eine intensive geschäftliche Nutzung im Seitenraum erhöht auch den Anteil der linksfahrenden Radfahrenden auf dem Gehweg.

Welche Erkenntnisse für eine sichere und akzeptierte Führung des Radverkehrs im Mischverkehr lassen sich zusammenfassend ableiten, wobei gleichzeitig Aspekte der subjektiven Sicherheit berücksichtigt werden?

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse hinsichtlich einer sicheren und akzeptierten Führung des Radverkehrs im Mischverkehr zusammengefasst, wobei die Ergebnisse der Modellanwendungen (siehe Kapitel 7.5 und 8.5) sowie der Erkenntnisse zur subjektiven Verkehrssicherheit (siehe 4.3.2) vergleichend gegenübergestellt werden. Die Ausführungen sollten vor dem Hintergrund der den Auswertungen zugrundeliegenden Untersuchungsabschnitte eingeordnet werden, da sowohl regelwerkskonforme als auch nach aktuellem Stand nicht regelwerkskonforme Fälle betrachtet wurden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass innerhalb der Untersuchung lediglich Streckenabschnitte und keine Knotenpunkte detailliert untersucht wurden. Es wird grundsätzlich zwischen den Ergebnissen der Modellanwendung (hinsichtlich Verkehrsstärke und zulässiger Geschwindigkeit) unter Berücksichtigung der Erkenntnisse zur subjektiven Verkehrssicherheit (siehe Tab. 9-1) sowie Aspekten zur Gestaltung (Fahrstreifenbreiten, Schutzstreifenbreiten, Position der Markierung von Piktogrammen und Umgang mit ruhendem Verkehr; siehe Tab. 9-2) unterschieden.

Die Ergebnisse der Modellanwendung (siehe Tab. 9-1) werden in Abhängigkeit der Verkehrsstärke sowie der zulässigen Geschwindigkeit für ein durchschnittliches und ein verbessertes (Potential) Akzeptanz- und Verkehrssicherheitsniveau dargestellt (vgl. Kapitel 7.5 und 8.5). Hierzu ist zu erwähnen, dass die Grenzen insbesondere für die Verkehrssicherheitsniveaus normativ festzulegen sind – für vorliegende Arbeit wurde als durchschnittliches anzustrebendes Verkehrssicherheitsniveau der Median der Unfallraten im Kollektiv ($Q50-UR_{Rf}(P) \approx 10 UR_{Rf}(P) / (10^6 Rf \cdot km)$) und als verbessertes Verkehrssicherheitsniveau die Unfallrate, die von einem Drittel der Abschnitte im Kollektiv nicht überschritten wird ($Q33-UR_{Rf}(P) \approx 7 UR_{Rf}(P) / (10^6 Rf \cdot km)$) gewählt (vgl. Kapitel 8.5). Hinsichtlich der Akzeptanz wird für ein durchschnittliches Niveau ein Anteil der Fahrbahnnutzung durch Radfahrende (A_{Fb}) von 85 % und für ein verbessertes Niveau ein Anteil der Fahrbahnnutzung durch Radfahrende von 90 % zugrunde gelegt (vgl. Kapitel 7.5). Für die übergreifende Bewertung wurde jeweils das Minimum hinsichtlich der Kfz-Verkehrsstärke aus Akzeptanz und Unfallgeschehen gewählt. Die folgenden Ableitungen gelten nur für einstreifige Richtungsfahrbahnen, da insbesondere die Modellanwendung zur Akzeptanz gezeigt hat, dass für zweistreifige Richtungsfahrbahnen mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr kein sinnvoller Bereich hinsichtlich der Kfz-Verkehrsstärke erreicht wird, wonach ein durchschnittlicher Anteil der Fahrbahnnutzung von 85 % gewährleistet werden kann. Aus den im Rahmen dieser Untersuchung analysierten Aspekten sind folgende Erkenntnisse abzuleiten, wobei zur Einordnung zu berücksichtigen ist, dass das Untersuchungskollektiv der Abschnitte mit Schutzstreifen ($n = 39$) und Piktogrammen ($n = 8$) im Vergleich zu den Abschnitten mit Mischverkehr ($n = 160$) unterrepräsentiert ist:

Soll sowohl das Akzeptanz- als auch das Verkehrssicherheitsniveau bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr erhöht werden, erweist sich sowohl eine niedrige zulässige Geschwindigkeit (< 50 km/h) als auch eine geringe Verkehrsstärke (bis 4.000 Kfz/24 h ohne und 6.000 Kfz/24 h mit Piktogrammen) als günstig. Die Führung des Radverkehrs auf Schutzstreifen weist innerhalb der Modellanwendung bis zu einer Verkehrsstärke von 9.000 Kfz/24 h (ohne Schutzstreifen bis 3.000 Kfz/24 h bei $v_{zul} = 50$ km/h) ein durchschnittliches Akzeptanz- und Verkehrssicherheitsniveau auf.

Tab. 9-1 Übersicht Ergebnisse der Modellanwendung zur Akzeptanz und zum Unfallgeschehen sowie wesentliche Erkenntnisse zur subjektiven Verkehrssicherheit auf Streckenabschnitten mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen oder Piktogrammen auf zweistreifigen Hauptverkehrsstraßen

Kriterien		Akzeptanz			Unfälle		Subjektive Verkehrssicherheit und Präferenzen	Übergreifende Bewertung		
		DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]		DTV _{Rad} [Rad/24 h]	DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]			DTV _{Kfz} [Kfz/24 h]		Erläuterungen
Führungsform	v _{zul} [km/h]	A _{Fb} = 85 %	A _{Fb} = 90 %		Q50-UR _{ref} (P)	Q33-UR _{ref} (P)	Durchschnitt	Potential		
Mischverkehr ohne Maßnahmen	< 50	8.000	4.000	Zunahme der Akzeptanz mit zunehmender Radverkehrsstärke (Acceptance-in-Numbers)	8.000 ³⁹	6.000	Unfälle nehmen mit zunehmender Radverkehrsstärke unterproportional zu (Safety-in-Numbers)	8.000	4.000	klare Unterscheidung in der Netzstruktur zwischen Mischverkehr und Radverkehrsanlagen (bei v _{zul} = 50 km/h sollten Radverkehrsanlagen vorhanden sein)
	50	4.000	-		3.000	-				
Schutzstreifen	< 50	14.000	9.000		9.000 ⁴⁰	- ⁴⁰		9.000	- ⁴⁰	Verkehrssicherheitsvorteil (Differenz der Unfallraten) ggü. Mischverkehr ohne Schutzstreifen nimmt mit zunehmender Kfz-Verkehrsstärke ab
	50	10.000	6.000		8.000 ³⁹	6.000				
Piktogramme	< 50	14.000	9.000		8.000 ³⁹	6.000		8.000	6.000	erhöhen die Akzeptanz, das Sicherheitsgefühl und sensibilisieren Kfz-Führende
	50	10.000	6.000		3.000	-				3.000

³⁹ Da auf Basis der Modellanwendung kein realistischer Wert ableitbar ist, entspricht der Wert den bisherigen Empfehlungen nach FGSV (2010a, S. 19).

⁴⁰ Durch das innerhalb der Modellanwendung berücksichtigte Teilmodell sind bei einer v_{zul} < 50 km/h keine Empfehlungen ableitbar. Im Teilmodell der Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle hat sich aber ein unfallreduzierender Einfluss der v_{zul} gezeigt (vgl. Kapitel 8.4.4). Da dieser Unfalltyp eine hohe Relevanz auf Abschnitten mit Schutzstreifen besitzt (28 % aller Unfälle auf Abschnitten mit Schutzstreifen; vgl. Bild 8-1), ist davon auszugehen, dass sich mit einer Reduzierung der zulässigen Geschwindigkeit auch das Verkehrssicherheitsniveau erhöhen wird.

Neben der Kfz-Verkehrsstärke und der zulässigen Geschwindigkeit hat vor allem das Radverkehrsaufkommen einen starken Einfluss auf die Akzeptanz sowie die Verkehrssicherheit, da die Akzeptanz mit steigender Radverkehrsstärke unmittelbar zunimmt (Acceptance-in-Numbers) und das Unfallgeschehen mit zunehmender Radverkehrsstärke unterproportional steigt (Safety-in-Numbers). Kurzum: je mehr Menschen Fahrrad fahren, desto höher ist die Akzeptanz und desto niedriger ist das Unfallrisiko der*des Einzelnen. Ein erhöhtes Akzeptanz- und Verkehrssicherheitsniveau fördert auch die subjektive Verkehrssicherheit, da die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr vor allem für Radfahranfänger*innen eine potenzielle Barriere darstellt (O'Connor und Brown 2010, S. 55) und sich die Mehrzahl der „illegal“ auf dem Gehweg fahrenden Radfahrenden auf der Fahrbahn unsicher fühlt (Schüller et al. 2020b, S. 82 ff.). Zusätzlich zur Reduzierung der Kfz-Verkehrsstärken und zulässigen Geschwindigkeit können Piktogramme auf der Fahrbahn das Verkehrssicherheitsempfinden erhöhen (Birk et al. 2004, S. 15; Koppers et al. 2021, S. 69 ff.; Vasilev et al. 2017, S. 1103), das Verhalten der Kfz-Führenden positiv beeinflussen (anteilig mehr Überholungen mit Fahrstreifenwechseln; es wird eher hintereinander als nebeneinander gefahren; Birk et al. 2004, S. 16; Brady et al. 2010, S. 15; Furth et al. 2011, S. 12; Knoflacher 2014, S. 29 ff.; La Vega 2011, S. 28 ff.; Mills et al. 2010, S. 14; Vasilev et al. 2017, S. 1103) und damit einen Beitrag leisten, dass mehr Menschen auch ohne Radverkehrsanlagen (regelkonform) die Fahrbahn nutzen. Schutzstreifen erhöhen zwar ebenfalls das Verkehrssicherheitsempfinden, was auch durch die Analyse der Akzeptanz verdeutlicht wird. Sie werden von Radfahrenden aber einerseits nicht als vollwertige Radverkehrsanlage wahrgenommen (Dietiker et al. 2012, S. 59; Szeiler und Skoric 2017, S. 7), und haben andererseits auch keinen nachweislichen Einfluss auf das Verhalten der Kfz-Führenden, da diese markierte Fläche ein Nebeneinanderfahren (ohne gegenseitige Verhaltensanpassungen) von Rad- und Kfz-Verkehr ermöglichen soll. Die Analyse des Kenntnisstandes hat allerdings gezeigt, dass die dadurch beförderten Überholungen mit geringen seitlichen Überholabständen erfolgen (Huemer et al. 2018, S. 10; Kaulen et al. 2013, S. 48 ff.; Langer 2016, S. 77; Ohm et al. 2015, S. 63).

Vergleicht man die Ergebnisse zu Akzeptanz und Verkehrssicherheit für die Führung im Mischverkehr ohne Schutzstreifen mit dem Vorgaben im internationalen Regelwerk (vgl. Kapitel 3.2, Tab. 3-2), ähneln die abgeleiteten Werte denen aus den Niederlanden, Großbritannien und Frankreich.

Soll ein durchschnittliches Akzeptanz- und Verkehrssicherheitsniveau gewährleistet werden, unterscheiden sich die Ergebnisse der Modellanwendung zumindest für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen kaum von den Empfehlungen nach FGSV (2010a).

Die Gestaltungsaspekte zu Fahrbahnbreiten, Schutzstreifenbreiten, Aspekten zum Schutz vor ruhendem Verkehr sowie zur Markierung der Piktogramme zeigt Tab. 9-2. Grundsätzlich ergibt sich, dass bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen ausschließlich schmale Profile (< 7,00 m) zur Anwendung kommen sollten. Breitere Fahrbahnen verringern die Akzeptanz und erhöhen die Zahl der Unfälle. Hinsichtlich der „kritischen“ Fahrbahnbreiten zwischen 6,00 m und 7,00 m hat sich kein Einfluss auf Akzeptanz oder Verkehrssicherheit gezeigt.

Für den Umgang mit ruhendem Verkehr (der keinen signifikanten Einfluss auf ermittelten Modelle hat, aber dennoch bei ca. 30 % aller Radverkehrsunfälle bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen involviert ist und die subjektive Sicherheit reduziert) kann, neben einer Reduzierung der Flächen für den ruhenden Verkehr (was wiederum Spielraum für die Anlage von Radverkehrsanlagen bietet), die Markierung von Sicherheitstrennstreifen die Verkehrssicherheit erhöhen. Vor allem dann, wenn im unmittelbaren Umfeld eine intensive Geschäftsnutzung vorhanden ist oder wenn aus anderen Gründen mit einer hohen Parkwechselfrequenz zu rechnen ist. Dabei sollten einfache Schmalstrichmarkierungen oder solche, die der Markierung von Schutzstreifen ähneln, vermieden werden, da diese dazu führen können, dass Radfahrende innerhalb des Sicherheitstrennstreifens fahren (Büttner 2019, S. 95 ff.). Weitere Möglichkeiten könnten angedeutete Sperrflächen sein, wobei hinsichtlich dessen die Konformität nach StVO zu prüfen ist. Darüber hinaus hat die Analyse des Kenntnisstandes gezeigt, dass Piktogramme die seitlichen Abstände Radfahrender zum ruhenden Verkehr erhöhen (Knoflacher 2014, S. 27; Birk et al. 2004, S. 10; Brady et al. 2010, S. 16 ff.; Daff 2013, S. 24 ff.; Furth et

al. 2011, S. 10 ff.; Hunter et al. 2010, S. 73 ff.; Mills et al. 2010, S. 14 ff.; Pein et al. 1999, S. 4; Sando et al. 2014, S. 49 ff.). Daher erweist es sich bei Vorhandensein von ruhendem Verkehr als günstig, die Piktogramme analog zu den Empfehlungen aus Kanada und den USA (vgl. Kapitel 3.2, Tab. 3-2) mit einem Abstand von 3,30 m vom Fahrbahnrand zu markieren. Damit ergibt sich ein Sicherheitsraum zum ruhendem Verkehr von ca. 1,00 m.

Hinsichtlich der Anlage von Schutzstreifen hat sich ergeben, dass sowohl die Breite der Schutzstreifen als auch die Breite der Restfahrbahn einen Einfluss auf die Akzeptanz haben. Demnach erhöht sich die Akzeptanz bei Schutzstreifenbreiten > 1,50 m bzw. Restfahrbahnbreiten von > 4,50 m.

Tab. 9-2 Gestaltungsaspekte für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne und mit Schutzstreifen oder Piktogrammen auf zweistreifigen Hauptverkehrsstraßen

Kriterien	Akzeptanz	Unfälle	Subjektive Sicherheit und Präferenzen	Empfehlungen
Mischverkehr ohne Maßnahmen	Breite schmales Profil	≤ 7,00 m	≤ 7,00 m	≤ 7,00 m (und $v_{zul} < 50$ km/h)
	Breite weites Profil	-	-	-
	ruhender Verkehr	kein Einfluss	kein Einfluss ca. 30 % aller $U_{Rf}(P)$ sind Unfälle durch ruhenden Verkehr	Radfahrende fühlen sich mit parkenden Kfz am Fahrbahnrand unsicherer
Schutzstreifen	Breite Schutzstreifen	> 1,50 m	kein Einfluss	> 1,50 m
	Breite Restfahrbahn	> 4,50 m	kein Einfluss	≥ 4,50 m
	ruhender Verkehr	kein Einfluss	Zunahme der Anzahl der Unfälle mit zunehmenden anteiliger Länge des ruhenden Verkehrs	Reduzierung der Flächen für den ruhenden Verkehr Sicherheitsraum
Piktogramme	Markierung	nicht überprüft	nicht überprüft	≥ 1,30 m vom Fahrbahnrand (vgl. Kapitel 3.2, Tab. 3-2 und Kapitel 4.2.4)
	ruhender Verkehr	kein Einfluss	kein Einfluss	3,30 m vom Fahrbahnrand (vgl. Kapitel 3.2, Tab. 3-2 und Kapitel 4.2.4)

Vor dem Hintergrund der Erkenntnisse, dass insbesondere einer Reduzierung der zulässigen Geschwindigkeit ein signifikant erhöhender Einfluss auf die Akzeptanz und die Verkehrssicherheit nachgewiesen wurde, sollte insbesondere ein rechtlicher Aspekt hinterfragt werden: Die Reduzierung der zulässigen Geschwindigkeit unterliegt dem § 45 Absatz 9 StVO, wonach (ausgenommen von Straßen „im unmittelbaren Bereich von an diesen Straßen gelegenen Kindergärten, Kindertagesstätten, allgemeinbildenden Schulen, Förderschulen, Alten- und Pflegeheimen oder Krankenhäusern, ...“) „Insbesondere Beschränkungen und Verbote des fließenden Verkehrs ... nur angeordnet werden, wenn auf Grund der besonderen örtlichen Verhältnisse eine Gefahrenlage besteht, die das allgemeine Risiko einer Beeinträchtigung der in den vorstehenden Absätzen genannten Rechtsgüter erheblich übersteigt.“ (vgl. Kapitel 2). In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welcher Teil des fließenden Verkehrs angesprochen wird. Denn eine „Beschränkung“ für den Kfz-Verkehr kann bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr zu weniger „Beschränkungen“ für Radfahrende führen – insbesondere vor dem Hintergrund, dass sich Radfahrende bei einer $v_{zul} = 50$ km/h unsicher fühlen, was dazu führt, dass Gehwege „illegal“ benutzt werden oder Radfahrende solche Straßen oder das Radfahren im Generellen meiden. Somit stellt die fehlende „Beschränkung“ für den Kfz-Verkehr eine „Beschränkung“ für den Radverkehr auf der Fahrbahn dar. Das wirft zusammenfassend die Frage auf, ob eine Reduzierung der zulässigen Geschwindigkeit überhaupt den Bestand einer „Beschränkung des fließenden Verkehrs“ erfüllt.

10 METHODISCHE DISKUSSION & AUSBLICK

Eine zentrale methodische Fragstellung der vorliegenden Arbeit betrifft die statistische Verteilung der Anteile Radfahrender auf der Fahrbahn sowie Radfahrender auf linken Gehwegen und damit einhergehend auch die Eignung verschiedener Modellformen zu Erklärung der entsprechenden Anteile. Zur Klärung dieser Frage wurden sowohl die logistische als auch die lineare Regression verwendet, mit dem Resultat, dass beide Modellformen ähnliche Ergebnisse hinsichtlich Wirkung der Variablen erzielen, die logistischen Modelle aber insgesamt eine geringfügig bessere Anpassung erreichen. Außerdem erlaubt die logistische Regression in ihrer Grundform im Gegensatz zur linearen Regression keine Anteile > 1 bzw. < 0 , was der Grundannahme des Untersuchungsgegenstandes besser entspricht. Andererseits ist die Interpretation der Regressionskoeffizienten des logistischen Modells im Vergleich zum linearen Modell weniger intuitiv und damit schwieriger handhabbar: Denn während im linearen Modell eine Änderung der unabhängigen Variablen um eine Einheit auch eine Änderung der abhängigen Variable um den Regressionskoeffizient β_i bewirkt, ist der Einfluss der Änderung der unabhängigen Variable bei der logistischen Regression auch von der abhängigen Variable abhängig. Dennoch wird für ggf. weitere Untersuchungen zur Akzeptanz von Radverkehrsanlagen die Anwendung der logistischen Regression empfohlen, da diese die Grundannahme eines binären Entscheidungsprozesses, wie sie bei vorliegender Untersuchung im Fokus stand, entspricht und deshalb auch geringfügig bessere Ergebnisse erzielt als die lineare Regression.

Ein weiterer Aspekt die logistische Modellierung der Akzeptanz betreffend, ist der Umgang mit Überdispersion innerhalb der Modellierung. Überdispersion heißt, dass die Varianz größer ist, als der Mittelwert, was wiederum zu Ungenauigkeiten bei der Schätzung der Regressionskoeffizienten führen kann (vgl. Kapitel 6.3.1). Gründe für Überdispersion können fehlende Kovariaten, die zur Erklärung der abhängigen Variable beitragen, aber auch Korrelationen zwischen den berücksichtigten unabhängigen Variablen sein. Bezüglich der fehlenden Kovariaten werden

- hinsichtlich des Anteils der Radfahrenden auf der Fahrbahn vor allem personenspezifische Merkmale vermutet, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet wurden (unterschiedliche Typen von Radfahrenden präferieren unterschiedliche Führungsformen; vgl. Kapitel 4.3.2). Ein weiterer nicht berücksichtigter Aspekt könnte die Qualität der Fahrbahnoberfläche sein. Zudem hat sich gezeigt, dass der Anteil Radfahrender auf der Fahrbahn in Oberzentren signifikant höher ist, als in Mittelzentren – ein Zusammenhang zum Modal Split in den Untersuchungsstädten konnte hingegen nicht hergestellt werden, obwohl davon ausgegangen werden kann, dass das Merkmal der Zentralität stellvertretend für weitere Einflüsse steht.
- hinsichtlich des Anteils der Radfahrenden auf linken Gehwegen vor allem netzplanerische Aspekte vermutet (Straßenseiten die Radfahrenden Umwege ersparen oder von denen wichtige Abschnitte abzweigen; vgl. Kapitel 4.2.3).

Eine Möglichkeit die Überdispersion trotz fehlender Kovariaten auszugleichen, ist die Berücksichtigung eines Dispersionsparameters zum Ausgleich des Varianzüberschusses innerhalb der Verteilungsfunktion (vgl. Fahrmeir et al. 2013, S. 279). Diese daraus entstehenden sog. Quasi-binomial-Modelle sind mit der im Rahmen vorliegender Arbeit verwendeten Statistiksoftware nicht anwendbar.

Innerhalb der Modellierung des Unfallgeschehens ist die räumliche Abgrenzung der Untersuchungsabschnitte als grundlegende Eingangsgröße von hoher Bedeutung. Hinsichtlich dessen ergeben sich zwei zu diskutierende Aspekte – die Länge der Untersuchungsabschnitte sowie die Definition homogener Streckenabschnitte:

- Hinsichtlich der Länge der Untersuchungsabschnitte wurde eine Mindestlänge von 150 m zwischen Hauptverkehrsstraßen vorausgesetzt. Damit soll grundsätzlich vermieden werden, dass das Unfallgeschehen auf sehr kurzen Streckenabschnitten auch bei geringer absoluter Unfallanzahl in Relation zur Streckenlänge überschätzt wird. Grundsätzlich gilt aber, dass je länger ein Streckenabschnitt ist, desto stabiler ist auch der Mittelwert (Unfallzahl bezogen auf die Länge). Die gewählte Mindestlänge stellt allerdings einen Kompromiss dar, da sich die Verkehrsstärken (als Exposition) und zum Teil auch die Querschnittsaufteilung an Hauptverkehrsstraßenknotenpunkten häufig wesentlich ändert. Unabhängig davon stellt sich auch die Frage,

ob die Streckenlängen möglichst einheitlich sein sollten. Grundsätzlich wird die Streckenlänge innerhalb der Modellierung berücksichtigt, so dass die Vereinheitlichung der Längen keine Voraussetzung sein muss. Vielmehr könnten einheitliche Streckenlängen aber eine gewisse Ähnlichkeit hinsichtlich der Stabilität der Mittelwerte führen. Da die Einteilung der Untersuchungsabschnitte aber auch von einer Vielzahl von (infrastrukturellen und verkehrlichen) Merkmalen abhängig ist, würde ein solcher Ansatz grundsätzlich eher zu kürzeren Abschnitten führen. Dieser Aspekt der Mindestlänge ist somit grundsätzlich zu untersuchen.

- Für die Abgrenzung homogener Streckenabschnitte wurden ausschließlich infrastrukturelle Merkmale hinsichtlich der Querschnittsgestaltung betrachtet (bspw. Anzahl Fahrstreifen, ruhender Verkehr, Fahrstreifenbreite; vgl. Kapitel 5.1.2). Dabei wäre es denkbar auch die seitenräumliche Nutzung (bspw. Wohn- und Geschäftsstraßen oder dicht/ locker bebaut) einzubeziehen. Andererseits bietet das gewählte Vorgehen die Möglichkeit einer Bewertung des Einflusses der Umfeldnutzung bei ansonsten verkehrlich und infrastrukturellen gleichen Bedingungen.

Zudem sind die Expositionsgrößen (Verkehrsstärken) für die Modellierung des Unfallgeschehens von hoher Bedeutung. Da bei der Betrachtung des Unfallgeschehens ganzjährige Zeiträume betrachtet werden (statistische Stabilität; vgl. Kapitel 5.3), sind die erhobenen Verkehrsstärken auch entsprechend auf den durchschnittlich täglichen Verkehr hochzurechnen. Das aktuellste nationale Hochrechnungsverfahren für Zählungen des Kfz-Verkehrs innerorts (Arnold et al. 2008) gibt zur Gewährleistung einer einfachen Handhabbarkeit, Hochrechnungsfaktoren für 4- und 8-Stundenzählungen vor. Dieses war aufgrund kürzerer Zählzeiträume im Rahmen vorliegender Arbeit nicht anwendbar, so dass das Hochrechnungsverfahren nach FGSV (2001, S. 2-17 ff.) verwendet wurde. Dieses Verfahren wurde allerdings in einer Zeit entwickelt, die nicht zweifelsfrei auf die heutige übertragbar ist. Des Weiteren ist auch generell zu hinterfragen, ob generalisierte Hochrechnungsverfahren eine ausreichende Genauigkeit liefern. Deshalb ist es grundsätzlich empfehlenswert Zählungen, auf Basis ggf. vorliegender Tages-, Wochen- und Jahresganglinien der entsprechenden Städte, wenn möglich differenziert nach Lage im Netz sowie Streckentyp, hochzurechnen (vgl. Schröter et al. 2020, S. 38).

Innerhalb der Modellierung des Unfallgeschehens hat sich zu den Unfalltypen 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr) und 6 (Unfälle im Längsverkehr) gezeigt, dass die Exposition mit den erhobenen Daten nicht optimal beschrieben werden kann. Beim Unfalltyp 6 zeigt sich das dadurch, dass der Kfz-Verkehrsstärke nur ein geringer Einfluss nachgewiesen werden konnte. Dabei wird vermutet, dass die Exposition besser durch die Anzahl der Überholungen oder bspw. durch Anteile der Überholungen mit Fahrstreifenwechsel beschrieben werden kann. Hinsichtlich des Unfalltyps 5 konnte keinem Merkmal zum Vorhandensein oder der Art des ruhenden Verkehrs ein Einfluss auf die entsprechenden Unfälle auf Abschnitten mit Mischverkehr ohne Schutzstreifen nachgewiesen werden. Dies wird darauf zurückgeführt, dass auf den entsprechenden Abschnitten ggf. häufiger auch Ein- und Ausparkvorgänge am Fahrbahnrand (im Halte- oder Parkverbot) stattfinden, ohne dass dafür Flächen ausgewiesen sind. Außerdem wird vermutet, dass nicht das Vorhandensein des ruhenden Verkehrs allein einen Einfluss hat, sondern vor allem die Parkwechselfrequenz auf das Unfallgeschehen wirkt. Dies kann auch damit gestützt werden, dass der Anteil des Geschäftsbesatzes einen signifikanten (verhältnismäßig starken) Einfluss auf Unfälle mit ruhendem Verkehr hat.

Im Ergebnis haben sich Unterschiede in der Wirkung der Exposition (Rad- und Kfz-Verkehrsstärke) auf Abschnitten mit und ohne Schutzstreifen ergeben, die mit den erhobenen Daten nicht umfassend erklärt werden können. Auf Abschnitten mit Mischverkehr und Piktogrammen zeigt sich ein höherer Regressionskoeffizient der Radverkehrsstärke und auf Abschnitten mit Schutzstreifen ein höherer Regressionskoeffizient der Kfz-Verkehrsstärke. Eine mögliche These zu Erklärung wurde in Kapitel 9 formuliert, und betrifft auf Abschnitten mit Schutzstreifen vor allem das Nebeneinanderfahren von Rad- und Kfz-Verkehr auch bei hohen Kfz-Verkehrsstärken – auf Abschnitten mit Mischverkehr/ Piktogramme nimmt die Anzahl der Überholungen mit zunehmender Kfz-Verkehrsstärke ab. Dies kann auf Abschnitten mit Schutzstreifen zu einer Zunahme der Anzahl der Interaktionen bzw. zu Sichtverdeckungen führen. Um diesen Effekt näher zu untersuchen, sollte das Verkehrsverhalten zu genannten Aspekten in künftigen Studien näher analysiert werden.

11 ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel vorliegender Untersuchung war es, die objektive Verkehrssicherheit und die Akzeptanz verschiedener Mischverkehrsführungen (ohne Markierung, mit Schutzstreifen, mit Piktogrammen) mit einer einheitlichen Methodik zu analysieren und zu bewerten. Dabei standen Hauptverkehrsstraßen im Fokus, die die Anordnung von Radverkehrsanlagen aufgrund räumlicher Restriktionen nicht möglich machen. Aufbauend auf einer Literaturrecherche zu den Vorgaben der Technischen Regelwerke national und international sowie zum internationalen Forschungsstand zu Unfällen (Sicherheitsbewertung unterschiedlicher Mischverkehrsführungen, Unfallkonstellationen, Einflussgrößen), zum Verhalten (Interaktionen, Akzeptanz unterschiedlicher Mischverkehrsführungen, seitliche Abstände zum Fahrbahnrand, Geschwindigkeiten) sowie zur subjektiven Verkehrssicherheit von Verkehrsteilnehmenden (präferierte Radverkehrsführungsform, Verhaltensweisen) wurden die folgenden Forschungsfragen für die vorliegende Untersuchung abgeleitet:

- Wie ist die objektive Verkehrssicherheit unterschiedlicher Mischverkehrsführungen (ohne Markierung, mit Schutzstreifen, mit Piktogrammen) unter Berücksichtigung der Exposition sowie weiterer signifikanter Einflussgrößen zu bewerten?
- Welchen Einfluss haben kritische Profile (Fahrbahnbreite = 6,00 m bis 7,00 m) bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen (vor dem Hintergrund der Vorgaben aus FGSV (2010a) und FGSV (2006)) sowie Sicherheitstrennstreifen auf Abschnitten mit Schutzstreifen auf das Unfallgeschehen?
- Wie ist die Akzeptanz unterschiedlicher Mischverkehrsführungen (ohne Markierung, mit Schutzstreifen, mit Piktogrammen) unter der Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen zu bewerten?
- Welche Erkenntnisse für eine sichere und akzeptierte Führung des Radverkehrs im Mischverkehr lassen sich zusammenfassend ableiten, wobei gleichzeitig Aspekte der subjektiven Sicherheit berücksichtigt werden?

Zur Beantwortung der Fragestellungen wurden Daten zu insgesamt 207 Streckenabschnitten in 24 Städten aus vier unterschiedlichen Forschungsprojekten (Schüller et al. 2020b; Ohm et al. 2015; Richter 2019; Koppers et al. 2021) zur Verfügung gestellt, die innerhalb vorliegender Arbeit vereinheitlicht, plausibilisiert und anschließend zusammenfassend ausgewertet wurden. Neben deskriptiven Analysen wurden die Akzeptanz (auf Basis linearer und logistischer Modelle) und das Unfallgeschehen (auf Basis von Poisson- und Negativ-Binomial-Modellen) statistisch analysiert.

Im Ergebnis hat sich gezeigt, dass kein genereller Unterschied im Verkehrssicherheitsniveau zwischen den untersuchten Radverkehrsführungsformen abzuleiten ist, was den Rückschluss zulässt, dass die Anlage von Schutzstreifen nicht zweifellos geeignet ist, den Radverkehr auch bei höheren Kfz-Verkehrsstärken sicher zu führen. Als weitere Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen haben sich u.a. die Radverkehrsstärke, die zulässige Geschwindigkeit, die Anzahl der Knotenpunktarme, die Anzahl unvollständig signalisierter Knotenpunkte und das Vorhandensein von Gleisen (auf Abschnitten mit Mischverkehr ohne Schutzstreifen) als signifikante Einflussfaktoren gezeigt.

Auf Abschnitten mit Mischverkehr ohne Schutzstreifen konnte den kritischen Profilbreiten (6,00 m bis 7,00 m) kein Einfluss auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden. Vielmehr sind es nutzbare Fahrstreifenbreiten von > 3,50 m, die die Unfallzahl signifikant erhöhen. Der Breite markierter Sicherheitsräume bei Schutzstreifen konnte innerhalb der Modellierung auch kein signifikanter Einfluss auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass (breitere) Sicherheitsräume auf Abschnitten markiert wurden, weil das Unfallgeschehen auffällig war und sich deshalb kein signifikanter Einfluss ergeben hat.

Hinsichtlich der Akzeptanz ist festzustellen, dass sowohl die Markierung von Piktogrammen als auch von Schutzstreifen etwa im gleichen Maße zu einer signifikanten Erhöhung des Anteils der Radfahrenden auf der Fahrbahn führen. Bemerkenswert ist zudem, dass sich mit zunehmender Gesamtverkehrsstärke der Radfahrenden der Anteil der Fahrbahnnutzung erhöht – ein sog. Acceptance-in-Numbers-Effekt. Weitere signifikante

Einflussgrößen auf den Anteil der Radfahrenden auf der Fahrbahn sind u.a. die zulässige Geschwindigkeit sowie die Anzahl lichtsignalgeregelter Querungsmöglichkeiten.

Die übergreifende Bewertung der Erkenntnisse zur objektiven und subjektiven Verkehrssicherheit sowie zur Akzeptanz hat grundsätzlich ergeben, dass sich bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Schutzstreifen sowohl eine niedrige zulässige Geschwindigkeit (< 50 km/h) als auch eine geringe Verkehrsstärke (bis 4.000 Kfz/24 h ohne und 6.000 Kfz/24 h mit Piktogrammen) als günstig erweist. Die Führung des Radverkehrs auf Schutzstreifen weist innerhalb der Modellanwendung bis zu einer Verkehrsstärke von 9.000 Kfz/24 h (bei $v_{zul} = 50$ km/h) ein durchschnittliches Akzeptanz- und Verkehrssicherheitsniveau auf. Zur Einordnung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass das Untersuchungskollektiv der Abschnitte mit Schutzstreifen und Piktogramme im Vergleich zu den Abschnitten mit Mischverkehr unterrepräsentiert ist.

Ein hohes Potential für die Erhöhung der Akzeptanz und der Verkehrssicherheit kommt zudem dem Radverkehrsaufkommen selbst zu, da die Akzeptanz mit steigender Radverkehrsstärke unmittelbar zunimmt (Acceptance-in-Numbers) und das Unfallgeschehen mit zunehmender Radverkehrsstärke unterproportional steigt (Safety-in-Numbers). Das heißt, je mehr Menschen Fahrrad fahren, desto höher ist die Akzeptanz und desto niedriger ist das Unfallrisiko der*des Einzelnen. Dies lässt nicht den Rückschluss zu, dass der Radverkehr bei hohen Radverkehrsstärken ohne Bedenken im Mischverkehr geführt werden kann. Vielmehr ist dies ein Hinweis darauf, dass die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr attraktiver werden muss, damit diese Führungsform akzeptiert und gerne genutzt wird.

LITERATURVERZEICHNIS

AASHTO (2012): Guide for the development of bicycle facilities. Fourth edition. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Alrutz, Dankmar (2009): Unfallrisiko und Regelakzeptanz von Fahrradfahrern. Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.262: Unfallrisiko, Konfliktpotenzial und Akzeptanz der Verkehrsregelungen von Fahrradfahrern. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss. (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik, 184).

Alrutz, Dankmar; Bohle, Wolfgang; Maier, Reinhold; Enke, Markus; Pohle, Maria; Zimmermann, Frank et al. (2015): Einfluss von Radverkehrsaufkommen und Radverkehrsinfrastruktur auf das Unfallgeschehen. Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Nr. 29).

Andersen, Troels; Bredal, Frits; Weinreich, Marianne; Jensen, Niels; Riisgaard-Dam, Morten; Kofod Nielsen, Malene (2012): Collection of cycle concepts 2012. Copenhagen: The Danish Road Directorate.

Anke, J.; Francke, A.; Petzoldt, T. (2020): RadVerS - Mit Smartphones generierte Verhaltensdaten im Verkehr – Differenzierung des Nutzerverhaltens unterschiedlicher RadfahrerInnengruppen. Teil I - Typologisierung von RadfahrerInnen. Entwurf Schlussbericht: unveröffentlicht (NRVP 2020).

Apasnore, Peter; Ismail, Karim; Kassim, Ali (2017): Bicycle-vehicle interactions at mid-sections of mixed traffic streets: Examining passing distance and bicycle comfort perception. In: *Accident Analysis & Prevention* 106, S. 141–148. DOI: 10.1016/j.aap.2017.05.003.

Arnold, Martin; Hedeler, Martin; Wöppel, Hans-Dieter; Dahme, Josefa (Hg.) (2008): Hochrechnungsverfahren für Kurzzeitzählungen auf Hauptverkehrsstraßen in Großstädten. Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 77.479/2004 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Deutschland. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss. (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1007).

Aurich, Allan (2012): Modelle zur Beschreibung der Verkehrssicherheit innerörtlicher Hauptverkehrsstraßennetze unter besonderer Berücksichtigung der Umfeldnutzung (Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden). Online verfügbar unter <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/vnm/ressourcen/dateien/institutsschriftenreihe/Heft-14.pdf?lang=de>, zuletzt geprüft am 06.01.2020.

Aurich, Allan; Dahnert, Thomas; Hantschel, Sebastian; Kätker, Jan; Klinghammer, Steffi; Kollmus, Bernhard; Maier, Reinhold; Schüller, Hagen (2012): ProViSta - Prognose für Verkehrssicherheit in Städten. Technischer Schlussbericht. Unter Mitarbeit von TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, Technische Informationsbibliothek und VMZ Berlin Betreibergesellschaft mbH, Berlin.

Aurich, Allan; Hantschel, Sebastian; Kollmus, Bernhard; Schüller, Hagen (2015): Prognose für die Verkehrssicherheit in Städten. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 61 (2/2015), S. 83–90.

Austroroads (2014): Cycling Aspects of Austroroads Guides. Sydney: Austroroads Ltd.

Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Plinke, Wulff; Weiber, Rolf (2018): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 15., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.

Baier, R.; Maier, R.; Aurich, A.; Klemps, A. (2007): Sicherheitsgrade von Stadtstraßen mit und ohne schienengebundenen ÖPNV (unveröffentlicht). Hg. v. Schlussbericht des Forschungsprojekts im Auftrag des Gesamtverbands der Versicherungswirtschaft e.V.

Berger, Ralf (2008): Entwicklung und Überprüfung von Ansätzen für eine sicherheitstechnische Differenzierung des städtischen Verkehrsstraßennetzes. Diplomarbeit. TU Dresden.

- Bíl, Michal; Bílová, Martina; Müller, Ivo (2010): Critical factors in fatal collisions of adult cyclists with automobiles. In: *Accident Analysis & Prevention* 42 (6), S. 1632–1636. DOI: 10.1016/j.aap.2010.04.001.
- Birk, Mia; Khan, Arif; Moore, Ian; Lerch, Daniel (2004): San Francisco's Shared Lane Pavement Markings: Improving Bicycle Safety. Hg. v. San Francisco Department of Parking & Traffic. San Francisco Department of Parking & Traffic. San Francisco.
- BMVI (2021): Nationaler Radverkehrsplan 3.0. Fahrradland Deutschland 2030. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Radverkehr/nationaler-radverkehrsplan-3-0.html>, zuletzt geprüft am 07.05.2021.
- Bortz, Jürgen; Schuster, Christof (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Brady, J.; Loskorn, J.; Mills A.; Duthie J.; Machemehl R. (2010): Effects of Shared Lane Markings on Bicyclist and Motorist Behavior. In: *ITE Journal* (Volume: 81), S. 33–38.
- Brüde, Ulf; Larsson, Jörgen (1993): Models for predicting accidents at junctions where pedestrians and cyclists are involved. How well do they fit? In: *Accident Analysis & Prevention* 25 (5), S. 499–509. DOI: 10.1016/0001-4575(93)90001-D.
- Büttner, Jenny Katharina (2019): Bike Offenbach - Stärkung des Radverkehrs für den Klimaschutz durch neue Radverkehrsachsen. Fachbereich Bauingenieurwesen, Schwerpunkt Verkehrswesen; Hochschule Darmstadt. Darmstadt (Masterarbeit).
- Cerema (2020): Vélos et voitures : séparation ou mixité, les clés pour choisir. Bron: Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA).
- Certu (2007): Recommandations pour les aménagements cyclables. Bron.
- Chataway, Elijah Steven; Kaplan, Sigal; Nielsen, Thomas Alexander Sick; Prato, Carlo Giacomo (2014): Safety perceptions and reported behavior related to cycling in mixed traffic: A comparison between Brisbane and Copenhagen. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 23, S. 32–43. DOI: 10.1016/j.trf.2013.12.021.
- Chen, Peng; Shen, Qing (2016): Built environment effects on cyclist injury severity in automobile-involved bicycle crashes. In: *Accident Analysis & Prevention* 86, S. 239–246. DOI: 10.1016/j.aap.2015.11.002.
- Christmas, Simon (2010): Cycling, safety and sharing the road. Qualitative research with cyclists and other road users. London: Department for Transport (Road safety web publication, 17).
- Chuang, Kai-Hsiang; Hsu, Chun-Chia; Lai, Ching-Huei; Doong, Ji-Liang; Jeng, Ming-Chang (2013): The use of a quasi-naturalistic riding method to investigate bicyclists' behaviors when motorists pass. In: *Accident Analysis & Prevention* 56, S. 32–41. DOI: 10.1016/j.aap.2013.03.029.
- CoC (2013): Focus on Cycling. Copenhagen Guidelines for the Design of Road Projects.
- Cohen, Jacob (1992): A power primer. In: *Psychological Bulletin* 112 (1), S. 155–159. DOI: 10.1037/0033-2909.112.1.155.
- CROW (2016): Design manual for bicycle traffic. Unter Mitarbeit von Rik de Groot. Revised edition. Ede: CROW (CROW-record, 28).
- Daff, Malcolm (2013): Evaluation of Shared Lane Markings for Cyclists. Hg. v. VicRoads Bicycle and Pedestrian Programs. Melbourne.
- Damant-Sirois, Gabriel; Grimsrud, Michael; El-Geneidy, Ahmed M. (2014): What's your type: a multidimensional cyclist typology. In: *Transportation* 41 (6), S. 1153–1169. DOI: 10.1007/s11116-014-9523-8.

- Debnath, Ashim Kumar; Haworth, Narelle; Schramm, Amy; Heesch, Kristiann C.; Somoray, Klaire (2018): Factors influencing noncompliance with bicycle passing distance laws. In: *Accident Analysis & Prevention* 115, S. 137–142. DOI: 10.1016/j.aap.2018.03.016.
- Destatis (2020): Fachserie 8, Reihe 7, Verkehrsunfälle 2019. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/_inhalt.html#sprg230562.
- DfT (2008): Cycle infrastructure design. London: TSO (Local transport note, 2/08).
- DfT (2020): Cycle infrastructure design. London: TSO (Local transport note, 01/20). Online verfügbar unter <https://www.gov.uk/government/publications/cycle-infrastructure-design-ltn-120>, zuletzt geprüft am 07.11.2021.
- Dietiker, Jürg; Youssefzadeh, Maria; Forssard, Jean-Luis; Hackenfort, Markus; Hebenstreit, Benedikt von; Jöri, Hans et al. (2012): Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen? Hg. v. Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation und Bundesamt für Strassen. Bern.
- Dill, Jennifer; McNeil, Nathan (2013): Four Types of Cyclists? In: *Transportation Research Record* 2387 (1), S. 129–138. DOI: 10.3141/2387-15.
- Elvik, Rune (2009): The non-linearity of risk and the promotion of environmentally sustainable transport. In: *Accident Analysis & Prevention* 41 (4), S. 849–855. DOI: 10.1016/j.aap.2009.04.009.
- Elvik, Rune; Goel, Rahul (2019): Safety-in-numbers: An updated meta-analysis of estimates. In: *Accident Analysis & Prevention* 129, S. 136–147. DOI: 10.1016/j.aap.2019.05.019.
- Fahrmeir, Ludwig (2004): Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. 5., verb. Aufl. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Fahrmeir, Ludwig; Kneib, Thomas; Lang, Stefan; Marx, Brian (2013): Regression. Models, methods and applications. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Ferenchak, Nicholas N.; Marshall, Wesley E. (2016): The Relative (In)Effectiveness of Bicycle Sharrows on Ridership and Safety Outcomes. In: *Transportation Research Board 95th Annual Meeting* (16-5232).
- Ferenchak, Nicholas N.; Marshall, Wesley E. (2019): Advancing healthy cities through safer cycling: An examination of shared lane markings. In: *International Journal of Transportation Science and Technology* 8 (2), S. 136–145. DOI: 10.1016/j.ijtst.2018.12.003.
- FGSV (2001): Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen. HBS. Ausg. 2001, Fassung 2009. Köln: FGSV-Verl. (FGSV, 299).
- FGSV (2002): Empfehlungen der Fußgängerverkehrsanlagen. EFA. Ausg. 2002. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln (FGSV R2 - Regelwerke, FGSV-288).
- FGSV (2006): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen. RAS 06. Korrigierter Nachdruck Mai 2012. Köln: FGSV-Verl. (FGSV R1 - Regelwerke, 200).
- FGSV (2009a): Hinweise für den Entwurf von Verknüpfungsanlagen des öffentlichen Personennahverkehrs. H VÖ. Ausg. 2009. Köln: FGSV-Verl. (FGSV W1 - Wissensdokumente, 236).
- FGSV (2009b): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung. RIN. Ausg. 2008. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln (FGSV R1 - Regelwerke, FGSV 121).
- FGSV (2010a): Empfehlungen für Radverkehrsanlagen. ERA. Ausg. 2010. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln (FGSV R2 - Regelwerke, FGSV-284).
- FGSV (2010b): Hinweise zur Integration der Belange von Kindern in die Verkehrsplanung. Ausg. 2010. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln (FGSV W1 - Wissensdokumente, FGSV-152).
- FGSV (2010c): Richtlinien für Lichtsignalanlagen. RiLSA ; Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr. Ausg. 2010. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln (FGSV R1 - Regelwerke, FGSV-321).

- FGSV (2012): Merkblatt zur örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen. M Uko. Ausg. 2012. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln (FGSV R2 - Regelwerke, FGSV 316/1).
- FGSV (2013): Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs. EAÖ. Ausg. 2013. Köln: FGSV-Verl. (FGSV R2 - Regelwerke, 289).
- FHA (2010): Manual on Uniform Traffic Control Devices 2009: Claitors Pub Div.
- Field, Andy (2009): Discovering statistics using SPSS. (and sex and drugs and rock 'n' roll). 3. ed. Los Angeles: Sage Publ. Online verfügbar unter <http://www.uk.sagepub.com/field3e/main.htm>.
- Fitzpatrick, Kay; Chrysler, Susan T.; van Houten, Ron; Hunter, William W.; Turner, Shawn M.; Texas Transportation Institute (2011): Evaluation of Pedestrian and Bicycle Engineering Countermeasures: Rectangular Rapid-Flashing Beacons, HAWKs, Sharrows, Crosswalk Markings, and the Development of an Evaluation Methods Report. United States. Federal Highway Administration. Office of Safety Research and DevelopmentUR - <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40917> (FHWA-HRT-11-039).
- FixMyCity (2020): Studie zur subjektiven Sicherheit im Radverkehr - Ergebnisse und Datensatz einer Umfrage mit über 21.000 Teilnehmenden. FixMyCity. Berlin (NRVP 2020). Online verfügbar unter <https://fixmyberlin.de/research/subjektive-sicherheit>.
- FSV (2014): RVS 03.02.13 Merkblatt Radverkehr.
- Furth, Peter G.; Dulaski, Daniel M.; Dan Bergenthal, P. E.; Brown, Shannon (2011): More Than Sharrows: Lane-Within-a-Lane Bicycle Priority Treatments in Three U.S. Cities. In: *Transportation Research Board 90th Annual Meeting Transportation Research Board* (11-1357UR - <https://trid.trb.org/view/1091900>).
- Games, Paul A. (1983): Curvilinear transformations of the dependent variable. In: *Psychological Bulletin* 93 (2), S. 382–387. DOI: 10.1037/0033-2909.93.2.382.
- Games, Paul A. (1984): Data transformations, power, and skew: A rebuttal to Levine and Dunlap. In: *Psychological Bulletin* 95 (2), S. 345–347. DOI: 10.1037/0033-2909.95.2.345.
- GDV (2003): Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen - Teil 1. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.
- Geller, R. (2006): Four Types of Cyclists. Online verfügbar unter <http://www.portlandoregon.gov/transportation/article/264746>.
- Gerike, Regine; Hubrich, Stefan; Ließke, Frank; Wittig, Sebastian; Wittwer Rico (2020): Sonderauswertung zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten – SrV 2018“. SrV-Stadtgruppen: Unter-/Grund-/Kleinzentren/ländliche Gemeinden, Topografie: flach und hügelig; Mittelzentren, Topografie: flach und hügelig; Oberzentren bis unter 500.000 EW, Topografie: flach und hügelig; Oberzentren 500.000 und mehr EW (ohne Berlin), Topografie: flach. Online verfügbar unter <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/srv-2018#intro>.
- Greibe, Poul (2003): Accident prediction models for urban roads. In: *Accident Analysis & Prevention* 35 (2), S. 273–285. DOI: 10.1016/S0001-4575(02)00005-2.
- Hantschel, Sebastian; Hoefert, Christoph; Kollmus, Bernhard; Pohle, Maria; Schöne, Eric; Bakaba, Jean Emmanue; Ortlepp, Jörg (2016): Sicherheit an Bahnübergängen Abschlussbericht. [1. Auflage]. Stand: 21.07.2016. Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Nr. 44).
- Hardinghaus, Michael; Cyganski, Rita (2019): Attraktive Radinfrastruktur - Routenpräferenzen von Radfahrenden. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Berlin (NRVP 2020).
- Harkey, David L.; Stewart, J. Richard (1997): Evaluation of Shared-Use Facilities for Bicycles and Motor Vehicles. In: *Transportation Research Record* 1578 (1), S. 111–118. DOI: 10.3141/1578-14.

- Harris, M. Anne; Reynolds, Conor C. O.; Winters, Meghan; Chipman, Mary; Cripton, Peter A.; Cusimano, Michael D.; Teschke, Kay (2011): The Bicyclists' Injuries and the Cycling Environment study: a protocol to tackle methodological issues facing studies of bicycling safety. In: *Injury Prevention* 17 (5), e6. DOI: 10.1136/injuryprev-2011-040071.
- Harris, M. Anne; Reynolds, Conor C. O.; Winters, Meghan; Cripton, Peter A.; Shen, Hui; Chipman, Mary L. et al. (2013): Comparing the effects of infrastructure on bicycling injury at intersections and non-intersections using a case-crossover design. In: *Injury prevention : journal of the International Society for Child and Adolescent Injury Prevention* 19 (5), S. 303–310. DOI: 10.1136/injuryprev-2012-040561.
- Hauer, Ezra; Bamfo, Joseph (1997): Two tools for finding what function links the dependent variable to the explanatory variables. In: ICTCT (Hg.): Proceedings ICTCT 97 Conference. International Cooperation on Theories and Concepts in Traffic Safety. Lund, 5.-7. November. Lund University, S. 1–7.
- Heidemann, C. (1976): Gesetzmäßigkeiten städtischen Fußgängerverkehrs. Bad Godesberg: Kirschbaum-Verlag (Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 68).
- Høye, Alena; Fyhri, Aslak; Bjørnskau, Torkel (2016): Shared road is double happiness: Evaluation of a "Share the road" sign. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 42, S. 500–508. DOI: 10.1016/j.trf.2015.12.006.
- Huemer, Anja Katharina; Blosser, Eva Christina; Schrader, Katharina; Eckhoff, Leonard; Vollrath, Mark (2018): The relative impact of cyclists' appearance and infrastructure layout on (speed and) lateral distance while overtaking bicyclists: a simulator approach. International Cycling Safety Conference. Barcelona, Spanien, 10.10.2018.
- Hummel, Thomas; Kühn, Matthias (2016): Schutzmaßnahmen für Fußgänger und Radfahrer. Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (Unfallforschung kompakt / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Nr. 63).
- Hunter, William W.; Thomas, Libby; Srinivasan, Raghavan; Martell, Carol A. (2010): Evaluation of Shared Lane Markings. Hg. v. Office of Safety Research and Development, Federal Highway Administration (FHWA-HRT-10-041).
- Hutcheson, Graeme; Sofroniou, Nick (1999): The multivariate social scientist. Introductory statistics using generalized linear models. London, Thousand Oaks, Calif: Sage Publications. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=309798>.
- Jensen, Søren Underlien (2008): Bicycle Tracks and Lanes: a Before-After-Study. In: *TRB 2008 Annual Meeting*.
- Johnson, Marilyn; Charlton, Judith; Oxley, Jennifer; Newstead, Stuart (2010): Naturalistic Cycling Study: Identifying Risk Factors for On-Road Commuter Cyclists. In: *Annals of Advances in Automotive Medicine / Annual Scientific Conference* 54, S. 275–283.
- Kaplan, Sigal; Luria, Ravid; Prato, Carlo G. (2019): The relation between cyclists' perceptions of drivers, self-concepts and their willingness to cycle in mixed traffic. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 62, S. 45–57. DOI: 10.1016/j.trf.2018.12.011.
- Kaulen, Ralf; Reintjes, Matthias; Dudde, Christina (2013): Gutachten zum Einsatz und zur Wirkung von einseitigen, alternierenden und beidseitigen Schutzstreifen auf schmalen Fahrbahnen innerorts. Hg. v. Ministerium für Verkehr und Infrastruktur des Landes Baden Württemberg.
- Kim, Myungseob; Kim, Eungcheol; Oh, Jutaek; Jun, Jungwook (2012): Critical factors associated with bicycle accidents at 4-legged signalized urban intersections in South Korea. In: *KSCE J Civ Eng* 16 (4), S. 627–632. DOI: 10.1007/s12205-012-1055-1.
- Klemm, Elmar (2002): Einführung in die Statistik. Für die Sozialwissenschaften. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

- Knoflacher, H. (2014): Untersuchung der Wirkungen von Fahrradpiktogrammen auf das Verhalten von Rad- und AutofahrerInnen.
- Koppers, Anne; Gerlach, Jürgen; Leven, Tanja; Ruf, Stefanie; Hagemeister, Carmen (2021): Radfahren bei beengten Verhältnissen – Wirkung von Piktogrammen und Hinweisschildern auf Fahrverhalten und Verkehrssicherheit. Bergische Universität Wuppertal, Technische Universität Dresden. Wuppertal, Dresden (NRVP 2020). Online verfügbar unter <https://nationaler-radverkehrsplan.de/de/praxis/wirkung-von-piktogrammen-und-hinweisschildern-auf>.
- La Vega, J. de (2011): Shared lane marking study. Final report. Hg. v. Los Angeles Department of Transport. Los Angeles.
- LaMondia, Jeffrey J.; Duthie, Jennifer C. (2012): Analysis of Factors Influencing Bicycle–Vehicle Interactions on Urban Roadways by Ordered Probit Regression. In: *Transportation Research Record* 2314 (1), S. 81–88. DOI: 10.3141/2314-11.
- Langer, Ralf (2016): Seitlicher Überholabstand von Radfahrern durch den motorisierten Verkehr – Empirische Analyse mit Hilfe von Kameradaten. Professur für Verkehrsökologie, TU Dresden. Dresden (Diplomarbeit).
- Leue, Anke (2018): StVO Straßenverkehrs-Ordnung. Textausgabe mit Erläuterungen, allgemeiner Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung, verkehrsrechtlichen Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Fernreiseverordnung sowie ausgewählten Ausnahmeverordnungen. 25., neu bearbeitete Auflage, Stand: Oktober 2017. Heidelberg: C.F. Müller. Online verfügbar unter <https://www.juris.de/perma?d=samson-SHJRhjr-stvoT0000>.
- Levine, Douglas W.; Dunlap, William P. (1982): Power of the F test with skewed data: Should one transform or not? In: *Psychological Bulletin* 92 (1), S. 272–280. DOI: 10.1037/0033-2909.92.1.272.
- Levine, Douglas W.; Dunlap, William P. (1983): Data transformation, power, and skew: A rejoinder to Games. In: *Psychological Bulletin* 93 (3), S. 596–599. DOI: 10.1037/0033-2909.93.3.596.
- Love, David C.; Breaud, Autumn; Burns, Sean; Margulies, Jared; Romano, Max; Lawrence, Robert (2012): Is the three-foot bicycle passing law working in Baltimore, Maryland? In: *Accident Analysis & Prevention* 48, S. 451–456. DOI: 10.1016/j.aap.2012.03.002.
- Lusk, Anne C.; Furth, Peter G.; Morency, Patrick; Miranda-Moreno, Luis F.; Willett, Walter C.; Dennerlein, Jack T. (2011): Risk of injury for bicycling on cycle tracks versus in the street. In: *Injury prevention : journal of the International Society for Child and Adolescent Injury Prevention* 17 (2), S. 131–135. DOI: 10.1136/ip.2010.028696.
- Maher, Michael J.; Summersgill, Ian (1996): A comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models. In: *Accident Analysis & Prevention* 28 (3), S. 281–296. DOI: 10.1016/0001-4575(95)00059-3.
- Maier, Reinhold (1984): Fußgängersicherheit in Städten (Dissertation).
- Manton, Richard; Rau, Henrike; Fahy, Frances; Sheahan, Jerome; Clifford, Eoghan (2016): Using mental mapping to unpack perceived cycling risk. In: *Accident Analysis & Prevention* 88, S. 138–149. DOI: 10.1016/j.aap.2015.12.017.
- Maycock, G.; Hall, R. D. (1984): Accidents at 4-arm roundabouts. In: TRL (Hg.): Transport policy. Proceedings of Seminar J held at the P.T.R.C. Summer Annual Meeting at the University of Sussex from 10 - 13 July 1984. London, S. 55–70.
- Medicus, Matthias; Schmotz, Martin; Gerike, Regine; Reinartz, Angelika; Baier, Michael (2021): Entwicklung von Einsatzkriterien für Fußgängerschutzanlagen mit unterschiedlichen Grundstellungen. FE 03.0568/2018/DGB - Schlussbericht.

- Mehta, Kushal; Mehran, Babak; Hellinga, Bruce (2015): Evaluation of the Passing Behavior of Motorized Vehicles When Overtaking Bicycles on Urban Arterial Roadways. In: *Transportation Research Record* 2520 (1), S. 8–17. DOI: 10.3141/2520-02.
- Miaou, Shaw-Pin (1994): The relationship between truck accidents and geometric design of road sections: Poisson versus negative binomial regressions. In: *Accident Analysis & Prevention* 26 (4), S. 471–482. DOI: 10.1016/0001-4575(94)90038-8.
- Mills, Alison; Loskorn, Jeff; Brady, John; Duthie, Jennifer; Machemehl, Randy B. (2010): Effects of “Bicycles May Use Full Lane” Signs on Bicyclist and Motorist Behavior along Multi-Lane Facilities. Hg. v. The City of Austin. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin. Austin (Texas).
- MTO (2013): Ontario Traffic Manual - Cycling Facilities. Ontario: Ministry of Transportation of Ontario (MTO).
- Müller, Dieter (2018): Rechtsgutachten zu markierten Radverkehrsführungen. Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (Unfallforschung kompakt / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V).
- Munro, Cameron (2012): Bicycle Rider Collisions with Car Doors. Hg. v. Parliament of Victoria.
- NACTO (2014): Urban bikeway design guide. Second edition. New York: National Association of City Transportation Officials.
- Nordback, Krista; Marshall, Wesley E.; Janson, Bruce N. (2014): Bicyclist safety performance functions for a U.S. city. In: *Accident Analysis & Prevention* 65, S. 114–122. DOI: 10.1016/j.aap.2013.12.016.
- NPRA (2013): Sykkelhåndboka. Lillehammer: Statens vegvesen (Nr. V122 i Statens vegvesens håndbokserie).
- NTA (2011): National Cycle Manual. Dublin: National Transport Authority.
- O'Connor, Justen P.; Brown, Trent D. (2010): Riding with the sharks: serious leisure cyclist's perceptions of sharing the road with motorists. In: *Journal of science and medicine in sport* 13 (1), S. 53–58. DOI: 10.1016/j.jsams.2008.11.003.
- Ohm, Dirk; Fiedler, Frank; Zimmermann, Frank; Kraxenberger, Tobias; Maier, Reinhold; Hantschel, Sebastian; Otto, Michael (2015): Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen. Bericht zum Forschungsprojekt: FE 77.0496/2010. Bremen (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik).
- Okhrin, Ostap (2015): Statistik II. Kapitel 7 Anpassungstests. Vorlesungsskript. Dresden. Online verfügbar unter https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivw/osv/ressourcen/dateien/studium/statistik2/ws_2015_2016/unterlagen/Stat_II_kap7.pdf, zuletzt geprüft am 12.05.2021.
- Pai, Chih-Wei (2011): Overtaking, rear-end, and door crashes involving bicycles: an empirical investigation. In: *Accident Analysis & Prevention* 43 (3), S. 1228–1235. DOI: 10.1016/j.aap.2011.01.004.
- Parkin, John; Meyers, Ciaran (2010): The effect of cycle lanes on the proximity between motor traffic and cycle traffic. In: *Accident Analysis & Prevention* 42 (1), S. 159–165. DOI: 10.1016/j.aap.2009.07.018.
- Pein, W. E.; Hunter, W. W.; Stewart, J. R. (1999): EVALUATION OF THE SHARED-USE ARROW.
- Piatkowski, Daniel P.; Marshall, Wesley; Johnson, Aaron (2017): Identifying behavioral norms among bicyclists in mixed-traffic conditions. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 46, S. 137–148. DOI: 10.1016/j.trf.2017.01.009.
- Pituch, Keenan A.; Stevens, James P. (2016): Applied multivariate statistics for the social sciences. Analyses with SAS and IBM's SPSS. Sixth edition. New York, London: Routledge Taylor and Francis Group.

- Reichenbach, M.; Affolter, R. (2003): Strassen mit Gemischtverkehr: Anforderungen aus der Sicht der Zweiradfahrer. Forschungsauftrag SVI 1999/135 auf Antrag der SVI. Bern.
- Reid, S.; Adams, S. (2010): *Infrastructure and cyclist safety*. Hg. v. Transport Research Laboratory (TRL) (PPR580).
- Richter, Thomas (2019): Sicherheit und Nutzbarkeit markierter Radverkehrsführungen. Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Nr. 59).
- Rossetti, Tomás; Guevara, C. Angelo; Galilea, Patricia; Hurtubia, Ricardo (2018): Modeling safety as a perceptual latent variable to assess cycling infrastructure. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 111, S. 252–265. DOI: 10.1016/j.tra.2018.03.019.
- Roßmerkel, Matthias (2017a): Ganglinien des Fußverkehrs (Studienarbeit).
- Roßmerkel, Matthias (2017b): Ganglinien des Fußverkehrs. Hochrechnung des Fußverkehrs aus 15-Minuten-Zählungen zwischen 14 und 18 bzw. 15 und 19 Uhr (Nachtrag zur Studienarbeit).
- Roßmerkel, Matthias (2021): Ganglinien des Fußverkehrs. Hochrechnung des Fußverkehrs aus 15-Minuten-Zählungen (Nachtrag zur Studienarbeit).
- Rudolf, Matthias; Müller, Johannes (2012): *Multivariate Verfahren. Eine praxisorientierte Einführung mit Anwendungsbeispielen in SPSS*. 2. Aufl. s.l.: Hogrefe Verlag. Online verfügbar unter <https://elibrary.hogrefe.com/book/99.110005/9783840924033>.
- Rudolf, Matthias; Müller, Johannes (2020): *Multivariate Verfahren. Eine praxisorientierte Einführung mit Anwendungsbeispielen*. 3., überarbeitete Auflage. Göttingen: hogrefe.
- Rummel, Rudolph J. (1970): *Applied factor analysis*. Evanston: Northwestern Univ. Press.
- Sando, Thobias; Hunter, W.; University of North Florida. College of Computing, Engineering & Construction (2014): Operational analysis of shared lane markings and green bike lanes on roadways with speeds greater than 35 mph. Florida. Dept. of Transportation. Research CenterUR - <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/27240> (BDK82-977-04).
- Schepers, J. P.; Kroeze, P. A.; Sweers, W.; Wüst, J. C. (2011): Road factors and bicycle-motor vehicle crashes at unsignalized priority intersections. In: *Accident Analysis & Prevention* 43 (3), S. 853–861. DOI: 10.1016/j.aap.2010.11.005.
- Schepers, P.; Twisk, D.; Fishman, E.; Fyhri, A.; Jensen, A. (2015): The Dutch road to a high level of cycling safety. In: *Safety Science* 92, S. 264–273. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.06.005.
- Schiller, Christian; Zimmermann, Frank; Bohle, Wolfgang (2011): Hochrechnungsmodell von Stichprobenzählungen für den Radverkehr. Dresden (Schlussbericht FE 77.495/2008).
- Schleinitz, Katja; Franke-Bartholdt, Luise; Petzoldt, Tibor; Schwanitz, Stefan; Gehlert, Tina; Kühn, Matthias (2014): *Pedelec-naturalistic cycling study*. Berlin: GDV (Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Nr. 27).
- Schmidt, Gerhard; Thomas, Bernd (1996): Hochrechnungsfaktoren für Kurzzeitzählungen auf Innerortsstraßen. In: *Straßenverkehrstechnik* (11/96), S. 546–556.
- Schober, Philipp (2018): Quantifizierung von Radverkehrsrisiken - Ermittlung einer infrastrukturabhängigen Unfallrate für Wien. Diplomarbeit. TU Wien, Wien. Institut für Verkehrswissenschaften, zuletzt geprüft am 10.01.2020.
- Schröter, Bettina; Hantschel, Sebastian; Gerike, Regine; Huber, Stefan; Lindemann, Paul; Anke, Juliane (2020): NRVP 2020 - Abschätzung des Einflusses der Verkehrssicherheit auf die Routenwahl im Radverkehr anhand einer pseudo-repräsentativen Stichprobe von GPS-Daten. 2. Zwischenbericht (unveröffentlicht). Dresden (Gefördert vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur).

- Schüller, Hagen (2010): Modelle zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Stadtstraßen und dessen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit auf Grundlage der Straßengestaltung (Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden). Online verfügbar unter <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/vnm/ressourcen/dateien/institutsschriftenreihe/Heft-12.pdf?lang=de>, zuletzt geprüft am 28.04.2021.
- Schüller, Hagen; Plesker, Miriam; Bärwolff, Martin (2020a): Unfallrisiko Parken für schwächere Verkehrsteilnehmer. Berlin.
- Schüller, Hagen; Plesker, Miriam; Hantschel, Sebastian; Kühn, Benjamin; Gerike, Regine (2020b): Akzeptanz und Verkehrssicherheit des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen. FE 70.0907/2015 - Schlussbericht. Online verfügbar unter https://fops.de/wp-content/uploads/2021/02/70.0907_Schlussbericht_Mischverkehr.pdf.
- Shackel, Stella C.; Parkin, John (2014): Influence of road markings, lane widths and driver behaviour on proximity and speed of vehicles overtaking cyclists. In: *Accident Analysis & Prevention* 73, S. 100–108. DOI: 10.1016/j.aap.2014.08.015.
- Shapiro, S. S.; Wilk, M. B. (1965): An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). In: *Biometrika* 52 (3/4), S. 591. DOI: 10.2307/2333709.
- Stahel, Werner; Pritscher, Lisa (2004): Verallgemeinerte Lineare Modelle. Teil des Weiterbildungs-Lehrgangs Statistik der ETH Zürich. Seminar für Statistik, ETH Zürich. Zürich.
- Sustrans (2014): Handbook for cycle-friendly design. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/cycling-guidance/sustrans_handbook_for_cycle-friendly_design.pdf.
- Szeiler, Michael; Skoric, Michael (2017): Radfahren im Längsverkehr neben haltenden und parkenden Fahrzeugen. Fachtagung für mehr Sicherheit im Radverkehr. Kuratorium für Verkehrssicherheit (KFV). Kuratorium für Verkehrssicherheit (KFV). Wien, 27.04.2017.
- Taylor, M. C.; Baruya, A.; Kennedy, J. V. (2002): The relationship between speed and accidents on rural single-carriageway roads. Hg. v. Transport Research Laboratory. Crowthorne (TRL Report 511).
- TBA Bern (2018): Anlagen für den Veloverkehr. Bern: Tiefbauamt des Kantons Bern.
- TBA St. Gallen (2016): Richtlinie TBA Radverkehr (RRV). St. Gallen: Tiefbauamt Kanton St. Gallen.
- Teschke, Kay; Dennis, Jessica; Reynolds, Conor C. O.; Winters, Meghan; Harris, M. Anne (2016): Bicycling crashes on streetcar (tram) or train tracks: mixed methods to identify prevention measures. In: *BMC Public Health* 16, S. 617. DOI: 10.1186/s12889-016-3242-3.
- Teschke, Kay; Frendo, Theresa; Shen, Hui; Harris, M. Anne; Reynolds, Conor C. O.; Cripton, Peter A. et al. (2014): Bicycling crash circumstances vary by route type: a cross-sectional analysis. In: *BMC Public Health* 14 (1), S. 1205. DOI: 10.1186/1471-2458-14-1205.
- Teschke, Kay; Harris, M. Anne; Reynolds, Conor C. O.; Winters, Meghan; Babul, Shelina; Chipman, Mary et al. (2012): Route Infrastructure and the Risk of Injuries to Bicyclists: A Case-Crossover Study. In: *American Journal of Public Health* 102 (12), S. 2336–2343. DOI: 10.2105/AJPH.2012.300762.
- TfL (2016): London Cycling Design Standards (LCDS). Online verfügbar unter <https://tfl.gov.uk/corporate/publications-and-reports/streets-toolkit>.
- TRB (2010): Highway capacity manual. Washington DC: TRB Business Office.
- Turner, S.; Francis, T.; Roozenburg, Aaron (2006): Predicting accident rates for cyclists and pedestrians. Wellington, New Zealand: Land Transport New Zealand (Land Transport New Zealand research report, no. 289).

- UZH (2020): Methodenberatung. Hg. v. Universität Zürich. Zürich. Online verfügbar unter <https://www.methodenberatung.uzh.ch/>, zuletzt aktualisiert am 23.12.2020, zuletzt geprüft am 26.04.2021.
- van Houten, Ron; Seiderman, Cara (2005): How Pavement Markings Influence Bicycle and Motor Vehicle Positioning. In: *Transportation Research Record* 1939 (1), S. 2–14. DOI: 10.1177/0361198105193900101.
- Vasilev, Miroslav; Pitera, Kelly; Jonsson, Thomas (2017): Evaluation of bicycle sharrows within the Norwegian context. In: *Transportation Research Procedia* 27, S. 1097–1104. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.015.
- VSS (1992): SN 640 201 Geometrisches Normalprofil; Grundabmessungen und Lichtraumprofil. Zürich.
- VSS (1994): SN 640 060 Leichter Zweiradverkehr. Zürich.
- VSS (2006): SN 640 291a Parkieren; Anordnung und Geometrie der Parkieranlagen. Zürich.
- VSS (2017): SN 640 303 Strassenprojektierung - Entwurf von Hauptverkehrsstrassen innerorts. Zürich.
- Walker, Ian (2007): Drivers overtaking bicyclists: objective data on the effects of riding position, helmet use, vehicle type and apparent gender. In: *Accident Analysis & Prevention* 39 (2), S. 417–425. DOI: 10.1016/j.aap.2006.08.010.
- Werneke, Julia; Dozza, Marco; Karlsson, MariAnne (2015): Safety-critical events in everyday cycling – Interviews with bicyclists and video annotation of safety-critical events in a naturalistic cycling study. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 35, S. 199–212. DOI: 10.1016/j.trf.2015.10.004.
- Winters, Meghan; Teschke, Kay (2010): Route preferences among adults in the near market for bicycling: findings of the cycling in cities study. In: *American journal of health promotion : AJHP* 25 (1), S. 40–47. DOI: 10.4278/ajhp.081006-QUAN-236.
- Zweibrücken, Klaus; Känel, Thomas von (1999): Kernfahrbahnen. Optimierte Führung des Veloverkehrs an engen Strassenquerschnitten. Zürich: Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI) (SVI-Forschung 44/97).

ANLAGEN

Anlage 1	Dokumentation Technische Regelwerke international	A-1
Anlage 2	Untersuchungsabschnitte im Überblick	A-15
Anlage 3	Nacherhobene Infrastrukturmerkmale im Überblick.....	A-22
Anlage 4	Weiterentwicklung des Umfeldfaktors.....	A-23
Anlage 5	Alltäglicher Freizeitradverkehr und Modal-Split des Radverkehrs der Untersuchungsstädte	A-25
Anlage 6	Hochrechnungsfaktoren für Kurzzeitzählungen des Fußverkehrs	A-26
Anlage 7	Eingangsparameter für die Hochrechnung des Kfz-Verkehrs.....	A-27
Anlage 8	Basisdaten des Unfalldatensatzes EUSka und Unfallatlas	A-30
Anlage 9	Tests auf Normalverteilung	A-31
Anlage 10	Teilmodell Schutzstreifen: Anteil Fahrbahnnutzung und Schutzstreifenbreite	A-32
Anlage 11	Anteil Länge Geschäftsbesatz und Fußverkehrsstärke	A-33
Anlage 12	Modellanwendung Anteil Radfahrender auf der Fahrbahn auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen.....	A-34
Anlage 13	Radverkehrsunfälle mit Personenschaden nach Unfallkategorien	A-35
Anlage 14	Unfalltypen und Beteiligtenkonstellationen	A-36
Anlage 15	Teilmodelle Unfalltyp 1 (Fahrerunfälle)	A-37
Anlage 16	Teilmodelle Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle)	A-39
Anlage 17	Teilmodelle Unfalltyp 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle)	A-41
Anlage 18	Teilmodelle Unfalltyp 4 (Überschreiten-Unfälle)	A-43
Anlage 19	Teilmodelle Unfalltyp 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr)	A-45
Anlage 20	Teilmodelle Unfalltyp 6 (Unfälle im Längsverkehr)	A-47
Anlage 21	Teilmodelle Unfalltyp 7 (Sonstige Unfälle).....	A-49

Anlage 1 Dokumentation Technische Regelwerke international

Dänemark

Andersen et al. (2012) fassen Empfehlungen zu verschiedenen Aspekten (bspw. Kampagnen und Marketing, Gesundheit, Radinfrastruktur) rund um das Thema Radverkehr zusammen. Die Vorauswahl der Radverkehrsführungsform wird in Abhängigkeit der Kfz-Verkehrsstärke sowie der gewünschten Geschwindigkeit im Kfz-Verkehr nach Bild-A 1 bestimmt. Demnach kommt die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr unter folgenden Bedingungen in Frage:

- Nebennetz
- zulässige Höchstgeschwindigkeit ≤ 40 km/h (empfohlen werden 30 km/h, was aber häufig nicht umgesetzt wird, Andersen et al. 2012, S. 53)
- Verkehrsstärke ≤ 2.500 Kfz/24 h (siehe Bild-A 1)

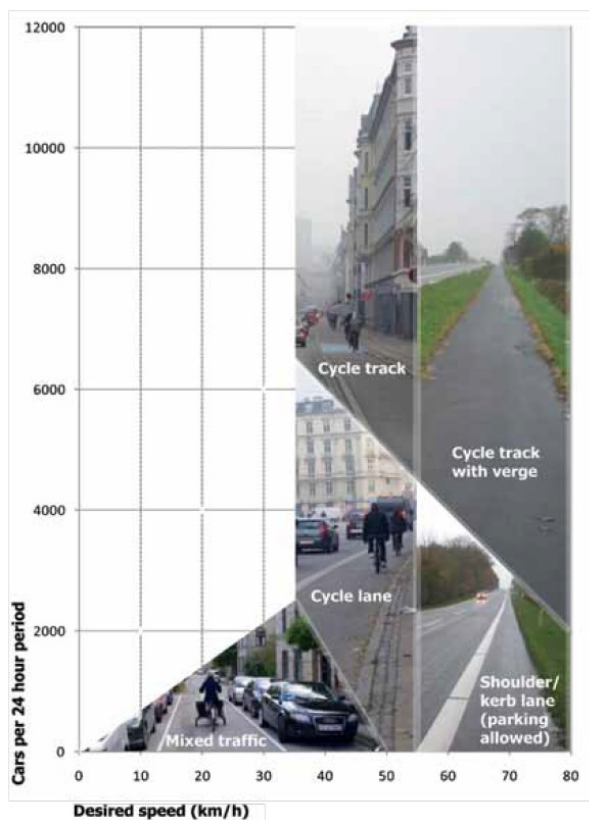


Bild-A 1 Vorauswahl der Radverkehrsführungsform in Dänemark nach Andersen et al. (2012, S. 53)

Es wird nochmal explizit darauf hingewiesen, dass sich Radfahrende im Mischverkehr oft verunsichert fühlen, vor allem wenn eine große Anzahl von PKW und LKW mit hoher Geschwindigkeit unterwegs ist. Das Sicherheitsniveau hängt von der Geschwindigkeit, den Parkmöglichkeiten und der Straßenbreite ab. Daher sollten Radfahrende und Kfz nur auf Straßenabschnitten mit niedriger Kfz-Verkehrsstärke und entsprechend langsamen Geschwindigkeiten gemischt werden (Andersen et al. 2012, S. 53).

Hinsichtlich der Querschnittsbreiten gibt es keine generellen Vorgaben. Es wird darauf hingewiesen, dass bei Breiten $< 6,50$ m die zulässige Geschwindigkeit maximal 30 bis 40 km/h betragen sollte. Bei höheren Geschwindigkeiten sollte die Fahrbahn breiter sein, wobei gleichzeitig darauf hingewiesen wird, dass bei Geschwindigkeiten von mehr als 40 km/h verkehrsberuhigende Maßnahmen oder eine Radverkehrsanlage in Betracht gezogen werden sollte. Dabei spricht die Anwesenheit von Kindern und älteren Radfahrenden für eine getrennte Radverkehrsanlage (Andersen et al. 2012, S. 75).

Hinsichtlich des ruhenden Verkehrs wird vor allem auf das Unfallrisiko für Radfahrende durch Ein- und Ausparkmanöver sowie das Öffnen von Autotüren hingewiesen. Gleichzeitig wird aber auch darauf hingewiesen, dass Parkbeschränkungen zur Erhöhung des Geschwindigkeitsniveaus im Kfz-Verkehr führen können. Es wird empfohlen das Parken durch Parkstreifen zu ordnen oder die zulässige Geschwindigkeit auf 30 km/h zu reduzieren. Von einseitigem Parken wird eher abgeraten, da dies zu gefährlichen Ein- und Ausparkmanövern führen kann (Andersen et al. 2012, S. 75).

In den Copenhagen Guidelines for the Design of Road Projects – Focus on Cycling wird nicht explizit auf die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr eingegangen (CoC 2013). Es wird lediglich erwähnt, dass die Fahrstreifenbreite um einen Meter erweitert werden sollte, sofern der Radverkehr im Mischverkehr geführt werden soll (CoC 2013, S. 13).

Eine zum Schutzstreifen in Deutschland vergleichbare Führungsform sowie die Markierung von Piktogrammen sind in den genannten Empfehlungen nicht enthalten.

Frankreich

Die von Cerema⁴¹ herausgegebenen Empfehlungen behandeln Grundprinzipien zur Frage, ob und unter welchen Rahmenbedingungen Kfz und Radfahrende getrennt oder gemischt geführt werden sollten (Cerema 2020). Für die Vorauswahl einer geeigneten Radverkehrsführungsform wird ein Schema empfohlen, welches auf Grundlage der niederländischen Empfehlungen (CROW 2016) erstellt worden ist und im Prinzip keine inhaltlichen Unterschiede aufweist. Demnach kommt die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr nur in Wohnstraßen, bis zu einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit ≤ 30 km/h, bis zu einer Verkehrsstärke ≤ 5.000 Kfz/24 h und nur im Basis- und Hauptnetz (≤ 2.500 Rf/24 h) in Frage (Cerema 2020). Analog zu den niederländischen Empfehlungen sind für den innerörtlichen Bereich auch keine Schutzstreifen oder ähnliche Führungsformen (bspw. Piktogramme) enthalten. Lediglich in Certu (2007, S. 43) werden diese für Straßen in ländlichen Gegenden empfohlen. Konkrete Vorgaben zu Fahrbahnbreiten oder Sicherheitsabständen zum ruhenden Verkehr werden sowohl nach Cerema (2020) als auch nach Certu (2007) nicht gegeben.

Großbritannien

In Großbritannien erfolgt die Vorauswahl einer geeigneten Radverkehrsführungsform nach DfT (2020, S. 33) in Abhängigkeit der Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs sowie der v_{85} -Geschwindigkeit (die Geschwindigkeit, die von 85 % der Kfz-Führenden nicht überschritten wird), wobei grundsätzlich zwischen Mischverkehr, Radfahrstreifen und Radwegen unterschieden wird (siehe Tab.-A 1). Hervorzuheben ist dabei, dass zusätzlich nach Randbedingungen differenziert wird, die

- „für die meisten Menschen geeignet sind,
- nicht für alle Menschen geeignet sind und einige potenzielle Nutzenden ausschließen und/oder Sicherheitsbedenken aufwerfen,
- für wenige Menschen geeignet sind und die meisten potenziellen Nutzenden ausschließen und/oder Sicherheitsbedenken aufwerfen“ (DfT 2020, S. 33).

Die mit dem Schutzstreifen in Deutschland vergleichbare Advisory Cycle Lane ist eine Sonderform des Radfahrstreifens (nicht wie in Deutschland des Mischverkehrs) (DfT 2020, S. 62).

Radverkehr im Mischverkehr wird nach DfT (2020, S. 73) nur auf Wohnstraßen und auf ländlichen Wegen mit geringem Verkehrsaufkommen empfohlen. Es ist zulässig (siehe Tab.-A 1; Interpretation der Randbedingungen die „für die meisten Menschen geeignet sind“) bis zu einer Kfz-Verkehrsstärke 2.500 Kfz/24 h bei einer v_{85} -




⁴¹ Cerema ist das französische Studien- und Fachzentrum für Risiken, Umwelt, Mobilität und Raumordnung und beinhaltet das Forschungszentrum für Transportnetze, Stadtplanung und öffentliche Bauten (Certu), welches die letzten Planungsrichtlinien für Radverkehrsanlagen in Frankreich herausgegeben haben (Certu 2007).

Geschwindigkeit von 32 km/h (20 mph). Bei einer v_{85} -Geschwindigkeit von 48 km/h (30 mph⁴²) wird die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr nicht empfohlen, wenn es für die meisten Menschen geeignet sein soll. Soll zugelassen werden, dass einige potenzielle Nutzenden ausgeschlossen und/oder Sicherheitsbedenken aufgeworfen werden, kann Radverkehr im Mischverkehr auf der Fahrbahn bei einer $v_{85} = 20$ mph bis zu einer Kfz-Verkehrsstärke von 4.500 Kfz/24 h und bei einer $v_{85} = 30$ mph bis zu einer Kfz-Verkehrsstärke von 2.500 Kfz/24 h zur Anwendung kommen.

Radfahrstreifen sind ausschließlich bei einer $v_{85} = 20$ mph und bis zu einer Kfz-Verkehrsstärke von 4.500 Kfz/24 h für alle Menschen geeignet. Bei einer $v_{85} = 30$ mph werden baulich separierte Radverkehrsanlagen empfohlen. Soll zugelassen werden, dass einige potenzielle Nutzenden ausgeschlossen und/oder Sicherheitsbedenken aufgeworfen werden, können Radfahrstreifen bei einer $v_{85} = 20$ mph bis zu einer Kfz-Verkehrsstärke von ≥ 6.000 Kfz/24 h und bei einer $v_{85} = 30$ mph bis zu einer Kfz-Verkehrsstärke von 4.500 Kfz/24 h zur Anwendung kommen.

Tab.-A 1 Vorauswahl der Radverkehrsführungsform in Großbritannien nach DfT (2020, S. 33)

Speed Limit ¹	Motor Traffic Flow (pcu/24 hour) ²	Protected Space for Cycling			Cycle Lane (mandatory/ advisory)	Mixed Traffic
		Fully Kerbed Cycle Track	Stepped Cycle Track	Light Segregation		
20 mph ³	0	Green	Green	Green	Green	Green
	2000	Green	Green	Green	Green	Green
	4000	Green	Green	Green	Green	Yellow
	6000+	Green	Green	Green	Yellow	Yellow
30 mph	0	Green	Green	Green	Yellow	Yellow
	2000	Green	Green	Green	Yellow	Yellow
	4000	Green	Green	Green	Yellow	Pink
	6000+	Green	Green	Green	Pink	Pink
40 mph	Any	Green	Yellow	Yellow	Pink	Pink
50+ mph	Any	Green	Pink	Pink	Pink	Pink

	Provision suitable for most people
	Provision not suitable for all people and will exclude some potential users and/or have safety concerns
	Provision suitable for few people and will exclude most potential users and/or have safety concerns

Notes:

1. If the 85th percentile speed is more than 10% above the speed limit the next highest speed limit should be applied
2. The recommended provision assumes that the peak hour motor traffic flow is no more than 10% of the 24 hour flow
3. In rural areas achieving speeds of 20mph may be difficult, and so shared routes with speeds of up to 30mph will be generally acceptable with motor vehicle flows of up to 1,000 pcu per day

Hinsichtlich der Breite der Fahrstreifen bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr werden „wünschenswerte“ Mindestwerte angegeben, wobei Breiten zwischen 3,20 m und 3,90 m vermieden werden sollten, da Kfz-Führende Radfahrende ohne Fahrstreifenwechsel überholen können, allerdings ohne die Einhaltung von Mindestüberholabständen (DfT 2020, S. 76). Die „wünschenswerte“ Mindestfahrstreifenbreite beträgt bis zu einer zulässigen Geschwindigkeit von 30 mph 3,00m und auf Linienbusrouten, oder einem Schwerverkehrsanteil von $> 8 \%$, oder einer zulässigen Geschwindigkeit von 40 mph 3,20 m (DfT 2020, S. 76). Zum Umgang mit dem ruhenden Verkehr werden keine konkreten Vorgaben gemacht. Es kann hilfreich sein, dass Flächen für den ruhenden Verkehr baulich (Bord) von der Fahrbahn separiert werden (DfT 2020, S. 82).

⁴² In Großbritannien sind in allgemein in geschlossenen Ortschaften sowie in bebauten Gebieten maximal 30 mph erlaubt.

Die mit dem Schutzstreifen vergleichbaren Advisory Cycle Lanes sollten nur verwendet werden, wenn der insgesamt verfügbare Platz begrenzt ist, so dass Kraftfahrzeuge gelegentlich auf dem Radfahrstreifen fahren müssen. Nicht empfohlen werden sie, wenn sie durch parkende Fahrzeuge blockiert werden können (DfT 2020, S. 62). Bei den Empfehlungen hinsichtlich der Breite wird nicht zwischen Schutz- oder Radfahrstreifen differenziert. Radfahrstreifen sollten 2,00 m mindestens aber 1,50 m breit sein (DfT 2020, S. 43). Weiterhin ist zwischen den Anlagen für den ruhenden Verkehr und dem Radfahrstreifen ein Sicherheitstrennstreifen von 0,50 m vorzusehen (DfT 2020, S. 64). Hinsichtlich der nutzbaren Fahrbahnbreite werden keine Empfehlungen gegeben.

Weitere Empfehlungen herausgegeben von Sustrans (eine Stiftung für Fuß- und Radverkehr), enthalten eine andere Darstellung zur Vorauswahl der Radverkehrsführungsform basierend auf der Vorauswahl nach DfT (2008, S. 13) (vgl. Tab.-A 1), welche in Bild-A 2 zu finden ist (Sustrans 2014, S. 6). Danach ist die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr geeignet unter folgenden Bedingungen (v_{85} -Geschwindigkeit und Verkehrsstärke):

- bei einer $v_{85} \leq 20$ mph (32 km/h) bis zu ca. 6.000 Kfz/24 h
- bei einer $v_{85} = 30$ mph (48 km/h) bis zu ca. 2.000 Kfz/24 h

Radfahrstreifen und entsprechend auch Schutzstreifen können demnach unter folgenden Bedingungen zur Anwendung kommen:

- bei einer $v_{85} \leq 20$ mph (32 km/h) bis zu ca. 10.000 Kfz/24 h
- bei einer $v_{85} = 30$ mph (48 km/h) bis zu ca. 5.000 Kfz/24 h

Hinsichtlich der Breiten machen Sustrans (2014, S. 16) verschiedene Angaben: Für Straßen mit niedrigen Geschwindigkeiten und geringer Verkehrsstärke sind Querschnittsbreiten für zweistreifige Fahrbahnen von 4,10 m (Begegnungsfall PKW-PKW), 4,80 m (Begegnungsfall LKW-PKW) oder 5,50 m (Begegnungsfall LKW-LKW) möglich. Es wird aber darauf hingewiesen, dass diese Breiten schmaler sind, als die zum Überholen erforderlichen Breiten. Soll ein durchgängiges Überholen möglich sein, werden Breiten von 4,30 m (Pkw überholt Rad bei $v_{zul} = 20$ mph) bis 5,60 m (LKW/Bus überholt Rad bei $v_{zul} = 30$ mph) je Fahrstreifen empfohlen.

Radfahrstreifen (und entsprechend auch die Sonderform Schutzstreifen) sollten mindestens 1,50 m breit sein. Konkrete Angaben zur Restfahrbahnbreite werden auch durch Sustrans (2014, S. 18) nicht gemacht.

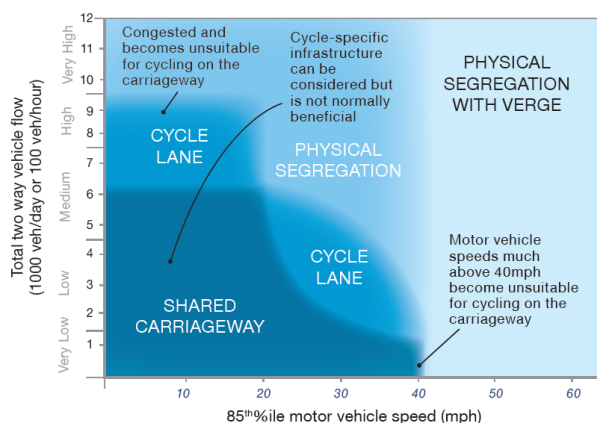


Bild-A 2 Vorauswahl der Radverkehrsführungsform in Großbritannien nach Sustrans (2014, S. 6)

Neben den vorgestellten Empfehlungen kommen in Großbritannien auch kommunale Regelwerke wie beispielsweise TfL (2016) zur Anwendung.

Irland

Nach dem irischen National Cycle Manual (NTA 2011, S. 19) ist die Vorauswahl einer geeigneten Radverkehrsführungsform in Abhängigkeit der durchschnittlich täglichen Verkehrsstärke und der v_{85} -Geschwindigkeit vorzunehmen (siehe Bild-A 3). Demnach ist Radverkehr im Mischverkehr bei einer

- $V_{85} = 30$ km/h bis zu einer Verkehrsstärke von 10.000 Pkw/24 h und
- $V_{85} = 50$ km/h bis zu einer Verkehrsstärke von ca. 3.500 Pkw/24 h

möglich. In den Erläuterungen zu der Grafik wird allerdings darauf hingewiesen, dass eine zulässige Geschwindigkeit von 30 km/h ein zentraler Bestandteil dieser Führungsform ist (dabei wird auch auf die niederländischen Richtlinien verwiesen). Grundsätzlich wird nach NTA (2011, S. 20) darauf hingewiesen, dass Radverkehr im Mischverkehr nur auf Straßen mit geringer Verkehrsstärke (bspw. Wohnstraßen oder Einkaufsstraßen) und geringen Geschwindigkeiten zu empfehlen ist. Das Hauptmerkmal aus Sicht des Radverkehrs ist, dass Radfahrende und PKW hintereinander fahren und nicht nebeneinander (NTA 2011, S. 20). Zudem wird die Markierung von Rad-Piktogrammen in der Mitte des jeweiligen Fahrstreifens empfohlen.

Hinsichtlich der Breiten wird grundsätzlich zwischen zwei Profilen unterschieden (NTA 2011, S. 53 ff.): schmale Straßen (< 5,50 m) und breite Straßen (5,50 m bis 7,00 m). Einziger Unterschied zwischen den beiden Querschnitten ist die Markierung einer Leitlinie zur Trennung des Gegenverkehrs bei breiten Straßen (> 5,50 m).

Die Anlage von Flächen für den ruhenden Verkehr ist möglich ohne dass näher darauf eingegangen wird.

Schutzstreifen gelten wie auch in Großbritannien als Sonderform von Radfahrstreifen. Dementsprechend können diese nach Bild-A 3 bei einer

- $V_{85} = 30$ km/h bei Verkehrsstärken > 10.000 Pkw/24 h und
- $V_{85} = 50$ km/h bis zu einer Verkehrsstärke von ca. 5.500 Pkw/24 h

zur Anwendung kommen. Schutzstreifen sollen aber nur in Ausnahmefällen verwendet werden, wenn Radfahrstreifen ungeeignet sind (NTA 2011, S. 56), wobei nicht näher definiert wird, was ungeeignet bedeutet. Zudem sollten sie nur im Zuge von zweistreifigen Sammelstraßen verwendet werden. Die Markierung von Schutzstreifen in der Nähe von Schulen wird aufgrund des Hol- und Bringverkehrs nicht empfohlen (NTA 2011, S. 58). Nach NTA (2011, S. 58) sind Schutzstreifen am effektivsten in Situationen, in denen keine Nachfrage nach Parken oder Laden am Fahrbahnrand besteht. Die Regelbreite für Radfahrstreifen im Allgemeinen beträgt 2,00 m (NTA 2011, S. 58).

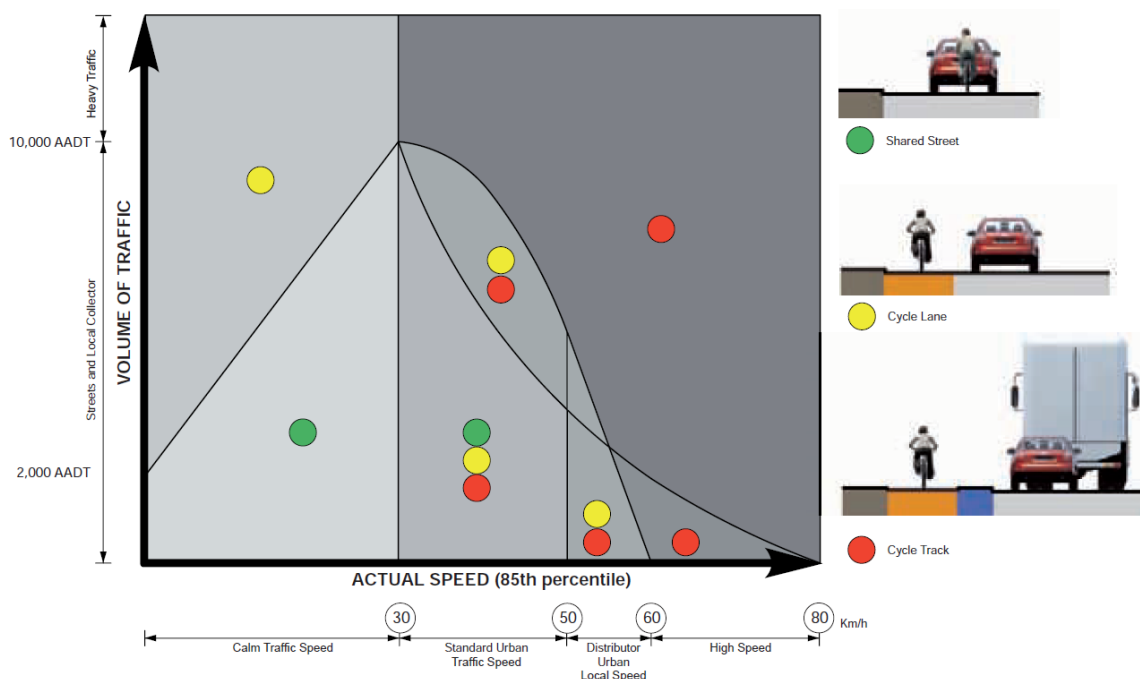


Bild-A 3 Vorauswahl der Radverkehrsführungsform in Irland nach NTA (2011, S. 19)

Niederlande

Nach dem niederländischen Design Manual for Bicycle Traffic (CROW 2016, S. 102) wird die Führungsform in Abhängigkeit der Straßenkategorie, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, der Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs sowie der Radverkehrsnetzategorie bestimmt. Danach kommt die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr nur unter folgenden Bedingungen in Frage:

- Wohnstraßen
- zulässigen Höchstgeschwindigkeit ≤ 30 km/h
- Verkehrsstärke ≤ 5.000 Kfz /24 h in Frage
- Basis- und Hauptradnetz (≤ 2.500 Rf/24 h)

Hinsichtlich der Fahrbahnbreiten wird nach CROW (2016, S. 227) grundsätzlich zwischen schmalem (4,80 m) und weitem Profil (5,80 m) unterschieden. In Fällen von geringer Kfz- und Radverkehrsstärke sollte ein schmaler Querschnitt gewählt werden, wobei schmal bedeutet, dass Kfz im Fall von Gegenverkehr Radfahrende nicht überholen können. Je höher die Verkehrsstärken desto unsicherer und ungeduldiger wird das Verhalten der Kfz-Führenden in solchen Situationen, was zu gefährlichen Überholmanövern führen kann. Dann können breitere Querschnitte vorgesehen werden, die den Kfz-Führenden sichere Überholmanöver trotz Gegenverkehr erlauben. Die Vorauswahl, ob ein schmaler oder breiterer Querschnitt geeignet ist, wird in Abhängigkeit der Kfz- und Radverkehrsstärke getroffen. Ähnlich wie auch nach den ERA empfohlen, sollen Breiten vermieden werden, die eine unklare Situation hinsichtlich von Überholungen bei Gegenverkehr schaffen. Kurzum: Entweder ist Überholen bei Gegenverkehr nicht möglich oder es ist sicher möglich, wobei Ersteres zu bevorzugen ist. Denn breitere Querschnitte können das Geschwindigkeitsniveau im Kfz-Verkehr unter Umständen erhöhen, so dass wiederum zusätzliche geschwindigkeitsreduzierende Maßnahmen erforderlich werden, um den Komfort und die Sicherheit der Radfahrenden zu gewährleisten (CROW 2016, S. 106).

Ein wesentlicher Faktor zur Steigerung der Nutzung und der Verkehrssicherheit des Radverkehrs in den Niederlanden, ist die Schaffung einer klaren Straßenhierarchie – das betrifft einerseits viele verkehrsberuhigte Bereichen ohne Durchgangsverkehr, in denen der Radverkehr im Mischverkehr geführt werden kann, und andererseits die Bündelung des motorisierten Verkehr auf größeren Straßen, auf denen der Radverkehr separat geführt wird (Schepers et al. 2015, S. 267).

Ruhender Verkehr sollte im Zuge des Hauptradnetzes und von Radschnellwegen vermieden werden. Es wird nochmal verdeutlicht, dass Parken sowohl ein Hindernis als auch eine potentielle Gefahr (Öffnen von Autotüren, Ein- und Ausparkmanöver) für Radfahrende darstellt (CROW 2016, S. 106).

Schutzstreifen kamen in der Vergangenheit auch in den Niederlanden zur Anwendung. Nach CROW (2016, S. 111) wird aber empfohlen, klare Entscheidungen zu treffen: Entweder man entscheidet sich für eine vollwertige Radverkehrsanlage, oder man führt den Radverkehr vollständig im Mischverkehr.

Norwegen

Nach dem norwegischen Radverkehrshandbuch (Sykkelhåndboka) werden keine quantifizierbaren Aspekte bei der Vorauswahl der Radverkehrsführungsform berücksichtigt. Vielmehr sind die folgenden Faktoren qualitativ zu berücksichtigen (NPRA 2013, S. 23):

- Umgebung und Gebietstyp (Stadt / Dorf oder Land)
- Lösungen für benachbarte Abschnitte
- Radverkehrsnetz (Hauptnetz, lokales/Nebennetz)
- Zusammensetzung und Verkehrsstärke des Radverkehrs
- Geschwindigkeit, Zusammensetzung und Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs
- Anzahl der Gehenden

Radverkehr im Mischverkehr ist nur bei geringen Verkehrsaufkommen, niedrigen Geschwindigkeiten und einem geringen Schwerverkehrsanteil geeignet, auch wenn diese Führungsform die häufigste Lösung auf norwegischen Straßen ist (NPRA 2013, S. 25). Im Hauptnetz wird daher empfohlen, Hinweisschilder für Radverkehr anzuordnen, so dass erkenntlich ist, das Radfahrende die Straße benutzen. Die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr wird bis zu einer Verkehrsstärke von 4.000 Kfz/24 h empfohlen. Nicht geeignet ist diese Lösung im Zuge von Schulwegen (NPRA 2013, S. 25). Zur Fahrbahnbreite werden keine konkreten Vorgaben gemacht.

Hinsichtlich des ruhenden Verkehrs wird empfohlen, Sicherheitsräume zu parkenden Fahrzeugen vorzusehen ohne dass dies hinsichtlich von Dimensionierung und Ausführung konkretisiert wird (NPRA 2013, S. 25).

Mit dem Schutzstreifen in Deutschland vergleichbar sind in Norwegen sog. Sykkelfelt (NPRA 2013, S. 25 ff.). Sie können im Bedarfsfall von Kfz überfahren werden, sind aber hinsichtlich der planerischen Anwendung eher mit Radfahrstreifen zu vergleichen sind. Generell müssen alle Teile des Radhauptnetzes über diese Schutzstreifen verfügen. Sie sind mit einer Strich-Lücke-Markierung abgegrenzt und müssen mit dem Fahrradsymbol gekennzeichnet sein und können auch farblich markiert werden. In Situationen, in denen das Überqueren der Markierung verboten werden soll (bspw. an Knotenpunkten), können diese Schutzstreifen auch mit einer durchgezogenen Linie markiert werden. Generell sind diese Schutzstreifen anwendbar, wenn

- die Kfz-Verkehrsstärke $> 4.000 \text{ Kfz/24 h} \leq 15.000 \text{ Kfz/24 h}$ und/oder
- die zulässige Höchstgeschwindigkeit = 50 km/h

beträgt (NPRA 2013, S. 26). Ähnlich wie in Deutschland wird auch in Norwegen empfohlen, bei Gefälle Radfahrende zusammen mit dem Kfz-Verkehr auf einem Fahrstreifen zu führen, da sie für einbiegenden/kreuzenden Verkehr besser gesehen werden, als auf der eigenen Fläche (NPRA 2013, S. 26).

Die Schutzstreifen in Norwegen sollten bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 30 km/h eine Breite von bis zu 1,50 m (1,25 m + 0,25 m Bordsteinabstand) haben. Bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h wird diese Breite bis zu einer Verkehrsstärke von $< 8.000 \text{ Kfz/24 h}$ empfohlen. Bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h und einer Verkehrsstärke von $> 8.000 \text{ Kfz/24 h}$ bis 15.000 Kfz/24 h sollte die Breite der Schutzstreifen 1,80 m (1,55 + 0,25 m Bordsteinabstand) betragen (NPRA 2013, S. 28).

Die Fahrbahnbreite sollte bei beidseitigen Schutzstreifen mindestens 8,50 m betragen, was im Regelfall einer Restfahrbahnbreite von 5,50 m entspricht. Bei regelmäßigen Busverkehr sollte die Restfahrbahnbreite 3,25 m in der entsprechenden Richtung betragen (NPRA 2013, S. 27).

Eine Kombination aus Schutzstreifen und ruhendem Verkehr am Fahrbahnrand sollte grundsätzlich eher vermieden werden. Ruhender Verkehr in Verbindung mit Schutzstreifen kann nur zugelassen werden, wenn die folgenden Aspekte erfüllt sind (NPRA 2013, S. 31):

- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 30 km/h oder 40 km/h und Kfz-Verkehrsstärke $< 8.000 \text{ Kfz/24 h}$
- Verbreiterung des Schutzstreifens um 0,25 m und Berücksichtigung eines Sicherheitsraumes zum ruhenden Verkehr von mindestens 0,5 m

Österreich

Nach dem österreichischen Merkblatt Radverkehr (FSV 2014, S. 12 ff.) erfolgt die Wahl einer geeigneten Radverkehrsführungsform grundsätzlich anhand des Kfz-Kriteriums und des Flächenkriteriums. Innerhalb des Kfz-Kriteriums wird die geeignete Radverkehrsführungsform unter Berücksichtigung der Kfz-Verkehrsstärke sowie der v_{85} -Geschwindigkeit bestimmt (FSV 2014, S. 13). Danach kann der Radverkehr im Mischverkehr (ohne oder mit Mehrzweckstreifen⁴³) grundsätzlich

- bis zu einer Verkehrsstärke von ca. 15.000 Kfz/24 bei einer $v_{85} \leq 30 \text{ km/h}$ und
- bis zu einer Verkehrsstärke von ca. 10.000 Kfz/24 bei einer $v_{85} \leq 50 \text{ km/h}$

⁴³ vergleichbar mit dem Schutzstreifen in Deutschland

geführt werden. Bei höheren Verkehrsstärken oder einer v_{85} -Geschwindigkeit > 30 km/h ist zwischen Trenn- und Mischprinzip zu entscheiden. Als eindeutiges Entscheidungskriterium wird hier der Schwerverkehrsanteil aufgeführt: Somit ist ab 50 LKW und Bussen je Richtung und Stunde das Trennprinzip zu bevorzugen.

Das Flächenkriterium ist im Grunde erfüllt, wenn die erforderlichen Flächen für die Radverkehrsführung sowie andere für andere Nutzungen vorhanden sind. Sollte die erforderliche Fläche nicht zur Verfügung stehen, ist zunächst die Reduzierung von Stellplätzen oder Grünflächen sowie eine Reduzierung der zulässigen Geschwindigkeit des Kfz-Verkehrs zu prüfen. Können sowohl das Flächen- als auch das Kfz-Kriterium nicht erfüllt werden, sind alternative Routen zur Führung des Radverkehrs zu prüfen (FSV 2014, S. 13).

Hinsichtlich der Breiten sind bei der Führung im Mischverkehr ohne Mehrzweckstreifen ähnlich wie nach den deutschen Empfehlungen (FGSV 2010a) kritische Breiten zwischen 6,00 und 7,50 m zu vermeiden (FSV 2014, S. 28). Das heißt, entweder ist die Fahrbahn so schmal das Rad und Kfz hintereinanderfahren ($< 6,00$ m) oder so breit, dass ein gefahrloses Überholen möglich ist ($> 7,50$ m) (FSV 2014, S. 29). Dazu ist allerdings anzumerken, dass ab einer Fahrbahnbreite von 7,50 m die Anlage von Mehrzweckstreifen möglich ist.

Mehrzweckstreifen sollten in der Regel 1,50 m (neben Bord) bzw. 1,75 m (neben ruhendem Verkehr) breit sein (FSV 2014, S. 26). Anders als nach dem deutschen Regelwerk, wird der Sicherheitsraum (0,25 m) zum ruhenden Verkehr dem Mehrzweckstreifen zugeschlagen. Die Kernfahrbahnbreite sollte dabei zwischen 4,50 m und 5,50 m betragen. Eine Markierung der Mittelleitlinie wird auf Fahrbahnen mit Mehrzweckstreifen als nicht sinnvoll erachtet (FSV 2014, S. 26).

Die Verwendung von Fahrradpiktogrammen zur Verdeutlichung des Radverkehrs auf der Fahrbahn wird nach FSV (2014, S. 28) lediglich für die Öffnung von Einbahnstraßen für den Radverkehr empfohlen. Allerdings kamen im Rahmen einer Vorher-Nachher-Untersuchung in Wien Piktogrammketten auf herkömmlichen Straßen mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr zum Einsatz (Knoflacher 2014, S. 8 ff.).

Schweiz

In der Schweiz gibt es, anders als in den bisher analysierten Ländern, keine umfassenden Richtlinien oder Empfehlungen für die Radverkehrsinfrastruktur. Vielmehr finden sich Vorgaben u.a. in der durch die Vereinigung schweizerischer Strassenfachleute (VSS) herausgegebene Norm SN 640 303 „Strassenprojektierung – Entwurf von Hauptverkehrsstraßen innerorts“. Danach ist die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr „(...) *grundsätzlich nur bei tiefen Geschwindigkeiten (30... 40 km/h) oder tiefen Verkehrsbelastungen des Mfz-Verkehrs (DTV < 5000... 8000) [Kfz/24 h, Anm. d. Verf.] (...)*“ (VSS 2017, S. 39) anzuwenden. Hinsichtlich der Breiten wird von VSS (2017, S. 39) auf Bild-A 4, welches das Ergebnis einer Untersuchung von Reichenbach und Affolter (2003, S. Z 3) ist, verwiesen. Aufbauend auf Unfallauswertungen und Videoanalysen an insgesamt 26 Querschnitten (19 innerorts) wurden in Abhängigkeit der Verkehrsstärke folgende geeignete Breiten für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr abgeleitet (vgl. Bild-A 4):

- 5,00 – 6,00 m bei Verkehrsstärken ≤ 5.000 Kfz/24 h (bei Geschwindigkeiten < 50 km/h und geringem Schwerverkehr ≤ 7.500 Kfz/24 h) (Bild-A 4, Bereich 1a und 1b) und
- 7,00 – 7,50 m bei Verkehrsstärken ≤ 10.000 Kfz/24 h und einem Schwerverkehrsanteil von 6% (bei Geschwindigkeiten < 50 km/h und geringem Schwerverkehr ≤ 15.000 Kfz/24 h) (Bild-A 4, Bereich 3a und 3b).

Innerhalb der VSS (2017) ergibt sich somit eine Diskrepanz, da für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Markierung sowohl ≤ 8.000 Kfz/24 h (textliche Erläuterungen) als auch ≤ 10.000 Kfz/24 h (Bild-A 4) als maximal verträgliche Kfz-Verkehrsstärke empfohlen wird.

Zwischenprofile im Bereich um 6.50 m (Bild-A 4, Bereich 2) sind in Bezug auf die Begegnung Velo/PKW als kritisch einzustufen (Reichenbach und Affolter 2003, S. Z 2). Während Reichenbach und Affolter (2003, S. Z 2) die Verträglichkeit dieser Zwischenprofile lediglich bei sehr geringen Verkehrsstärken sehen, sind diese nach VSS (2017, S. 39) gänzlich zu vermeiden.

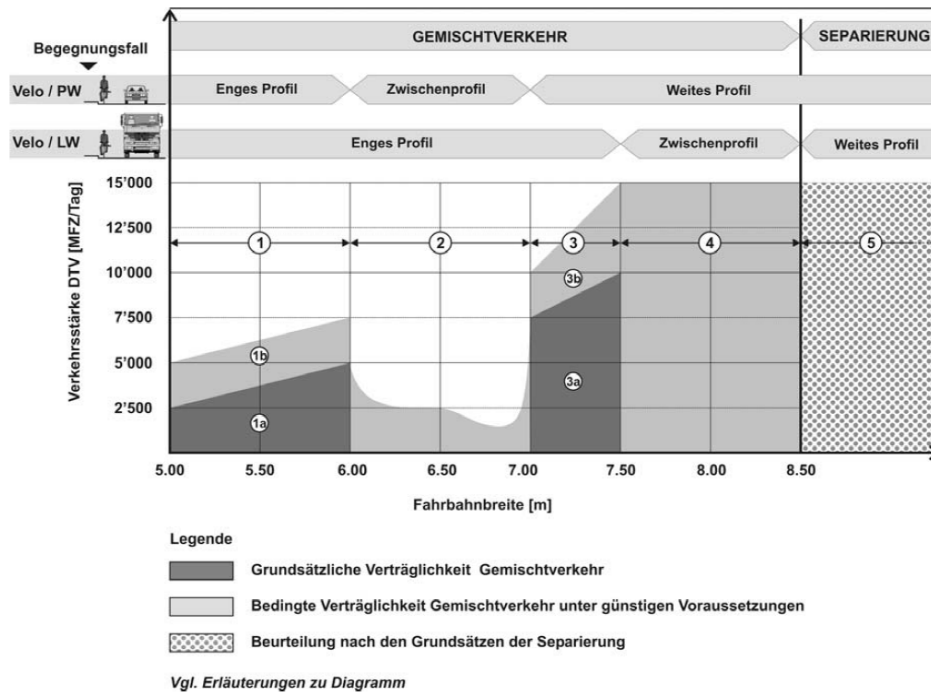


Bild-A 4 Verträglichkeit der Mischverkehrsführung innerorts nach Reichenbach und Affolter (2003, S. Z 3)

Ab einer Breite von 8,50 m ist die beidseitige Anlage von Velostreifen möglich. Velostreifen sind mit den Schutzstreifen in Deutschland vergleichbar, da sie vom motorisierten Verkehr überfahren werden dürfen, wenn der Radverkehr dadurch nicht behindert wird. Nach VSS (2017, S. 39) stellen Velostreifen „(...) in der Schweiz den Regelfall auf stärker belasteten Hauptverkehrsstrassen dar und (...)“ werden „(...) innerorts bei Geschwindigkeiten von 40 ... 60 km/h und einem DTV über 5000 ... 8000 [Kfz/24 h, Anm. d. Verf.] angewendet“. Das Regelmaß der Velostreifen beträgt 1,50 m, das Mindestmaß 1,25 m.

Weitere ergänzende Empfehlungen sind in den Normen SN 640 060 „Leichter Zweiradverkehr“ (VSS 1994), SN 640 201 „Geometrisches Normalprofil, Grundabmessungen und Lichtraumprofil“ (VSS 1992) oder SN 640 291a „Parkieren, Anordnung und Geometrie der Parkieranlagen“ (VSS 2006) zu finden..

Darüber hinaus geben einzelne Kantone eigene und die Normen zusammenfassende Empfehlungen für die Gestaltung und Dimensionierung von Radverkehrsanlagen heraus. Beispielhaft wird hier auf die Merkblätter der Kantone Bern und St. Gallen eingegangen:

Die vom Tiefbaumt des Kantons Bern herausgegebene Arbeitshilfe „Anlagen für den Veloverkehr“ (TBA Bern 2018) behandelt vorrangig separate Flächen für den Radverkehr, das heißt sog. Velostreifen und -wege. Velostreifen können demnach bis zur einer Verkehrsstärke von 10.000 Kfz/24 h mit einem Schwerverkehrsanteil von < 400 LKW/24 h zur Anwendung kommen (TBA Bern 2018, S. 10). Zusätzlich zu dem durch die VSS (2017, S. 39) vorgegebenen Regelmaß von 1,50 m werden durch TBA Bern (2018, S. 8 ff.) konkrete Aspekte genannt, nach denen Velostreifen auch schmaler oder breiter ausgeführt werden können:

- bei bspw. geringem Gefälle oder geringem Schwerverkehrsanteil können Velostreifen schmaler (1,25 m),
- in Kurven, bei hohem Schwerverkehrsanteil (> 6 %) oder generell bei hohen Verkehrsstärken oder auf Schulwegen können Velostreifen breiter (1,55 m bis 1,85 m) und
- bei sehr hohem Verkehrsaufkommen oder einem hohen Anteil an E-Bikes sollten Velostreifen sogar mit einer Breite von 2,30 m bis 2,50 m (um ein Überholen zwischen Radfahrenden zu ermöglichen)

ausgeführt werden. In diesem Zusammenhang wird auch auf die VSS (1992) verwiesen. Die Fahrbahnbreite zwischen den Velostreifen sollte in allen Fällen zwischen 5,00 m und 5,50 m betragen (TBA Bern 2018, S. 9). Auf

Anlagen für den ruhenden Verkehr wird nicht explizit eingegangen. Für die Anlage von Radstreifen wird aber eine lichte Breite von 0,50 m gegenüber festen Hindernissen vorausgesetzt (TBA Bern 2018, S. 8).

Innerhalb der Richtlinie des Kantons St. Gallen wird innerhalb der Grundsätze der Radverkehrsplanung näher auf die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr ohne Markierungslösung eingegangen (TBA St. Gallen 2016, RRV 01 S. 7): So kann der Radverkehr auf Straßen mit niedrigen Geschwindigkeiten, geringer Verkehrsstärke, geringem Schwerverkehrsanteil sowie einer geringen Frequenz von Linienbussen gemischt mit dem motorisierten Verkehr ohne Radstreifen geführt werden. Allerdings werden die o.g. Bedingungen nicht näher quantifiziert. Im Hauptverkehrsstraßennetz sollen im Regelfall durchgehend Velostreifen zur Anwendung kommen (TBA St. Gallen 2016, RRV 01 S. 7). Hinsichtlich der Breiten wird bis zu einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h eine Mindestbreite von 1,50 m und bei höheren Geschwindigkeiten 1,80 m empfohlen (TBA St. Gallen 2016, RRV 02 S. 4). Analog zu den Vorgaben nach TBA Bern (2018, S. 8 ff.) sollten in Kurven, auf Schulwegen sowie bei einem generell hohen Radverkehrsanteil sollten Zuschläge von 0,10 m bis 0,30 m vorgesehen werden (TBA St. Gallen 2016, RRV 02 S. 5). Hinsichtlich des ruhenden Verkehrs wird ein Sicherheitstrennstreifen von 0,50 m empfohlen (TBA St. Gallen 2016, RRV 02 S. 6).

Australien

Die Vorauswahl der Radverkehrsführungsform in den australischen Empfehlungen (Austroads 2014, S. 15) wird in Abhängigkeit der Verkehrsstärke sowie der v_{85} -Geschwindigkeit vorgenommen (siehe Bild-A 5). Danach kann ähnlich wie in den Niederlanden der Radverkehr bis zu einer Verkehrsstärke ≤ 5.000 Kfz/24 h und einer $v_{85} \leq 40$ km/h im Mischverkehr geführt werden. Bei einer v_{85} -Geschwindigkeit von 50 km/h beträgt die zulässige Verkehrsstärke ca. 3000 Kfz/24 h. Allerdings wird in diesem Zusammenhang auch angemerkt, dass wo immer die Platzverhältnisse es zulassen, Radverkehrsanlagen vorzusehen sind. Außerdem sollten der Radverkehr auf kurvenreichen Straßen oder auf Straßen mit hohem Schwerverkehrsanteil auf Radfahrstreifen geführt werden (Austroads 2014, S. 14). Eine mit den Schutzstreifen vergleichbare Führungsform kommt ist im australischen Regelwerk nicht aufgeführt.

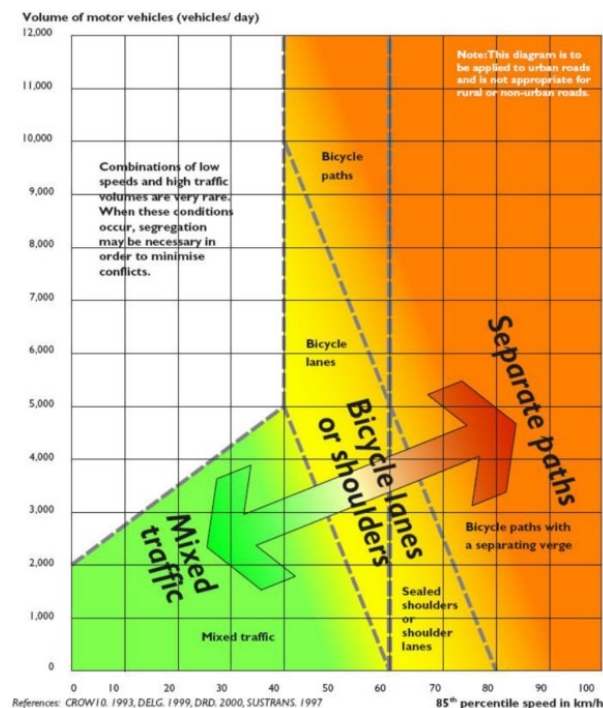


Bild-A 5 Vorauswahl der Radverkehrsführungsform in Australien nach Austroads (2014, S. 15)

Konkrete Breitenvorgaben werden nach Austroads (2014) für sog. „breite“ Fahrbahnen (i.d.R. ohne Flächen für den ruhenden Verkehr), welche in Bereichen des Hauptverkehrs- und Sammelstraßennetzes hauptsächlich zur Anwendung kommen sollen, gegeben. Diese sollen es den Radfahrenden ermöglichen, neben dem Kfz-Strom zu fahren: Bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h sollte der Fahrstreifen mindestens 3,70 m breit sein. Wird am Fahrbahnrand geparkt, sollte der jeweilige Fahrstreifen mindestens 4,00 m breit sein. Die empfohlene Regelbreite beträgt 4,20 m (Austroads 2014, S. 32).

Zu alternativen Markierungslösungen zur Erhöhung der Aufmerksamkeit hinsichtlich von Radfahrenden auf der Fahrbahn (bspw. Fahrradpiktogramme auf der Fahrbahn) werden keine konkreten Angaben gemacht. Es wird allerdings allgemein darauf hingewiesen, dass Fahrbahnmarkierungen, Warn- oder Leitbeschilderung Anwendung finden können, ohne dass sie eine regulierende oder verkehrsrechtliche Relevanz haben. Sie werden in der Regel eher zur Beschilderung einer Fahrradrouten angewendet (Austroads 2014, S. 33).

Kanada

Nach dem Ontario Traffic Manual (MTO 2013, S. 30) wird die Vorauswahl der Radverkehrsführungsform, inspiriert von den britischen, niederländischen, dänischen, australischen und neuseeländischen Empfehlungen, in Abhängigkeit der v_{85} -Geschwindigkeit sowie der Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs getroffen (siehe Bild-A 6).

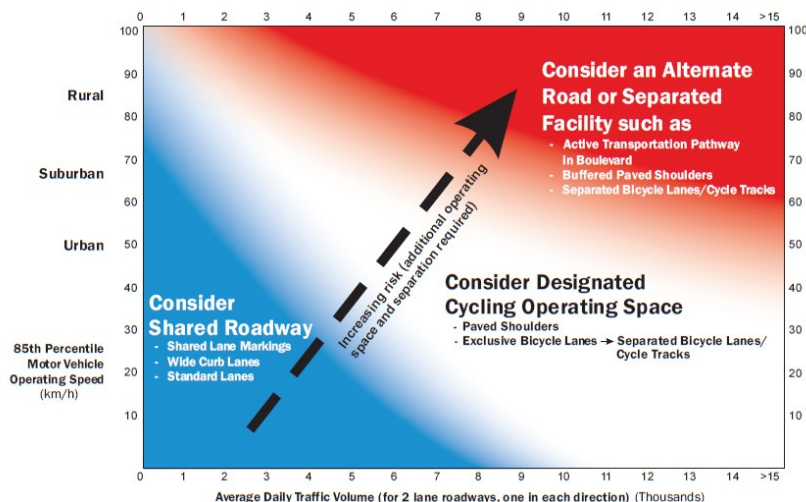


Bild-A 6 Vorauswahl der Radverkehrsführungsform in Kanada nach MTO (2013, S. 30)

Danach ist die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr in Städten möglich bei einer

- $v_{85} = 30$ km/h bis zu einer Verkehrsstärke von ca. 4.000 Kfz/24 h und
- $v_{85} = 50$ km/h bis zu einer Verkehrsstärke von ca. 2.000 Kfz/24 h

Darüber hinaus sind die Netzfunktion der Straße (Nebennetz, wie bspw. Wohnstraßen), der Schwerverkehrsanteil, das Unfallgeschehen sowie die verfügbare Fläche als primäre Kriterien zu berücksichtigen. Als weitere sekundäre Kriterien werden die Kosten, die Verkehrsteilnehmenden in Bezug auf Fähigkeiten und Reisezweck, der Anteil der Radfahrenden, die Funktion in Bezug auf das Radverkehrsnetz, die Art der Maßnahme (Neubau, Umbau, Erneuerung Fahrbahnoberfläche), parkende Fahrzeuge auf der Fahrbahn sowie die Anzahl und Art der Knotenpunkte berücksichtigt (MTO 2013, S. 31).

Entlang ausgewiesener Fahrradrouten kommt die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr i.d.R. auf Straßen im Nebennetz (bspw. Wohnstraßen) mit geringer Kfz-Verkehrsstärke, geringem Schwerverkehrsanteil (< 30 Lkw/24 h) sowie bei Geschwindigkeiten von ≤ 50 km/h zur Anwendung (MTO 2013, S. 31 ff.). Optional wird die Markierung von Radpiktogrammen auf der Fahrbahn („Sharrows“ oder „Shared Use Lane Marking“) empfohlen (MTO 2013, S. 45 ff.). Dabei wird hinsichtlich der Positionierung grundsätzlich zwischen schmalen und breiten Fahrbahnen unterschieden:

- Auf schmalen Fahrstreifen (Regelbreite = 4,00 m, Minimum = 3,00 m) werden die Piktogramme mittig auf dem Fahrstreifen markiert, so dass Kfz und Rad hintereinanderfahren (siehe Bild-A 7, links).
- Auf breiten Fahrstreifen (Regelbreite = 4,50 m, Minimum 4,00 m) werden die Piktogramme am rechten Fahrbahnrand markiert, so dass Kfz und Rad nebeneinander fahren können (siehe Bild-A 7, rechts).

Die dargestellten Maße auf den breiten Fahrstreifen enthalten einen Sicherheitsabstand zum ruhenden Verkehr von ca. 1,00 m, wenn davon ausgegangen wird, dass Radfahrende in mittig auf den Piktogrammen fahren.

Darüber hinaus kann auch zusätzlich Beschilderung zur Erhöhung der Aufmerksamkeit hinsichtlich des Radverkehrs sowie auch zur Positionierung auf dem Fahrstreifen (hintereinander oder nebeneinander) zur Anwendung kommen. Auch ein Verbot des Überholens von Radfahrenden durch Kfz kann angezeigt werden (MTO 2013, S. 45 ff.).

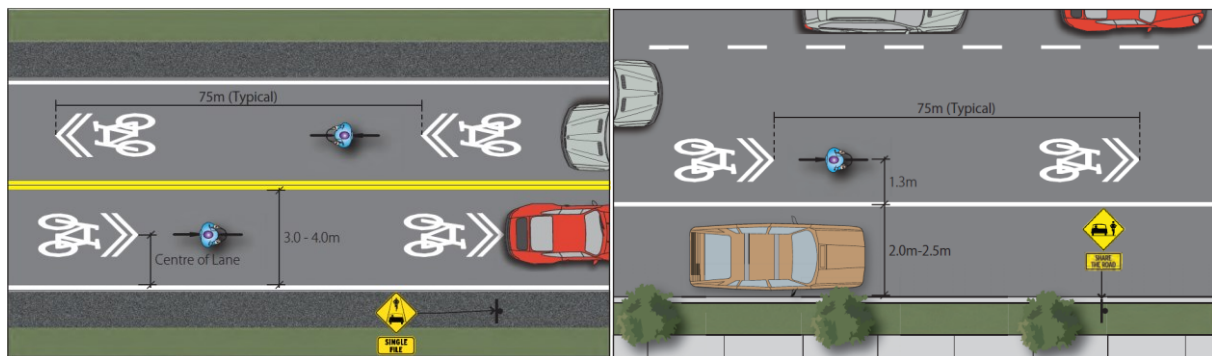


Bild-A 7 Schmale (links) und breite Fahrstreifen (rechts) mit Sharrows (MTO 2013, S. 49)

USA

Nach AASHTO (2012, S. 4-2 ff.) werden grundsätzlich drei Formen der Mischverkehrsführung unterschieden:

- Radverkehr im Mischverkehr ohne weitere Maßnahmen: im Nebennetz (bspw. Wohnstraßen) oder auf gering belasteten Außerortstraßen, Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Ortslage maximal bis 55mph/ 89 km/h, bei < 1.000 Kfz/24 h
- Radverkehr im Mischverkehr auf breiten Fahrstreifen: im Hauptverkehrsnetz (Verbindungsstraßen, Hauptsammelstraßen), bei tendenziell höheren Geschwindigkeiten (> 25 mph/ 40 km/h), bei > 3.000 Kfz/24 h, Markierungslösungen oder Radwege für weniger selbstbewusste Radfahrende sollten geprüft werden
- Radverkehr im Mischverkehr mit Markierung von Fahrradpiktogrammen (Sharrows): im Hauptverkehrs- oder Nebennetz (bspw. Sammelstraßen) auf denen Radwege oder Radfahrstreifen aus Platzgründen nicht angeordnet werden können, bei < 35 mph/ 56 km/h, keine Einsatzgrenze hinsichtlich der Verkehrsstärke, aber günstig auf Straßen mit vielen Parkwechsellvorgängen, da durch die Markierung Dooring-Unfälle vermieden werden, Radfahrstreifen oder Radwege für weniger selbstbewusste Radfahrende sollten geprüft werden

Konkrete Breitenvorgaben hinsichtlich der Führung des Radverkehr im Mischverkehr ohne weitere Maßnahmen gibt es werden nach AASHTO (2012) nicht gegeben. Es wird darauf hingewiesen, dass verschiedene Merkmale die Verträglichkeit von Kfz und Radfahrenden erhöhen können. Dazu gehören bspw. eine hohe Qualität der Fahrbahnoberfläche, angemessene Sichtweiten sowie eine Gestaltung des Straßenraumes, die niedrigere Geschwindigkeiten begünstigt (AASHTO 2012, S. 4-2). Zudem wird die Ermittlung des Level of Service (LOS) nach dem Highway capacity manual (HCM, TRB 2010) empfohlen. Dabei werden Aspekte, wie die Fahrbahnbreite, Geschwindigkeit, Verkehrsstärke, parkende Fahrzeuge und Oberflächenzustand berücksichtigt, um den relativen Komfort von Radfahrenden im Mischverkehr einzustufen (AASHTO 2012, S. 4-2).

Für die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf breiten Fahrstreifen wird nach AASHTO (2012, S. 4-3) darauf hingewiesen, dass Fahrstreifenbreiten von 4,30 m ein Überholen ohne das Befahren des angrenzenden Fahrstreifens möglich macht. Für Situationen in denen der Radverkehr ggf. mehr Platz benötigt (bspw. Steigungen

oder parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand) kann eine Fahrstreifenbreite von 4,60 m angemessen sein. Bei geringeren Fahrstreifenbreiten ($\leq 4,00$ m) muss beim Überholen der angrenzende Fahrstreifen befahren werden. Bei größeren Fahrstreifenbreiten ($\geq 4,90$ m) kann der unerwünschte Effekt resultieren, dass Kfz nebeneinander fahren oder der Schwerverkehr durch PKW regelmäßig überholt wird. Wenn genug Fläche verfügbar ist, sollte immer die Anlage von Radfahrstreifen oder Radwegen überprüft werden. Sind die Fahrstreifen $< 4,30$ m sollte Beschilderung oder Markierung auf Radfahrende hinweisen (AASHTO 2012, S. 4-3).

Während die Beschilderung auf Radfahrende aufmerksam machen soll, kann die Markierung von Radpiktogrammen auf der Fahrbahn (sog. „Shared-Lane Marking“) zur Anwendung kommen, wenn ein erhöhtes Maß an Orientierung erforderlich ist (siehe Bild-A 8; AASHTO 2012, S. 4-3 ff.). Das ist vor allem auf Straßen der Fall, auf denen eine Radverkehrsanlage erforderlich, aber aufgrund der beengten Platzverhältnisse nicht umsetzbar ist (AASHTO 2012, S. 4-4). Zudem kann die Markierung auch verwendet werden, um den Anteil von Radfahrenden auf der „falschen“ Seite zu reduzieren. Folgende weitere Anwendungsfälle für die Markierung von Radpiktogrammen werden genannt (AASHTO 2012, S. 4-4):

- Auf Straßen mit parkenden Fahrzeugen am Fahrbahnrand, um Radfahrenden hinsichtlich eines ausreichenden Abstandes zu parkenden Fahrzeugen zu unterstützen (Vermeidung von Dooring-Unfällen).
- Als Lückenschluss zwischen zwei Abschnitten mit Radverkehrsanlage.
- Auf Straßen die zu schmal sind, das Rad- und Kfz-Verkehr nebeneinander in einem Fahrstreifen fahren können.
- Auf Abschnitten mit starker Steigung.

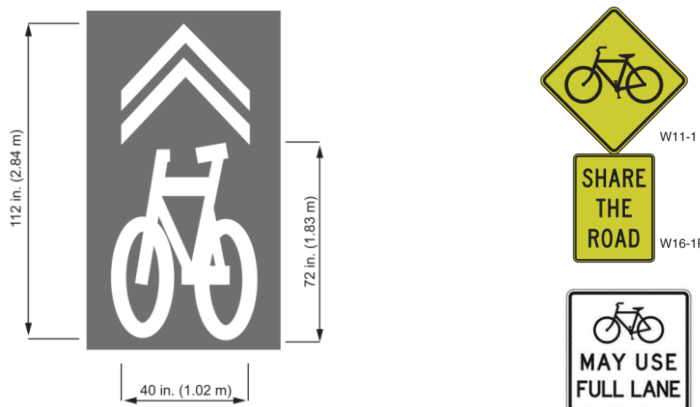


Bild-A 8 „Shared-Lane Marking“ (links) sowie auf Radverkehr hinweisende Beschilderung (rechts) nach AASHTO (2012, S. 4-3 ff.)

Zur Positionierung der Piktogramme werden zwei Fälle unterschieden (AASHTO 2012, S. 4-5):

- Ohne Längsparkstände am Fahrbahnrand: Markierung der Piktogramme mit mindestens 1,2 m Abstand vom Fahrbahnrand (siehe auch FHA 2010, S. 806 ff.), wobei eine mittigere Platzierung empfohlen wird, wenn der Fahrstreifen zu schmal für das Nebeneinanderfahren eines Fahrrads und eines Kraftfahrzeugs ist.
- Mit Längsparkständen am Fahrbahnrand: Markierung der Piktogramme mit 3,4 m Abstand vom Fahrbahnrand (entspricht einem Sicherheitsraum von ca. 1,0 m, wenn davon ausgegangen wird, dass die Breite für parkende Kfz ca. 2,00m entspricht und Radfahrende mittig auf den Piktogrammen fahren, siehe auch FHA 2010, S. 806 ff.)

Im „Urban bikeway design guide“ der National Association of City Transportation Officials (NACTO) wird lediglich auf die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr mit Radpiktogrammen auf der Fahrbahn eingegangen, wobei u.a. die o.g. Vorteile/Anwendungsfälle genannt werden (NACTO 2014, S. 134). Darüber hinaus wird die Anwendung von Mischverkehr mit Piktogrammen nur bis zu einer Verkehrsstärke von 3.000 Kfz/24 h und einer Geschwindigkeit von 35 mph empfohlen. Bei höheren Werten sollte eine Radverkehrsanlage angeordnet werden

(NACTO 2014, S. 136). Zum Vergleich: Nach AASHTO (2012) wird keine Einsatzgrenze hinsichtlich der Verkehrsstärke genannt.

Zur Platzierung der Piktogramme werden bei NACTO (2014, S. 137) die gleichen Empfehlungen wie bei AASHTO (2012, S. 4-5) gegeben, welche im Wesentlichen auf den Vorgaben nach FHA (2010, S. 806 ff.) basieren. Nach NACTO (2014, S. 137) wird zusätzlich für Straßen mit einer zulässigen Geschwindigkeit von ≤ 25 mph empfohlen, dass die Piktogramme mittig auf dem Fahrstreifen markiert werden sollten. Damit soll der Verschleiß der Markierung minimiert und Radfahrende ermutigt werden, den gesamten Fahrstreifen zu nutzen.

Anlage 2 Untersuchungsabschnitte im Überblick

Tab.-A 2 Untersuchungsabschnitte im Überblick

ID	Untersuchung	Stadt	Straße	von	bis	Radverkehrs- führungsform	Anzahl Fahr- streifen	nutzbare Fahrbahn- breite [m]	ruhender Verkehr	Strecken- länge [m]	DTV Rad [Rf/24 h]	DTV Kfz [Kfz/24 h]	DTV Fuß [Fuß/24 h]
1	Schüller et al. (2019)	Berlin	Berliner Allee	Langhansstr.	Pistoriusstr.	Mischverkehr	4	12,5	beidseitig	394	888	19.524	7.022
2	Schüller et al. (2019)	Berlin	Hosemannstr.	Grellstr.	Ostseestr.	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	468	859	5.860	1.185
3	Schüller et al. (2019)	Berlin	Ebertystr.	Landsberger Allee	Thearstr.	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	595	941	4.906	1.837
4	Schüller et al. (2019)	Berlin	Torstr.	Brunnenstr.	Chaussestr.	Mischverkehr	4	12,5	beidseitig	870	1.652	21.986	7.185
5	Schüller et al. (2019)	Berlin	Müllerstr.	Seestr.	Schulstr.	Mischverkehr	4	13	beidseitig	510	1.360	20.536	20.793
6	Schüller et al. (2019)	Berlin	Seeburger Str.	Klosterstr.	Päwesiner Weg	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	852	210	9.444	1.033
7	Schüller et al. (2019)	Berlin	Pichelsdorfer Str.	Adamstr.	Heerstr.	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	722	173	9.997	2.780
8	Schüller et al. (2019)	Berlin	Cauerstr.	Einsteinufer	Otto-Suhr-Allee	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	426	853	10.754	978
9	Schüller et al. (2019)	Berlin	Joachim-Friedrich-Str.	Westfälische Str.	Paulsborner Str.	Mischverkehr	2	7,7	beidseitig	260	362	5.993	739
10	Schüller et al. (2019)	Berlin	Hagenstr.	Koenigsallee	Teplitzer Str.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	1.120	436	8.737	220
11	Schüller et al. (2019)	Berlin	Rheinstr.	Wexstr.	Saarstr.	Mischverkehr	4	12	beidseitig	380	1.734	15.704	6.380
12	Schüller et al. (2019)	Berlin	Grunewaldstr. (Steglitz)	Schloßstr.	Lepsiusstr.	Mischverkehr	2	7,9	beidseitig	271	982	12.863	3.076
13	Schüller et al. (2019)	Berlin	Grunewaldstr. (Schöneberg)	Martin-Luther-Str.	Goltzstr.	Mischverkehr	4	12	beidseitig	425	1.132	12.752	2.359
14	Schüller et al. (2019)	Berlin	Wildenbruchstr.	Weigandufer	Sonnenallee	Mischverkehr	2	7,6	beidseitig	288	1.830	11.135	3.228
15	Schüller et al. (2019)	Berlin	Karl-Marx-Str.	Hermannstr.	Flughafenstr.	Mischverkehr	4	12	beidseitig	645	1.782	16.370	17.913
16	Schüller et al. (2019)	Berlin	Ordensmeisterstr.	Komturstr.	Tempelhofer Damm	Mischverkehr	2	7,7	beidseitig	1.025	383	8.803	1.511
17	Schüller et al. (2019)	Berlin	Gersdorfstr.	Attilastr.	Ringstr.	Mischverkehr	2	7,9	beidseitig	585	186	9.508	1.141
18	Schüller et al. (2019)	Berlin	Attilastr.	Steglitzer Damm	Maulbronner Ufer	Mischverkehr	4	12	beidseitig	428	183	15.054	424
19	Schüller et al. (2019)	Berlin	Lückstr.	Weitlingstr.	Nöldnerstr.	Mischverkehr	2	6,5	einseitig	311	920	15.821	1.793
20	Schüller et al. (2019)	Berlin	Gartenstr.	Torstr.	Bernauer Str.	Mischverkehr	2	6	beidseitig	382	1.430	3.383	2.446
21	Schüller et al. (2019)	Berlin	Damerowstr.	Breite Str.	Klaustaler Str.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	487	580	15.628	1.609
22	Schüller et al. (2019)	Berlin	Damerowstr.	Klaustaler Str.	Pasewalker Str.	Mischverkehr	2	8	beidseitig	600	580	15.628	1.609
23	Schüller et al. (2019)	Berlin	Eichhorster Weg	Finsterwalder Str.	Wilhelmsruher Damm	Mischverkehr	2	6,5	einseitig	483	137	9.079	1.087
24	Schüller et al. (2019)	Berlin	Kottbusser Damm	Maybachufer	Sonnenallee	Mischverkehr	4	12	beidseitig	762	3.502	18.020	10.620
25	Schüller et al. (2019)	Berlin	Sonnenallee	Wildenbruchstr.	Treptower Str.	Mischverkehr	4	12,5	beidseitig	562	951	20.359	3.495
26	Schüller et al. (2019)	Berlin	Lietzenburger Str.	Uhlandstr.	Schlüterstr.	Mischverkehr	4	12	beidseitig	434	740	19.678	3.054
27	Schüller et al. (2019)	Berlin	Kolonnenstr.	Hauptstr.	Wilhelm-Kabus-Str.	Mischverkehr	4	12	einseitig	709	1.804	12.981	1.913

ID	Untersuchung	Stadt	Straße	von	bis	Radverkehrs- führungsform	Anzahl Fahr- streifen	nutzbare Fahrbahn- breite [m]	ruhender Verkehr	Strecken- länge [m]	DTV Rad [Rf/24 h]	DTV Kfz [Kfz/24 h]	DTV Fuß [Fuß/24 h]
28	Schüller et al. (2019)	Berlin	Friedrichstr.	Reinhardtstr.	Unter den Linden	Mischverkehr	2	6,6	n. vorhanden	485	2.600	9.593	10.880
29	Schüller et al. (2019)	Bochum	Auf dem Dahlacker	Herner Str.	Dorstener Str.	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	1.216	95	9.743	587
30	Schüller et al. (2019)	Bochum	Poststr. I	Dorstener Str.	Wengewiese	Mischverkehr	2	7	einseitig	465	148	10.242	478
31	Schüller et al. (2019)	Bochum	Poststr. II	Wengewiese	Gemeindestr.	Mischverkehr	2	7	beidseitig	208	148	10.242	478
32	Schüller et al. (2019)	Bochum	Poststr. III	Gemeindestr.	Hofsteder Str.	Mischverkehr	2	7	n. vorhanden	290	148	10.242	478
33	Schüller et al. (2019)	Bochum	Vierhausstr.	Herner Str.	Bergstr.	Mischverkehr	2	7,2	beidseitig	795	125	7.720	98
34	Schüller et al. (2019)	Bochum	Josephinenstr.	Tenthoffstr.	Patmosstr.	Mischverkehr	2	7,4	beidseitig	1.065	115	6.556	413
35	Schüller et al. (2019)	Bochum	Werner Hellweg	Werner Str.	Bramheide	Mischverkehr	2	7,9	beidseitig	632	72	12.103	1.380
36	Schüller et al. (2019)	Bochum	Rottstr.	Westring	Annast.	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	264	81	6.110	815
37	Schüller et al. (2019)	Bochum	Hüller Str.	Parkstr.	Marienstr.	Mischverkehr	2	7	beidseitig	466	60	13.050	424
38	Schüller et al. (2019)	Bochum	Zollstr.	Op de Veih	Varenholzstr.	Mischverkehr	2	6	einseitig	172	70	4.137	239
39	Schüller et al. (2019)	Bochum	Hunscheidtstr.	Friederikastr.	Waldring	Mischverkehr	2	6,9	beidseitig	397	72	4.670	707
40	Schüller et al. (2019)	Bochum	Friederikastr.	Romanusplatz	Hunscheidtstr.	Mischverkehr	2	7,5	einseitig	335	119	1.353	380
41	Schüller et al. (2019)	Bochum	Oskar-Hoffmann-Str.	Steinring	Universitätsstr.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	233	226	9.937	1.000
42	Schüller et al. (2019)	Bochum	Stiftstr.	Gerichtsstr.	Hauptstr.	Mischverkehr	2	7,3	alternierend	721	150	5.772	1.859
43	Schüller et al. (2019)	Dresden	Gostritzer Str.	Zschertnitzer Str.	Teplitzer Str.	Mischverkehr	2	7	beidseitig	350	767	4.212	439
44	Schüller et al. (2019)	Dresden	Strehlener Str.	Fritz-Löffler-Str.	Franklinstr.	Mischverkehr	2	7	beidseitig	675	947	8.382	874
45	Schüller et al. (2019)	Dresden	Reichenbachstr.	Fritz-Löffler-Str.	Ackermannstr.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	1.075	676	4.591	1.656
46	Schüller et al. (2019)	Dresden	Chemnitzer Str.	Nöthnitzer Str.	Würzburger Str.	Mischverkehr	2	6,8	n. vorhanden	305	796	9.757	1.088
47	Schüller et al. (2019)	Dresden	Kretschmerstr.	Niederwaldstr.	Berggartenstr.	Mischverkehr	2	7	n. vorhanden	235	698	4.149	1.010
48	Schüller et al. (2019)	Dresden	Ermelstr.	Schandauer Str.	Augsburger Str.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	210	476	5.540	2.384
49	Schüller et al. (2019)	Dresden	Loschwitzer Brücke	Schillerplatz	Schillerstr.	Mischverkehr	3	10	n. vorhanden	445	2.198	23.315	3.320
50	Schüller et al. (2019)	Dresden	Charlottenstr.	Stauffenbergallee	Fischhausstr.	Mischverkehr	2	7,7	beidseitig	575	545	9.283	585
51	Schüller et al. (2019)	Dresden	Radeberger Str.	Stolpener Str.	Stauffenbergallee	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	615	898	6.538	449
52	Schüller et al. (2019)	Dresden	Bischofsweg	Königsbrücker Str.	Görlitzer Str.	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	290	2.307	7.638	4.153
53	Schüller et al. (2019)	Dresden	Industriestr. I	Kopernikusstr.	Aachener Str.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	342	715	8.388	1.262
54	Schüller et al. (2019)	Dresden	Industriestr. II	Aachender Str.	Boxdorfer Str.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	346	704	8.388	1.262
55	Schüller et al. (2019)	Dresden	Maxim-Gorki-Str.	Trachenberger Str.	Döbelner Str.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	175	672	10.381	2.017
56	Schüller et al. (2019)	Dresden	Stephensonstr.	Str. des 17. Juni	Pirnaer Landstr.	Mischverkehr	2	7	einseitig	695	226	4.975	439
57	Schüller et al. (2019)	Dresden	Boderitzer Str.	Gostritzer Weg	Gostritzer Str.	Mischverkehr	2	7	beidseitig	585	425	5.110	381

ID	Untersuchung	Stadt	Straße	von	bis	Radverkehrs- führungsform	Anzahl Fahr- streifen	nutzbare Fahrbahn- breite [m]	ruhender Verkehr	Strecken- länge [m]	DTV Rad [Rf/24 h]	DTV Kfz [Kfz/24 h]	DTV Fuß [Fuß/24 h]
58	Schüller et al. (2019)	Dresden	Hüblerstr.	Augsburger Str.	Prellerstr.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	330	848	5.275	626
59	Schüller et al. (2019)	Dresden	Nöthnitzer Str.	Chemnitzer Str.	Bernhardstr.	Mischverkehr	2	5	einseitig	283	614	6.678	752
60	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Münsterstr.	Münster Platz	Rather Str.	Mischverkehr	4	13	beidseitig	152	728	14.545	5.859
61	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Sommersstr.	Jülicher Str.	Münsterstr.	Mischverkehr	4	12	beidseitig	150	291	5.729	2.054
62	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Rather Broich	Selbecker Str.	Mörsenbroicher Weg	Mischverkehr	4	12	n. vorhanden	690	226	15.437	1.435
63	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Lenaustr.	Mörsenbroicher Weg	Graf-Recke-Str.	Mischverkehr	4	12	beidseitig	460	258	14.329	565
64	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Simrockstr.	Graf-Recke-Str.	Vautierstr.	Mischverkehr	4	12	beidseitig	244	183	12.265	435
65	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Lichtstr.	Hoffeldstr.	Cranachstr.	Mischverkehr	4	11	beidseitig	156	514	12.589	1.120
66	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Ickerswarde Str.	Otto-Hahn-Str.	Kölner Landstr.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	928	129	9.558	77
67	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Glashüttenstr.	Vennhauser Allee	Höherhofstr.	Mischverkehr	2	7	n. vorhanden	469	252	18.332	1.326
68	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Jacobistr.	Luise Dumont Str.	Jägerhofstr.	Mischverkehr	4	12	einseitig	198	615	14.599	2.120
69	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Karlsruher Str.	Sturmstr.	Haustertshofweg	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	415	274	14.183	615
70	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Schönaustr.	Heyestr.	Dreherstr.	Mischverkehr	2	6	beidseitig	264	174	3.553	750
71	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Merowinger Str.	Karolingerstr.	Kopernikusstr.	Mischverkehr	4	12	beidseitig	296	444	23.290	1.391
72	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Roßstr.	Klever Str.	Danziger Str.	Mischverkehr	4	13	beidseitig	1.173	499	17.117	3.054
73	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Deuil-La-Barre-Str.	Homburger Landstr.	Niedereschbacher Str.	Mischverkehr	2	6	n. vorhanden	710	170	5.548	593
74	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Kalbacher Hauptstr.	Bachstr.	Zum Schinkenborn	Mischverkehr	2	6,3	n. vorhanden	415	92	2.602	496
75	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Kalbacher Hauptstr.	Zum Schinkenborn	An der Grünhohl	Mischverkehr	2	6,3	beidseitig	186	92	2.602	496
76	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Rödelheimer Landstr.	Kleemannstr.	Rebstocker Weg	Mischverkehr	2	6	einseitig	236	1.114	7.239	728
77	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Westerbachstr.	Siegener Str.	Otto-Brenner-Str.	Mischverkehr	2	6,5	n. vorhanden	380	249	10.008	935
78	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Rödelheimer Str.	Schloßstr.	Grempsstr.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	178	603	7.723	2.109
79	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Ginnheimer Str.	Grempsstr.	Sophienstr.	Mischverkehr	2	6,5	einseitig	292	614	7.723	2.109
80	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Hessestr.	Dillenburg Allee	Lurgiallee	Mischverkehr	2	6,5	n. vorhanden	821	315	7.319	220
81	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Oeder Weg	Jahnstr.	Glauburgstr.	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	554	2.510	5.550	5.989
82	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Eschersheimer Landstr.	Am Grünhof	Hügelstr.	Mischverkehr	4	13,4	beidseitig	962	1.158	16.232	2.330
83	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Friedberger Landstr.	Wielandstr.	Koselstr.	Mischverkehr	4	12,4	beidseitig	156	942	22.183	1.791
84	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Friedberger Landstr.	Koselstr.	Mauerweg	Mischverkehr	4	12,4	beidseitig	363	985	22.183	1.791
85	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Konrad Adenauer Str.	Friedberger Tor	Battonnstr.	Mischverkehr	4	12	beidseitig	455	1.162	22.230	3.022
86	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Walter Kolb Str.	Elisabethenstr.	Gartenstr.	Mischverkehr	4	12	beidseitig	516	579	15.216	2.250
87	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Lachweg	Bonameserstr.	Berkersheimer Weg	Mischverkehr	2	5,8	n. vorhanden	232	115	1.818	121

ID	Untersuchung	Stadt	Straße	von	bis	Radverkehrs- führungsform	Anzahl Fahr- streifen	nutzbare Fahrbahn- breite [m]	ruhender Verkehr	Strecken- länge [m]	DTV Rad [Rf/24 h]	DTV Kfz [Kfz/24 h]	DTV Fuß [Fuß/24 h]
88	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Homburger Landstr.	Gießener Str.	Friedberger Landstr.	Mischverkehr	2	6,2	n. vorhanden	372	387	6.591	684
89	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Harheimer Weg	Im Niederfeld	Am Wendelsgarten	Mischverkehr	2	7	einseitig	547	155	6.397	132
90	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Heerstr.	Ludwig Landmann Str.	Fritz Schumacher Weg	Mischverkehr	2	6	beidseitig	454	344	10.536	652
91	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Vibeler Landstr.	Marktstr.	Am Reborn	Mischverkehr	2	7	einseitig	400	207	12.400	531
92	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Lurgiallee	Olof Palme Str.	Marie-Curie-Str.	Mischverkehr	2	6,5	n. vorhanden	463	146	4.488	901
93	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Schöne Aussicht	Lange Str.	Kurt-Schumacher-Str.	Mischverkehr	3	9	n. vorhanden	207	510	16.002	554
94	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Kurmainzer Str.	Michaelstr.	Am Kapellenberg	Mischverkehr	2	6	n. vorhanden	450	300	10.695	217
95	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Kurmainzer Str.	Am Kapellenberg	Sossenheimer Weg	Mischverkehr	2	6	einseitig	267	304	10.695	217
96	Schüller et al. (2019)	Gelsenkirchen	Ringstr.	Luitpoldstr.	Kirchstr.	Mischverkehr	4	14	einseitig	227	74	22.034	1.174
97	Schüller et al. (2019)	Gelsenkirchen	Kurt-Schumacher Str.	Magdeburgerstr.	Grenzstr.	Mischverkehr	4	13	einseitig	188	100	28.293	609
98	Schüller et al. (2019)	Gelsenkirchen	Overwegstr.	Vattmannstr.	Wittekindstr.	Mischverkehr	4	12	n. vorhanden	233	175	21.480	791
99	Schüller et al. (2019)	Gelsenkirchen	Rotthausener Str.	Hiberniastr.	Wiehagen	Mischverkehr	2	7	beidseitig	544	212	7.681	750
100	Schüller et al. (2019)	Gelsenkirchen	Grenzstr.	Bismarckstr.	Kurt-Schumacher-Str.	Mischverkehr	2	5	beidseitig	522	148	5.373	2.098
101	Schüller et al. (2019)	Gelsenkirchen	Bismarckstr.	Bickernstr.	Marschallstr.	Mischverkehr	2	6,3	beidseitig	424	108	14.042	543
102	Schüller et al. (2019)	Gelsenkirchen	Ahornstr.	Middelicher Str.	Gartenstr.	Mischverkehr	2	6	beidseitig	279	91	4.865	478
103	Schüller et al. (2019)	Gelsenkirchen	Gartenstr.	Ewaldstr.	Ahornstr.	Mischverkehr	2	5,5	beidseitig	210	72	2.895	272
104	Schüller et al. (2019)	Gelsenkirchen	Frankampstr.	An der Gräfte	Oststr.	Mischverkehr	2	6	beidseitig	900	41	5.922	293
105	Schüller et al. (2019)	Gelsenkirchen	Darler Heide	Heistr.	Surkampstr.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	696	148	5.951	413
106	Schüller et al. (2019)	Gelsenkirchen	Wilhelmstr.	Darler Heide	Auguststr.	Mischverkehr	2	6	beidseitig	595	78	3.412	207
107	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Große Brunnenstr.	Burgstr.	Richard-Wagner-Str.	Mischverkehr	2	6,8	n. vorhanden	475	483	12.077	531
108	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Seebener Str.	Burgstr.	Trothaer Str.	Mischverkehr	2	6	beidseitig	905	591	10.522	588
109	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Burgstr.	Große Brunnenstr.	Mühlweg	Mischverkehr	2	7,3	beidseitig	830	318	6.281	629
110	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Wörmlitzer Str.	Ludwigstr.	Rannischer Platz	Mischverkehr	2	7	einseitig	365	249	6.924	993
111	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Pestalozzistr.	Bollberger Weg	Paul-Suhr-Str.	Mischverkehr	2	7,25	einseitig	645	147	5.128	449
112	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Diesterwegstr.	Böllberger Weg	Paul-Suhr-Str.	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	905	326	10.231	1.446
113	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Turmstr.	Liebenauer Str.	Karl-Meseberg-Str.	Mischverkehr	2	7	einseitig	175	425	6.311	1.133
114	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Fritz-Hoffmann-Str.	Grenzstr.	Reideburger Landstr.	Mischverkehr	2	6	n. vorhanden	380	168	9.559	252
115	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Käthe-Kollwitz-Str.	Delitzscher Str.	Auenblick	Mischverkehr	2	6	beidseitig	805	80	3.689	211
116	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Freimfelder Str.	Betriebshof	Delitzscher Str.	Mischverkehr	2	6,5	n. vorhanden	570	197	9.956	867
117	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Willy-Brandt-Str.	Rannischer Platz	Prof.-F.-Hoffmann-Str.	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	385	292	13.482	697

ID	Untersuchung	Stadt	Straße	von	bis	Radverkehrs- führungsform	Anzahl Fahr- streifen	nutzbare Fahrbahn- breite [m]	ruhender Verkehr	Strecken- länge [m]	DTV Rad [Rf/24 h]	DTV Kfz [Kfz/24 h]	DTV Fuß [Fuß/24 h]
118	Schüller et al. (2019)	Halle (Saale)	Robert-Franz-Ring	Moritzburgring	Ankerstr.	Mischverkehr	2	7	einseitig	285	810	16.885	1.265
119	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Karl-Tauchnitz-Str.	Herzliyaaplatz	Friedrich-Ebert-Str.	Mischverkehr	2	7,7	beidseitig	410	744	8.648	398
120	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Jahnallee	Waldstr.	Leibnitzstr.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	265	1.978	18.220	4.279
121	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Georg-Schwarz-Str.	Hans-Driesch-Str.	Prießnitzstr.	Mischverkehr	2	6,75	einseitig	590	305	3.517	1.660
122	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Erich-Zeigner-Allee	Industriestr.	Karl-Heine-Str.	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	475	1.062	8.750	1.378
123	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Zschochersche Str.	Antonienstr.	Karl-Heine-Str.	Mischverkehr	2	7,7	beidseitig	1.315	1.044	12.483	1.534
124	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Naumburger Str.	Röckener Str.	Gießelstr.	Mischverkehr	2	6	beidseitig	185	239	6.884	779
125	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Gießelstr.	Rolf-Axen-Str.	Antonienstr.	Mischverkehr	2	6	einseitig	325	335	4.178	622
126	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Dieskaustr.	Rolf-Axen-Str.	Antonienstr.	Mischverkehr	2	6,75	beidseitig	435	227	6.102	735
127	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Altranstädter Str.	Windorfer Str.	Antonienstr.	Mischverkehr	2	7	beidseitig	240	409	12.057	316
128	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Arthur-Hoffmann-Str.	Arno-Nitzsche-Str.	Richard-Lehmann-Str.	Mischverkehr	2	7,25	beidseitig	385	666	3.690	690
129	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Bernhard-Göring-Str.	Arno-Nitzsche-Str.	Richard-Lehmann-Str.	Mischverkehr	2	7,25	beidseitig	365	956	3.388	990
130	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Bornaische Str.	Wiedebachplatz	Ecksteinstr.	Mischverkehr	2	7,9	beidseitig	445	1.573	7.218	2.381
131	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Papiermühlstr.	Schönbachstr.	Arnoldstr.	Mischverkehr	2	7	beidseitig	335	395	5.817	1.071
132	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Kohlgartenstr.	Ranftsche Gasse	Lilienstr.	Mischverkehr	2	7,9	beidseitig	475	559	4.499	2.876
133	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Berggartenstr.	Menckestr.	Gohliser Str.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	285	332	4.147	483
134	Schüller et al. (2019)	Leipzig	Lützowstr.	Berggartenstr.	Georg-Schumann-Str.	Mischverkehr	2	5,8	n. vorhanden	240	885	11.751	1.371
135	Schüller et al. (2019)	Berlin	Oranienstr.	Oranienplatz	Prinzessinnenstr.	Mischverkehr	2	7,1	beidseitig	250	3.362	8.759	6.388
136	Schüller et al. (2019)	Berlin	Reinhardtstr. I	Friedrichstr.	Albrechtstr.	Mischverkehr	2	7,7	beidseitig	195	2.376	9.146	4.901
137	Schüller et al. (2019)	Berlin	Chauseestr.	Torstr.	Invalidenstr.	Mischverkehr	2	7,85	beidseitig	340	2.051	10.006	4.837
138	Schüller et al. (2019)	Berlin	Ernst-Barlach-Str.	Egon-Erwin-Kisch-Str.	Rostocker Str.	Mischverkehr	2	6,7	n. vorhanden	515	99	6.134	204
139	Schüller et al. (2019)	Berlin	Laubacher Str.	Landauer Str.	Offenbacher Str.	Mischverkehr	2	6	beidseitig	440	970	5.559	1.116
140	Schüller et al. (2019)	Berlin	Reinhardtstr. II	Albrechtstr.	Luisenstr.	Mischverkehr	2	6,5	beidseitig	220	1.666	8.553	4.085
141	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Schweizer Str.	Schweizer Platz	Kaubachstr.	Mischverkehr	2	7,75	beidseitig	246	589	7.495	6.585
142	Schüller et al. (2019)	Frankfurt a. M.	Sindlinger Bahnstr.	Pfingstbornstr.	Lehmkauststr.	Mischverkehr	2	6,15	einseitig	265	244	5.902	619
143	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Vollmerswerther Str.	Dianastr.	Martinstr.	Mischverkehr	2	7	beidseitig	292	273	6.685	2.075
144	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Harffstr.	EDEKA-Center Celik	Ohligser Str.	Mischverkehr	2	6,75	beidseitig	287	428	9.403	755
145	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Heyestr.	Hatzfeldstr.	Pilgerweg	Mischverkehr	2	6,3	einseitig	267	233	4.653	3.156
146	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Kölner Str.	Ellerstr.	Kruppstr.	Mischverkehr	2	6	beidseitig	286	350	12.594	9.942
147	Schüller et al. (2019)	Düsseldorf	Rosmarinstr.	Gaußstr.	Junkerstr.	Mischverkehr	2	6,75	beidseitig	214	202	13.115	752

ID	Untersuchung	Stadt	Straße	von	bis	Radverkehrs- führungsform	Anzahl Fahr- streifen	nutzbare Fahrbahn- breite [m]	ruhender Verkehr	Strecken- länge [m]	DTV Rad [Rf/24 h]	DTV Kfz [Kfz/24 h]	DTV Fuß [Fuß/24 h]
148	Ohm et al. (2015)	Berlin	Oranienstr.	Mariannenstr.	Manteuffelstr.	Mischverkehr	2	8	beidseitig	196	3.550	6.637	2.881
149	Ohm et al. (2015)	Berlin	Helmholtzstr.	Morsestr.	Gotzkowskybrücke	Mischverkehr	2	8,25	beidseitig	393	1.301	12.755	1.624
150	Ohm et al. (2015)	Berlin	Drakestr.	Ringstr.	Weddingenweg	Mischverkehr	2	8	beidseitig	700	836	15.734	660
151	Ohm et al. (2015)	Berlin	Lichtenberger Str.	Holzmarktstr.	Karl-Marx-Allee	SSF zweiseitig	4	10,8	beidseitig	503	1.442	23.799	1.011
152	Ohm et al. (2015)	Bielefeld	Wertherstr.	Victor-Gollancz-Str.	Lampingstr.	Mischverkehr	2	6,7	beidseitig	214	276	9.252	119
153	Ohm et al. (2015)	Bielefeld	Potsdamer Str.	Friedrich-Hagemann-Str.	Heeperholz	SSF zweiseitig	2	4,9	n. vorhanden	495	345	13.068	322
154	Ohm et al. (2015)	Bielefeld	Vogteistr.	Dr.-Heidsiek-Str.	Schelpmiser Weg	SSF einseitig	2	5,5	n. vorhanden	383	552	9.486	101
155	Ohm et al. (2015)	Bielefeld	Detmolder Str.	Niederwall	Mittelstr.	Mischverkehr	4	12	n. vorhanden	217	306	25.932	659
156	Ohm et al. (2015)	Dortmund	Semerteichstr.	Westfalendamm	Rathenaustr.	SSF zweiseitig	2	5,2	beidseitig	404	51	9.399	261
157	Ohm et al. (2015)	Dortmund	Jägerstr.	Gronaustr.	Bornstr.	SSF zweiseitig	4	10,6	beidseitig	150	110	16.034	892
158	Ohm et al. (2015)	Dresden	Pillnitzer Landstr.	Wachwitzer Bergstr.	Oberwachwitzer Weg	Mischverkehr	2	6,24	n. vorhanden	514	403	10.145	4
159	Ohm et al. (2015)	Dresden	Schlüterstr.	Kipsdorfer Str.	Heynahtsstr.	Mischverkehr	2	6,2	beidseitig	652	200	8.417	639
160	Ohm et al. (2015)	Dresden	Karl-Marx-Str.	Boltenhagener Str.	Kieler Str.	SSF zweiseitig	2	6	beidseitig	865	176	11.068	395
161	Ohm et al. (2015)	Dresden	Chemnitzer Str.	Bamberger Str.	Nürnberg Str.	SSF zweiseitig	2	4,7	n. vorhanden	395	846	15.406	1.181
162	Ohm et al. (2015)	Dresden	Pfotenhauer Str.	Arnoldstr.	Neubertstr.	Mischverkehr	2	7,5	beidseitig	400	856	6.784	2.500
163	Ohm et al. (2015)	Dresden	Lommatzcher Str.	Franz-Lehmann-Str.	Trachauer Str.	Mischverkehr	2	7,5	n. vorhanden	278	305	15.384	866
164	Ohm et al. (2015)	Dresden	Breitscheidstr.	Wilhelm-Liebkecht-Str.	Reisstr.	Mischverkehr	2	8,2	n. vorhanden	966	296	16.811	944
165	Ohm et al. (2015)	Dresden	Rayskistr.	Grunaer Weg	Reicker Str.	Mischverkehr	2	7,5	n. vorhanden	225	712	16.194	248
166	Ohm et al. (2015)	Dresden	Glacisstr.	Bautzner Str.	Wigardstr.	SSF einseitig	2	5,4	beidseitig	468	1.358	6.320	1.624
167	Ohm et al. (2015)	Dresden	Parkstr.	Lindengasse	Blütherstr.	Mischverkehr	3	10	n. vorhanden	218	248	12.188	76
168	Ohm et al. (2015)	Radebeul	Meißner Str.	Pestalozzistr.	Gohliser Str.	SSF einseitig	2	9,5	n. vorhanden	218	772	18.488	217
169	Ohm et al. (2015)	Karlsruhe	Kanalweg	Ohiostr.	Erzbergerstr.	SSF zweiseitig	2	5	beidseitig	497	245	3.944	277
170	Ohm et al. (2015)	Karlsruhe	Kaiserallee	Rheinstr.	Händlestr.	SSF zweiseitig	2	9,5	beidseitig	555	627	17.982	1.072
171	Ohm et al. (2015)	Offenburg	Zähringerstr.	Philosophenweg	Knieblstr.	SSF zweiseitig	2	4,45	n. vorhanden	282	517	3.940	583
172	Ohm et al. (2015)	Offenburg	Griesheimer Str.	Hesselhurster Str.	Flößerweg	Mischverkehr	2	7,5	n. vorhanden	446	125	10.468	103
173	Ohm et al. (2015)	Offenburg	Wasserstr.	Amalie-Tonoli-Str.	Am Unteren Mühlbach	SSF einseitig	2	4,5	n. vorhanden	151	462	6.049	565
174	Ohm et al. (2015)	Rottenburg	Sprollstr.	Sophienstr.	Gartenstr.	SSF zweiseitig	2	29,7	n. vorhanden	311	330	11.942	670
175	Ohm et al. (2015)	Rottenburg	Gartenstr.	Sprollstr.	Rutenweg	SSF einseitig	2	4,75	einseitig	1.166	216	4.872	599
176	Koppers et al. (2021)	Bietigheim- Bissingen	Bietigheimerstr.	Im Bodenrain	Flattichstraße	Piktogramme	2	6	n. vorhanden	338	109	4.740	201
177	Koppers et al. (2021)	Bremerhaven	Bürgermeister-Smid-Str.	Lloyd Str.	Bgm.-M.-Donandt-Platz	Piktogramme	2	7	beidseitig	410	396	7.356	2.139

ID	Untersuchung	Stadt	Straße	von	bis	Radverkehrs- führungsform	Anzahl Fahr- streifen	nutzbare Fahrbahn- breite [m]	ruhender Verkehr	Strecken- länge [m]	DTV Rad [Rf/24 h]	DTV Kfz [Kfz/24 h]	DTV Fuß [Fuß/24 h]
178	Koppers et al. (2021)	Bremerhaven	Bürgermeister-Smid-Str.	Bgm.-M.-Donandt-Platz	Am Gitter	Piktogramme	2	7	beidseitig	352	396	5.565	2.139
179	Koppers et al. (2021)	Bremerhaven	Bürgermeister-Smid-Str.	Am Gitter	Rickmerstr.	Piktogramme	2	7	beidseitig	633	396	5.565	2.139
180	Koppers et al. (2021)	Frankfurt a. M.	Starkenburgerstr.	Schießhüttenstr.	Dieburger Str.	Piktogr./SSF	2	7,2	beidseitig	555	152	7.000	1.000
181	Koppers et al. (2021)	Ratingen	Poststr.	Bechemer Str.	Röntgenring	Piktogramme	2	7	beidseitig	183	219	3.582	1.980
182	Koppers et al. (2021)	Ratingen	Rosenstr.	Brückstr.	Hubertusstr.	Piktogr./SSF	2	6,5	alternierend	320	297	3.610	412
183	Koppers et al. (2021)	Ratingen	Rosenstr.	Hubertusstr.	In der Brück	Piktogr./SSF	2	6,5	einseitig	201	298	3.610	412
184	Richter (2019)	Berlin	Greifswalder Str.	Danziger Str.	Mollstr.	SSF zweiseitig	4	11,6	beidseitig	920	6.494	22.015	-
185	Richter (2019)	Berlin	Wichertstr.	Stahlheimer Str.	Schönhauser Allee	SSF zweiseitig	2	6,5	beidseitig	385	3.277	12.501	-
186	Richter (2019)	Berlin	Wilhelmstr.	Leipzigerstr.	Französische Str.	SSF zweiseitig	2	6,8	beidseitig	365	1.847	6.994	-
187	Richter (2019)	Berlin	Wisbyer Str.	Prenzlauer Allee	Stahlheimer Str.	SSF zweiseitig	4	12	beidseitig	536	3.357	22.717	-
188	Richter (2019)	Berlin	Danziger Str.	Prenzlauer Allee	Lychener Str.	SSF zweiseitig	4	13	beidseitig	631	2.327	16.103	-
189	Richter (2019)	Berlin	Katzbachstr.	Dudenstr.	Kreuzbergstr.	SSF zweiseitig	2	6,5	beidseitig	430	1.078	19.030	-
190	Richter (2019)	Berlin	Perleberger Str.	Stromstr.	Rathenowerstr.	SSF zweiseitig	2	7,2	beidseitig	530	1.700	9.688	-
191	Richter (2019)	Berlin	Westfälische Str.	Kurfürstendamm	Nestorstr.	SSF zweiseitig	2	8	beidseitig	561	412	11.097	-
192	Richter (2019)	Berlin	Schlüterstr.	Kurfürstendamm	Goethestr.	SSF zweiseitig	2	6,6	beidseitig	245	726	6.348	-
193	Richter (2019)	Berlin	Heinrich-Heine-Str.	Köpenicker Str.	Annenstr.	SSF zweiseitig	2	7,3	beidseitig	250	3.397	11.143	-
194	Richter (2019)	Berlin	Franklinstr. I	Gotzkowskybrücke	Audi Zentrum Berlin	SSF zweiseitig	2	7,3	beidseitig	241	1.801	10.828	-
195	Richter (2019)	Berlin	Franklinstr. II	Audi Zentrum Berlin	Salzufer	SSF zweiseitig	2	7,3	beidseitig	255	1.784	10.828	-
196	Richter (2019)	Giessen	Marburger Str.	Steinstr.	Wiesecker Weg	SSF zweiseitig	4	12	beidseitig	510	626	23.232	-
197	Richter (2019)	Giessen	Sudetenlandstr.	Marburger Str.	Rodtbergstr.	SSF zweiseitig	2	6	beidseitig	465	573	6.766	-
198	Richter (2019)	Lübbecke	Osnabrücker Str.	Ferdinand-Sauerbruch-Str.	Weingartenstr.	SSF zweiseitig	2	5,6	n. vorhanden	425	298	10.065	-
199	Richter (2019)	Lübbecke	Niedertorstr.	Niederwall	Bohnenstr.	SSF zweiseitig	2	5,3	n. vorhanden	310	152	4.692	-
200	Richter (2019)	Potsdam	Amundsenstr.	Kaiser-Friedrich-Str.	Potsdamer Str.	SSF zweiseitig	2	4,8	n. vorhanden	1.295	367	8.367	-
201	Richter (2019)	Potsdam	Karl-Liebknecht-Str.	Reiherbergstr.	Am Mühlenberg	SSF zweiseitig	2	4,6	n. vorhanden	605	646	5.027	-
202	Richter (2019)	Potsdam	Großbeerenstr.	Walter-Klausch-Str.	Firtz-Zubeil-Str.	SSF zweiseitig	2	7,2	beidseitig	296	1.243	14.028	-
203	Richter (2019)	Potsdam	Großbeerenstr.	Firtz-Zubeil-Str.	Grünstr.	SSF zweiseitig	2	7,2	einseitig	652	1.220	14.028	-
204	Richter (2019)	Potsdam	Großbeerenstr.	Grünstr.	Marlene-Dietrich-Allee	SSF zweiseitig	2	7,2	einseitig	219	1.243	14.028	-
205	Richter (2019)	Potsdam	Yorckstr.	Friedrich-Ebert-Str.	Dortustr.	SSF zweiseitig	2	6,6	beidseitig	295	561	11.368	-
206	Richter (2019)	Potsdam	Am Neuen Palais	Geschwister-Scholl-Str.	Kaiser-Friedrich-Str.	SSF zweiseitig	2	5	einseitig	1.560	736	8.962	-
207	Richter (2019)	Zwickau	Scheffelstr.	Auerbacher Str.	Sternenstr.	SSF zweiseitig	2	6	n. vorhanden	808	59	13.817	-

Anlage 3 Nacherhobene Infrastrukturmerkmale im Überblick

Tab.-A 3 Nacherhobene Infrastrukturmerkmale im Überblick

Merkmal	Codierung	Einheit	Nacherhebung Infrastrukturdaten (x = vollständig nacherhoben; o = teilweise nacherhoben/überprüft)			
			Schüller et al. (2020b) (147 Abschn.)	Ohm et al. (2015) (28 Abschn.)	Richter (2019) (24 Abschn.)	Koppers et al. (2021) (8 Abschn.)
nutzbare Fahrbahnbreite	B _{FB}	m				
Anzahl Fahrstreifen	N _{FS}	-				
Radverkehrsführungsform	R _{VF}	-				
Breite Schutzstreifen	B _{SSF}	m				
Breite Sicherheitsraum	B _{RVFSich}	m				
Ruhender Verkehr	r _V	-		x	x	x
Art der Anordnung des ruhenden Verkehrs	r _V -Art	-	x	x		o
Lage des ruhenden Verkehrs	Lage _{rV}	-		x	x	x
Länge ruhender Verkehr	L _{rV}	m	x	x	x	x
Breite Gehweg	B _{GW}	m		x	x	x
zulässige Geschwindigkeit	v _{zul}	km/h			o	
mögliche Gründe für Anordnung v _{zul} nach § 45. Abs. 9, Punkt 6	§ 45. Abs. 9	-	x	x	x	x
Verkehrszeichen Gehweg	VZ _{GW}	-		x	x	x
Mitteltrennung	MT	-				
Gleise im Mischverkehr	Gleise	-		x		x
Anzahl Bushaltestellen	N _{BusHST}	-		x	o	x
Anzahl Straßenbahnhaltestellen	N _{StrabHST}	-		x	o	x
Anzahl Anschlussknotenpunkte Lichtsignalanlage	N _{AKP,LSA}	-		x	o	x
Anzahl Anschlussknotenpunkte Vorfahrtzeichen	N _{AKP,VZ}	-		x	o	x
Anzahl Knotenpunktarme	N _{KPA}	-		x	o	x
Anzahl Querungsanlagen	N _{FBT}	-		x	x	x
Anzahl Grundstückszufahrten Wohnen	N _{Zf,W}	-		x	x	x
Anzahl Grundstückszufahrten Geschäftlich	N _{Zf,G}	-		x	x	x
Länge Streckenabschnitt	L _{ges}	m	o	o	o	o
Länge Wohnbebauung	L _W	m			x	x
Länge Wohnbebauung mit Geschäftsbesatz	L _{WG}	m			x	x
Länge Geschäftsbesatz	L _G	m			x	x
Länge sonstige gewerbliche Nutzung	L _{SO}	m			x	x
Länge bewirtschaftete Grünflächen (Parks, Spielplätze, Friedhöfe)	L _{GR}	m	x	x	x	x
Umfeldfaktor	UF	-	o	o	x	x

Anlage 4 Weiterentwicklung des Umfeldfaktors

Da selten flächendeckend Informationen zu Fußverkehrsstärken vorliegen bzw. nur mit hohem Aufwand zu erheben sind, können diese näherungsweise mit dem Umfeldfaktor nach Schüller (2010, S. 80) beschrieben werden. Dabei wird die Bebauung hinsichtlich einer erwartbaren Umfeldnutzung unterschiedlich gewichtet und die Bebauungslängen ins Verhältnis zur Gesamtlänge des Untersuchungsabschnittes gesetzt. Ein Beispiel: Einem Wohngebiet wird eine intensivere Randnutzung unterstellt als einem Gewerbegebiet. U.a. Aurich (2012, S. 168) empfiehlt die Anwendung des Umfeldfaktors im Rahmen der modellhaften Beschreibung des Unfallgeschehens sofern keine Informationen zu Strukturgrößen im Umfeld (bspw. Einwohnenden- oder Arbeitsplatzdichte) vorliegen. Im Rahmen dieser Arbeit liegen zwar für alle Untersuchungsabschnitte Informationen zur Verkehrsstärke des Radverkehrs und für einen Großteil Informationen zur Verkehrsstärke des Fußverkehrs vor (vgl. Kapitel 5.2.1), dennoch sollen im Ergebnis auch Unfallmodelle erstellt werden, die eine Anwendung auch bei fehlenden Fußverkehrsstärken ermöglicht. Zudem wird vermutet, dass durch den Umfeldfaktor nicht nur die Verkehrsstärke im Längsverkehr, welche in Form von Erhebungen häufig zugrunde liegt, beschrieben wird, sondern auch ein gewissen Aufenthalts- und Querverkehrspotential beschreibt.

Bei der Ermittlung des Umfeldfaktors nach Schüller (2010, S. 80) wird grundsätzlich nach

- reiner Wohnbebauung (W),
- Wohnbebauung mit Geschäftsbesatz (WG),
- Bebauung mit ausschließlich Geschäftsbesatz (G) sowie
- Bebauung mit sonstiger gewerblicher Nutzung (SO)

unterschieden. Im Rahmen dieser Arbeit wird zusätzlich das Attribut bewirtschaftete Grünflächen (GR) eingeführt, da mit bspw. Spielplätzen, Parks oder Friedhöfen auch eine gewisse Umfeldnutzung assoziiert wird. Die Definition zur Einteilung nach der Art der Bebauung ist in Tab.-A 4 zu finden.

Tab.-A 4 Differenzierung und Definition der Art der Bebauung in Anlehnung an Schüller (2010, S. 80)

W	reine Wohnbebauung	WG	Wohnbebauung mit Geschäftsbesatz	G	ausschließlich Geschäftsbesatz	GR	bewirtschaftete Grünflächen	SO	sonstige gewerblich Nutzung
	Einfamilienhäuser Mehrfamilienhäuser Hotels Krankenhäuser		Wohnbebauung und Einzelhandel, Einkaufszentren oder Gastronomie (in den unteren Geschossen)		Supermärkte Einkaufszentren Gastronomie sonstiger Einzelhandel Bibliotheken Kinos Schulen		Spielplätze Parkanlagen Friedhöfe		Arbeitsstätten Tankstellen Autohäuser Industrie Lagerhallen

Der Umfeldfaktor wird in Anlehnung an Schüller (2010, S. 80) wie folgt ermittelt:

$$UF = \frac{2 \cdot LB_W + 3 \cdot LB_{WG} + 2 \cdot LB_G + 1,5 \cdot LB_{GR} + LB_{SO}}{L_{ges}} \quad \text{Formel-A 1}$$

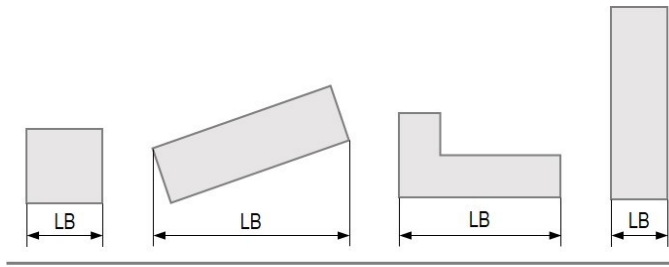
mit

UF Umfeldnutzung

LB Länge Bebauung (Ermittlung nach Bild-A 9) differenziert nach reiner Wohnbebauung (W), Wohnbebauung mit Geschäftsbesatz (WG), Bebauung mit ausschließlich Geschäftsbesatz (G), bewirtschaftete Grünflächen (GR), Bebauung mit sonstiger gewerblicher Nutzung (SO)

L_{ges} Gesamtlänge des Untersuchungsabschnittes

Das neue Attribut bewirtschaftete Grünflächen (GR) wird mit Faktor 1,5 berücksichtigt, da damit mehr Umfeldnutzung im Vergleich zur sonstigen gewerblichen Nutzung (SO) und weniger Umfeldnutzung im Vergleich zur reinen Wohnbebauung (W) assoziiert wird.



Untersuchungsabschnitt

Bild-A 9 Definition der Bebauungslänge nach Schüller (2010, S. 80)

Anlage 5 Alltäglicher Freizeitradverkehr und Modal-Split des Radverkehrs der Untersuchungsstädte

Tab.-A 5 Anteile alltäglichen Freizeitradverkehrs sowie Modal-Split des Radverkehrs für die Untersuchungsstädte nach Gerike et al. (2020)

Stadt	Zuordnung nach Zentralität, Stadtgröße, Topografie	Gruppierung nach Zentralität, Stadtgröße, Topografie	Anteil _{Freizeit} nach (Binnenverkehr)	Modal-Split Radverkehr (Binnenverkehr)
Berlin	eigene Zuordnung	Oberzentren 500.000 und mehr EW (ohne Berlin), Topografie: flach	20,1%	18,4 %
Dresden	Gerike et al. (2020)	Oberzentren 500.000 und mehr EW (ohne Berlin), Topografie: flach	20,1%	19,7 %
Düsseldorf	Gerike et al. (2020)	Oberzentren 500.000 und mehr EW (ohne Berlin), Topografie: flach	20,1%	18,7 %
Frankfurt	Gerike et al. (2020)	Oberzentren 500.000 und mehr EW (ohne Berlin), Topografie: flach	20,1%	22,7 %
Leipzig	Gerike et al. (2020)	Oberzentren 500.000 und mehr EW (ohne Berlin), Topografie: flach	20,1%	20,6 %
Dortmund	eigene Zuordnung	Oberzentren 500.000 und mehr EW (ohne Berlin), Topografie: flach	20,1%	-
Bochum	Gerike et al. (2020)	Oberzentren bis unter 500.000 EW, Topografie: hügelig	13,5%	7,9 %
Bielefeld	eigene Zuordnung	Oberzentren bis unter 500.000 EW, Topografie: hügelig	13,5%	-
Offenburg	Gerike et al. (2020)	Oberzentren bis unter 500.000 EW, Topografie: hügelig	13,5%	26,7 %
Gießen	Gerike et al. (2020)	Oberzentren bis unter 500.000 EW, Topografie: hügelig	13,5%	24,5 %
Zwickau	Gerike et al. (2020)	Oberzentren bis unter 500.000 EW, Topografie: hügelig	13,5%	6,4 %
Halle	Gerike et al. (2020)	Oberzentren bis unter 500.000 EW, Topografie: flach	21%	17,1 %
Karlsruhe	Gerike et al. (2020)	Oberzentren bis unter 500.000 EW, Topografie: flach	21%	35,5 %
Bremerhaven	eigene Zuordnung	Oberzentren bis unter 500.000 EW, Topografie: flach	21%	-
Darmstadt	Gerike et al. (2020)	Oberzentren bis unter 500.000 EW, Topografie: flach	21%	26,4 %
Potsdam	Gerike et al. (2020)	Oberzentren bis unter 500.000 EW, Topografie: flach	21%	28,1 %
Gelsenkirchen	eigene Zuordnung	Mittelzentren, Topografie: hügelig	12,4%	-
Rottenburg	eigene Zuordnung	Mittelzentren, Topografie: hügelig	12,4%	-
Bietigheim-Bissingen	eigene Zuordnung	Mittelzentren, Topografie: hügelig	12,4%	-
Ratingen	Gerike et al. (2020)	Mittelzentren, Topografie: hügelig	12,4%	13,5 %
Döbeln	eigene Zuordnung	Mittelzentren, Topografie: hügelig	12,4%	-
Lübbecke	eigene Zuordnung	Mittelzentren, Topografie: hügelig	12,4%	-
Radebeul	Gerike et al. (2020)	Mittelzentren, Topografie: flach	20%	21,1 %

Anlage 6 Hochrechnungsfaktoren für Kurzzeitählungen des Fußverkehrs

Tab.-A 6 Hochrechnungsfaktoren für Kurzzeitählungen des Fußverkehrs nach Roßmerkel (2017a, S. 61 ff.), Roßmerkel (2017b, S. 1 ff.) und Roßmerkel (2021, S. 1 ff.)

Zeitraum	Anteil am Tagesverkehr	Std.-Abw.	HR-Faktor	max. Fehler bei		
				68%	95%	
1 Stunde	6-7 Uhr	1,6%	0,7%	62,5	46%	92%
	7-8 Uhr	5,6%	3,5%	17,9	63%	126%
	8-9 Uhr	6,4%	1,6%	15,6	26%	52%
	9-10 Uhr	6,9%	1,6%	14,5	24%	47%
	10-11 Uhr	6,9%	1,5%	14,5	21%	42%
	11-12 Uhr	7,5%	1,6%	13,3	22%	43%
	12-13 Uhr	9,4%	2,1%	10,6	22%	44%
	13-14 Uhr	9,2%	2,3%	10,9	25%	49%
	14-15 Uhr	8,2%	1,4%	12,2	17%	34%
	15-16 Uhr	9,3%	1,7%	10,8	18%	35%
	16-17 Uhr	10,1%	1,5%	9,9	15%	30%
	17-18 Uhr	10,0%	1,8%	10,0	18%	37%
18-19 Uhr	9,0%	2,3%	11,1	26%	51%	
3 Stunden	8-11 Uhr	20,2%	k. A.	5,0	k. A.	k. A.
	9-12 Uhr	21,3%	k. A.	4,7	k. A.	k. A.
	10-13 Uhr	23,8%	k. A.	4,2	k. A.	k. A.
	12-15 Uhr	26,8%	k. A.	3,7	k. A.	k. A.
	13-16 Uhr	26,7%	k. A.	3,7	10%	20%
	14-17 Uhr	27,6%	k. A.	3,6	12%	24%
15-18 Uhr	29,4%	k. A.	3,4	k. A.	k. A.	
1. + 2. + 3. + 4. Viertelstunde	8-12 Uhr	7,0%	0,9%	14,3	13%	26%
	13-17 Uhr	9,3%	1,0%	10,8	11%	22%
	14-18 Uhr	9,2%	1,0%	10,9	11%	22%
	15-19 Uhr	9,1%	1,4%	11,0	16%	32%
	16-20 Uhr	8,5%	1,4%	11,8	16%	33%

Anlage 7 Eingangsparmeter für die Hochrechnung des Kfz-Verkehrs

Tab.-A 7 Prozentuale Anteilswerte α je Stundengruppe am Tagesverkehr der Werkstage Di - Do für den Gesamtquerschnitt nach Schmidt und Thomas (1996, S. 548)

Stundengruppe	PKW									LKW		
	Westdeutsche Städte			Ostdeutsche Städte			Gesamt (Mittelwert)			Westdeutsche Städte	Ostdeutsche Städte	Gesamt (Mittelwert)
	TG _{w1}	TG _{w2}	TG _{w3}	TG _{w1}	TG _{w2}	TG _{w3}	TG _{w1}	TG _{w2}	TG _{w3}			
0-1	1,1	0,8	0,9	0,4	0,4	0,5	0,75	0,6	0,7	0,3	0,5	0,4
1-2	0,8	0,5	0,5	0,3	0,3	0,4	0,55	0,4	0,45	0,4	0,7	0,55
2-3	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,35	0,3	0,2	0,4	0,7	0,55
3-4	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,35	0,3	0,25	0,6	0,9	0,75
4-5	0,5	0,4	0,5	0,8	0,7	0,5	0,65	0,55	0,5	0,8	1,3	1,05
5-6	1,5	1,2	1,3	3,3	2,9	3,8	2,4	2,05	2,55	2	2	2
6-7	4,8	4,5	7	5,8	7,6	6,4	5,3	6,05	6,7	4,8	6,3	5,55
7-8	6,7	7,4	9,3	6,2	7,2	6,4	6,45	7,3	7,85	7,5	8	7,75
8-9	6,2	6,6	6,7	5,5	5,2	5,5	5,85	5,9	6,1	9	8,3	8,65
9-10	5,5	5,2	4,2	5,8	5,5	5,5	5,65	5,35	4,85	8,7	8,2	8,45
10-11	5,3	5	4	6,1	5,6	5,6	5,7	5,3	4,8	9	8,3	8,65
11-12	5,3	5	3,8	5,9	5,5	5,4	5,6	5,25	4,6	9	8	8,5
12-13	5,5	5,2	4,1	5,7	5,2	5,3	5,6	5,2	4,7	7,5	7,3	7,4
13-14	5,7	5,3	4,6	5,7	5,4	5,4	5,7	5,35	5	8,4	7,2	7,8
14-15	5,9	5,6	5	6	6,7	5,8	5,95	6,15	5,4	7,8	6,9	7,35
15-16	6,6	6,7	6,7	7	8,5	7	6,8	7,6	6,85	6,9	5,9	6,4
16-17	7,2	8,4	9,6	7,3	8,5	7,8	7,25	8,45	8,7	5,4	5,4	5,4
17-18	6,9	8,6	9,2	6,8	6,8	7,6	6,85	7,7	8,4	4	4	4
18-19	6,5	7,4	7,1	6,5	5,3	7	6,5	6,35	7,05	2,7	3,1	2,9
19-20	5,6	5	4,8	5,1	4,1	5,2	5,35	4,55	5	1,8	2,2	2
20-21	4,2	3,9	3,5	3,8	3,1	3,4	4	3,5	3,45	1,2	1,8	1,5
21-22	3,3	3	2,7	2,5	2,2	2,1	2,9	2,6	2,4	0,9	1,3	1,1
22-23	2,4	2,1	2,2	1,5	1,7	1,7	1,95	1,9	1,95	0,6	0,9	0,75
23-24	1,8	1,6	1,9	1,3	1,1	1,2	1,55	1,35	1,55	0,3	0,8	0,55
8-11	17	16,8	14,9	17,4	16,3	16,6	17,2	16,55	15,75	26,7	24,8	25,75
9-12	16,1	15,2	12	17,8	16,6	16,5	16,95	15,9	14,25	26,7	24,5	25,6
10-13	16,1	15,2	11,9	17,7	16,3	16,3	16,9	15,75	14,1	25,5	23,6	24,55
12-15	17,1	16,1	13,7	17,4	17,3	16,5	17,25	16,7	15,1	23,7	21,4	22,55
13-16	18,2	17,6	16,3	18,7	20,6	18,2	18,45	19,1	17,25	23,1	20	21,55
14-17	19,7	20,7	21,3	20,3	23,7	20,6	20	22,2	20,95	20,1	18,2	19,15
15-18	20,7	23,7	25,5	21,1	23,8	22,4	20,9	23,75	23,95	16,3	15,3	15,8
16-19	20,6	24,4	25,9	20,6	20,6	22,4	20,6	22,5	24,15	12,1	12,5	12,3
11-19	49,6	52,2	50,1	50,9	51,9	51,3	50,25	52,05	50,7	51,7	47,8	49,75

Tab.-A 8 Nominale Beschreibung zur Abgrenzung der Tagesganglinien-Typen des werktäglichen PKW-Verkehrs Di-Do nach Schmidt und Thomas (1996, S. 548)

TG _w -Typ	Nominale Beschreibung
TG _{w1}	Straßen im Kernstadtbereich und am Kernstadtrand mit überwiegendem Wirtschafts- und Einkaufsverkehr (geringe Überlagerung mit Berufsverkehr), Tangential- und Ringstraßen
TG _{w2}	Straßen am Kernstadtrand und im weiteren Stadtbereich, teils Radialstraßen zur Kernstadt, teils Erschließungs- und Ortsteilverbindungsstraßen
TG _{w3}	Straßen am Stadtrand, aber auch Erschließungs- und Ortsteilverbindungsstraßen mit hohem Anteil Berufsverkehr und frühem Arbeitsbeginn

Tab.-A 9 Tag-/Woche-Faktoren t in Abhängigkeit des Sonntagsfaktor b_{so} nach Schmidt und Thomas (1996, S. 553)

Wochentag	Sonntagsfaktor b _{so}	Tag/ Wochen-Faktoren t	
		PKW	LKW
Montag	0,5	0,903	0,765
	0,7	0,963	
	0,9	1,024	
Dienstag	0,5	0,909	0,74
	0,7	0,961	
	0,9	1,012	
Mittwoch	0,5	0,907	0,74
	0,7	0,951	
	0,9	0,994	
Donnerstag	0,5	0,87	0,74
	0,7	0,924	
	0,9	0,979	
Freitag	0,5	0,856	0,8
	0,7	0,895	
	0,9	0,934	

Tab.-A 10 Abgrenzung der Wochenganglinientypen anhand des Sonntagsfaktors b_{so} nach FGSV (2001, S. 2-20)

Beschreibung	Sonntagsfaktor b _{so}
Straßen im Kernstadtbereich von Großstädten, aber auch Stadtrandstraßen mit hohem Anteil Berufs- und Wirtschaftsverkehr sowie Stadtschnellstraßen ohne Anbindung an größere Naherholungsgebiete	0,5
Innerortsbereiche in Mittelstädten sowie Stadtrand- und Wohnstraßen, Erschließungsstraßen ohne Anbindung an Naherholungsgebiete oder mit Durchgangsverkehr dorthin	0,7
Stadtrandstraßen mit Verbindungsfunktion zu Freizeit- und Naherholungsgebieten	0,9

Tab.-A 11 Halbmonatsfaktoren HM der verschiedenen Fahrzeuggruppen nach Schmidt und Thomas (1996, S. 553)

Monat	Halbmonat	PKW	LKW
Januar	HM1	0,933	0,869
	HM2	0,965	0,888
Februar	HM1	0,974	0,908
	HM2	0,976	0,929
März	HM1	0,992	0,976
	HM2	1,022	1,02
April	HM1	0,999	1,021
	HM2	1,048	1,042
Mai	HM1	1,052	1,055
	HM2	1,034	1,077
Juni	HM1	1,033	1,067
	HM2	1,035	1,061
Juli	HM1	0,999	1,022
	HM2	0,939	0,928
August	HM1	0,919	0,901
	HM2	0,949	0,953
September	HM1	1,001	1,03
	HM2	1,005	1,054
Oktober	HM1	1,018	1,064
	HM2	1,018	1,065
November	HM1	1,02	1,051
	HM2	1,025	1,035
Dezember	HM1	1,028	1,007
	HM2	1,021	0,977

Anlage 8 Basisdaten des Unfalldatensatzes EUSka und Unfallatlas

Tab.-A 12 Basisdaten des Unfalldatensatzes EUSka und Unfallatlas

Merkmal	Definition	Daten vorhanden (x) in	
		EUSka	Unfallatlas
Geokoordinaten	-	x	x
Datum	-	x	x
Uhrzeit	-	x	x
Unfallkategorie	Destatis (2020, S. 20)	x	x
Anzahl Getötete, Schwer- und Leichtverletzte	Destatis (2020, S. 12)	x	
Unfalltyp	Destatis (2020, S. 16)	x	x
Unfallart	Destatis (2020, S. 17)	x	x
Lichtverhältnisse	GDV (2003, S. 8)	x	x
Straßenzustand	GDV (2003, S. 8)	x	
Lichtzeichenanlage	GDV (2003, S. 8)	x	
Charakteristik der Unfallstelle	GDV (2003, S. 8)	x	
Besonderheiten der Unfallstelle	GDV (2003, S. 8)	x	
Unfallursache	Destatis (2020, S. 13 ff.)	x	
Aufprall auf Hindernis neben der Fahrbahn	GDV (2003, S. 8)	x	
Beteiligte (Verursachende, weitere Beteiligte)	Destatis (2020, S. 12)	x	
Art der Beteiligung (Verkehrsmittel)	Destatis (2020, S. 18 ff.)	x	x

Anlage 9 Tests auf Normalverteilung

Kolmogorow-Smirnov-Test

Grundlage des Kolmogorow-Smirnov-Tests ist der größte Abstand zwischen der Verteilung der Stichprobe und der Normalverteilung mit gleichem Mittelwert und gleicher Standardabweichung. Die Teststatistik D des Tests wird wie folgt ermittelt (vgl. Okhrin 2015, S. 4):

$$D = \sup_{x \in \mathbb{R}} |\hat{F}(x) - F_0(x)| \quad \text{Formel-A 2}$$

mit

$\hat{F}(x)$ Verteilungsfunktion der betrachteten Stichprobe

$F_0(x)$ Verteilungsfunktion der Normalverteilung

Durch den Vergleich der Teststatistik D mit dem kritischen Wert c des Kolmogorow-Anpassungstests ist die Nullhypothese H_0 abzulehnen, wenn $D > c$. Der kritische Wert kann aus Tabellen abgelesen werden (vgl. bspw. Klemm 2002, S. 424) oder bei einer Stichprobenanzahl > 300 näherungsweise für einen zweiseitigen Test mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ mit folgender Formel bestimmt werden (Klemm 2002, S. 425):

$$c_{0,05} = \frac{1,35810}{\sqrt{n}} \quad \text{Formel-A 3}$$

mit

n Stichprobengröße

Shapiro-Wilk-Test

Der Shapiro-Wilk-Test (oder auch W-Test), welcher seinen Ursprung in der Wahrscheinlichkeitsrechnung hat, basiert auf dem Verhältnis zwischen der Stichprobenvarianz (siehe Nenner, Formel-A 4) und einem weiteren Schätzer für die Streuung in Abhängigkeit von Erwartungswert und Kovarianzmatrix der Normalverteilung (Shapiro und Wilk 1965, S. 592 ff.):

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Formel-A 4}$$

mit

a_i Konstante ermittelt auf Basis der Erwartungswerte der Ränge i von unabhängigen geordneten Zufallsvariablen aus der Normalverteilung und der Kovarianzmatrix der Ränge

y_i Fallmerkmal des Ranges i

\bar{y} Mittelwert der Fallmerkmale

Nach Okhrin (2015, S. 28) ist W damit ein Schätzer für ρ^2 , wobei ρ als die Korrelation zwischen den Varianzen zu verstehen ist. Damit Nullhypothese H_0 anzunehmen, wenn ein W von 1 ermittelt wird. Ist die Prüfgröße signifikant, ist die Nullhypothese H_0 abzulehnen.

Anlage 10 Teilmodell Schutzstreifen: Anteil Fahrbahnnutzung und Schutzstreifenbreite

Tab.-A 13 Logistisches Regressionsmodell Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Richtung i – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit Schutzstreifen und Berücksichtigung der Schutzstreifenbreite

Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn auf zweistreifigen Abschnitten mit Schutzstreifen

Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β	Standard- fehler	OR	p
β_0 Konstante	-	1,506 ****	0,255	4,508	****
$q_{Rf, Ges}$ Verkehrsstärke Radfahrende Gesamt in Richtung i	Rf/h	0,014 ****	0,003	1,014	**
q_{Kfz} Verkehrsstärke Kfz in Richtung i	Kfz/h	-0,002 ***	0,000	0,998	**
SV_{Anteil} Schwerverkehrsanteil in Richtung i	%	-0,167 ****	0,033	0,847	****
B_{SSF} Schutzstreifenbreite	< 1,50 m	Ref.		Ref.	0,111
	1,50 m	0,391 ^{0,082}	0,225	1,478	
	> 1,50 m	0,689 **	0,267	1,991	
$A_{LG, beidseitig}$ Anteil Länge Geschäftsbesatz beidseitig (Mittelwert)	-	1,396 ***	0,396	4,038	***
N_{FLSA} Anzahl LSA (Querungsanlage)	FLSA/km	0,277 **	0,089	1,319	**
$N_{FGÜ}$ Anzahl FGÜ (Querungsanlage)	FGÜ/km	0,268 ***	0,078	1,307	**

$n_{Stellen} = 61$

$n_{Ereignisse} = 5.337$

$n_{Versuche} = 6.100$

Devianz / df Nullmodell = 10,7

Devianz / df Modell = 4,48

McF-R² = 0,47

AIC = 484,474

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * $p < ,05$ ** $p < ,01$ *** $p < ,001$ **** $p < ,0001$

Anteil Erklärung Devianz / df (ohne nicht erklärten Anteil)

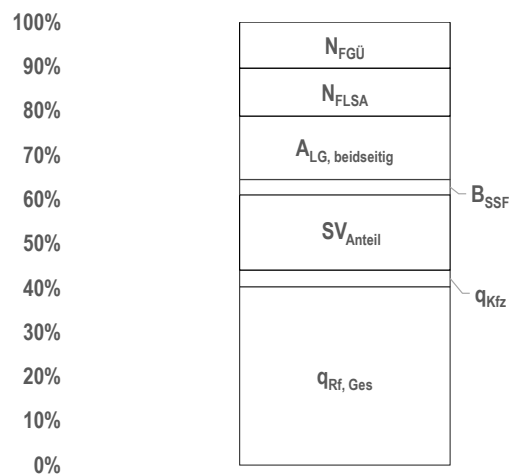
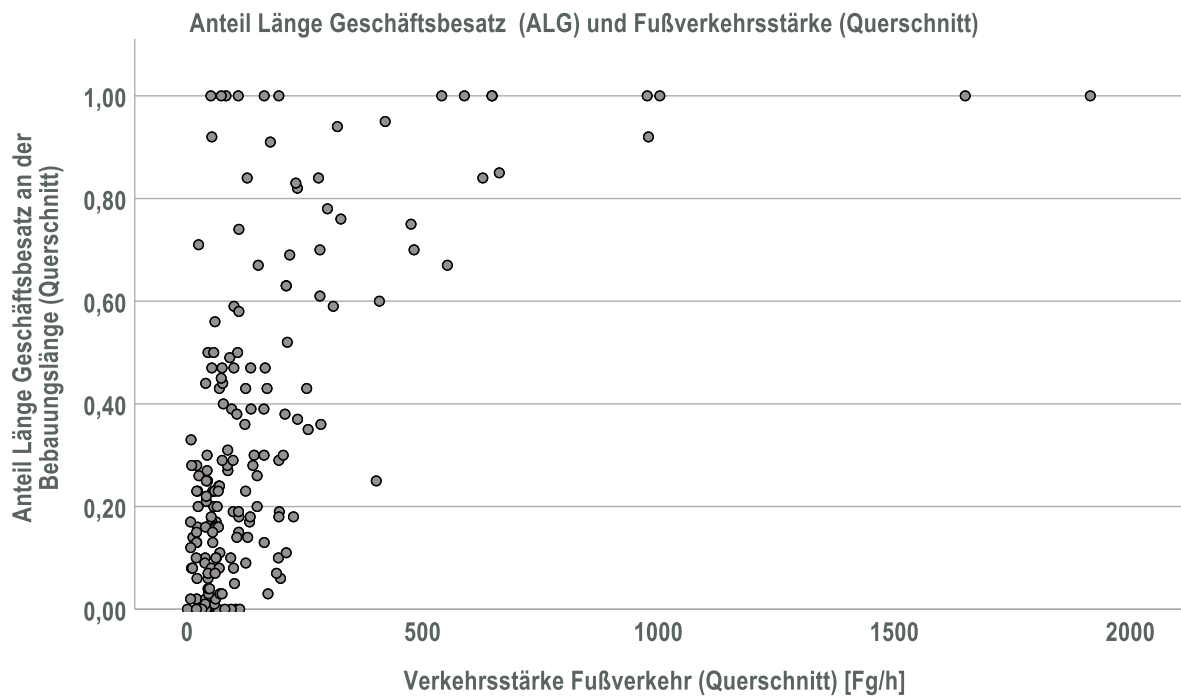


Bild-A 10 Anteilige Reduzierung der Devianz durch die unabhängigen Variablen – Teilmodell einstreifige Straßenseiten mit Schutzstreifen und Berücksichtigung der Schutzstreifenbreite

Anlage 11 Anteil Länge Geschäftsbesatz und Fußverkehrsstärke**Bild-A 11 Zusammenhang zwischen dem Anteil Länge Geschäftsbesatz und der Fußverkehrsstärke**

Anlage 12 Modellanwendung Anteil Radfahrender auf der Fahrbahn auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen

Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn in Abhängigkeit der Radverkehrsführungsform, Kfz-Verkehrsstärke und zulässiger Geschwindigkeit - Zweistreifige Richtungsfahrbahnen

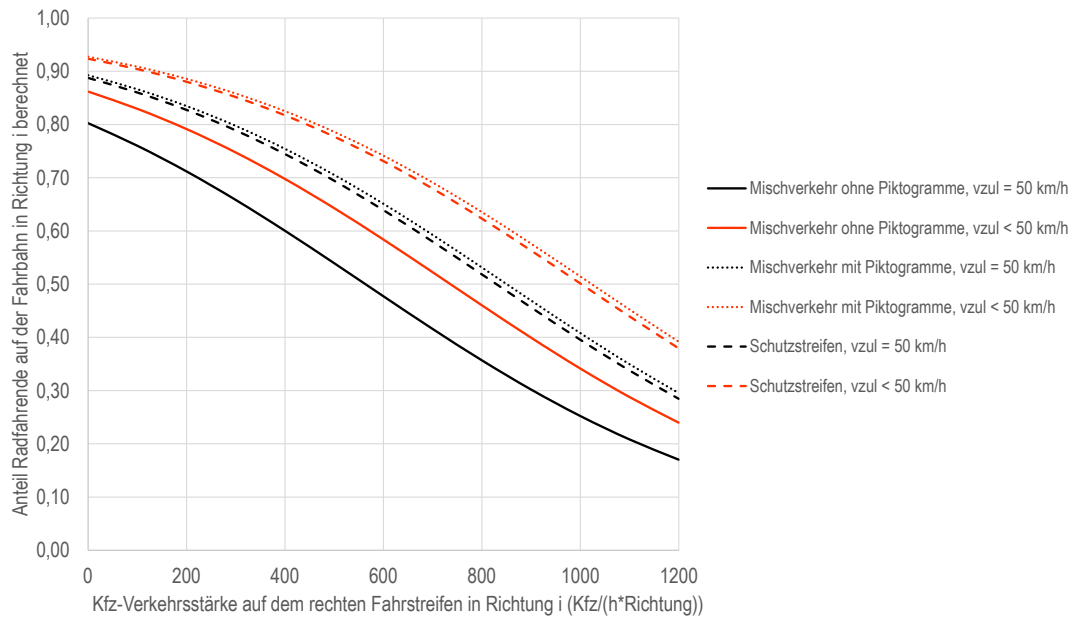


Bild-A 12 Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen in Abhängigkeit der Kfz-Verkehrsstärke auf dem rechten Fahrstreifen und der zulässigen Geschwindigkeit

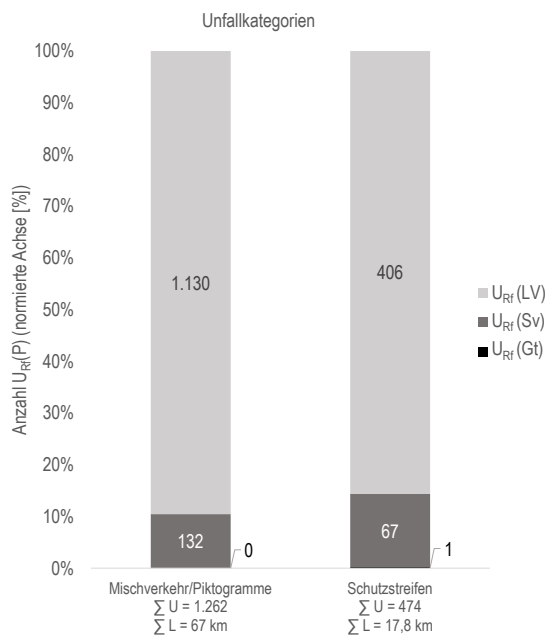
Anlage 13 Radverkehrsunfälle mit Personenschaden nach Unfallkategorien

Bild-A 13 Verteilung der Radverkehrsunfälle mit Personenschaden differenziert nach Unfallkategorien

Anlage 14 Unfalltypen und Beteiligtenkonstellationen

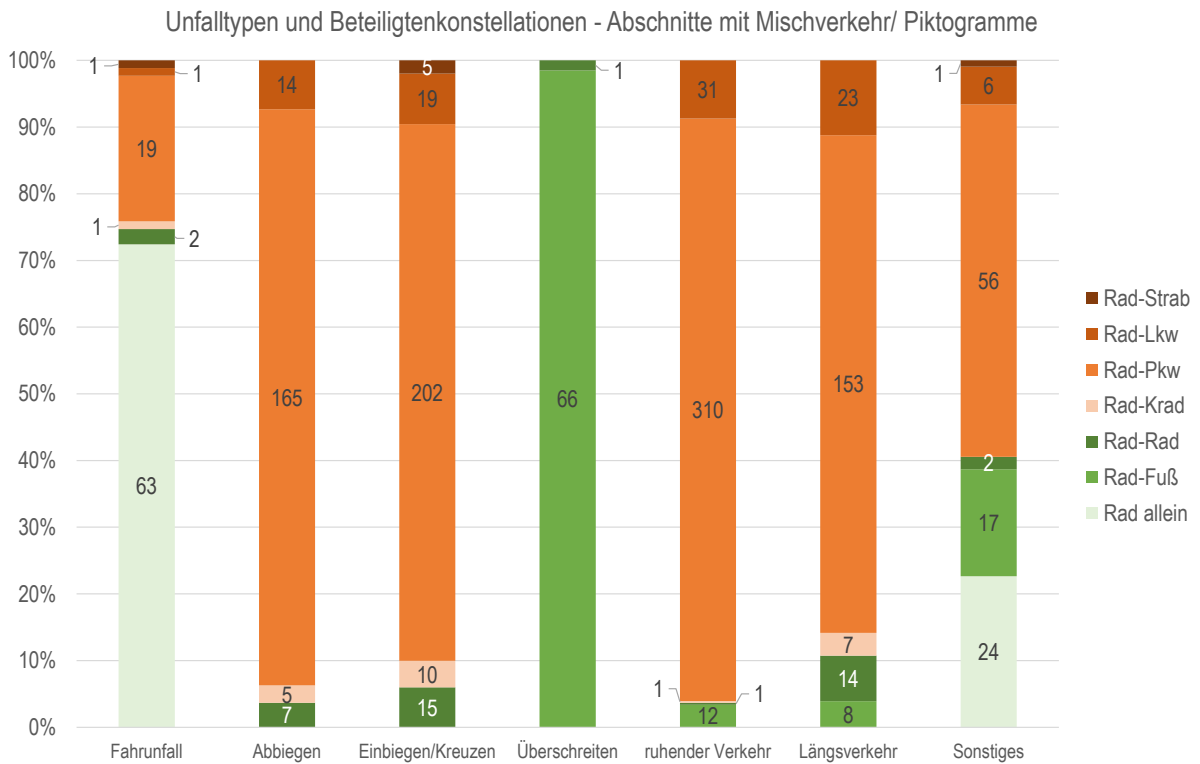


Bild-A 14 Unfalltypen und Beteiligtenkonstellationen – Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme (n = 165)

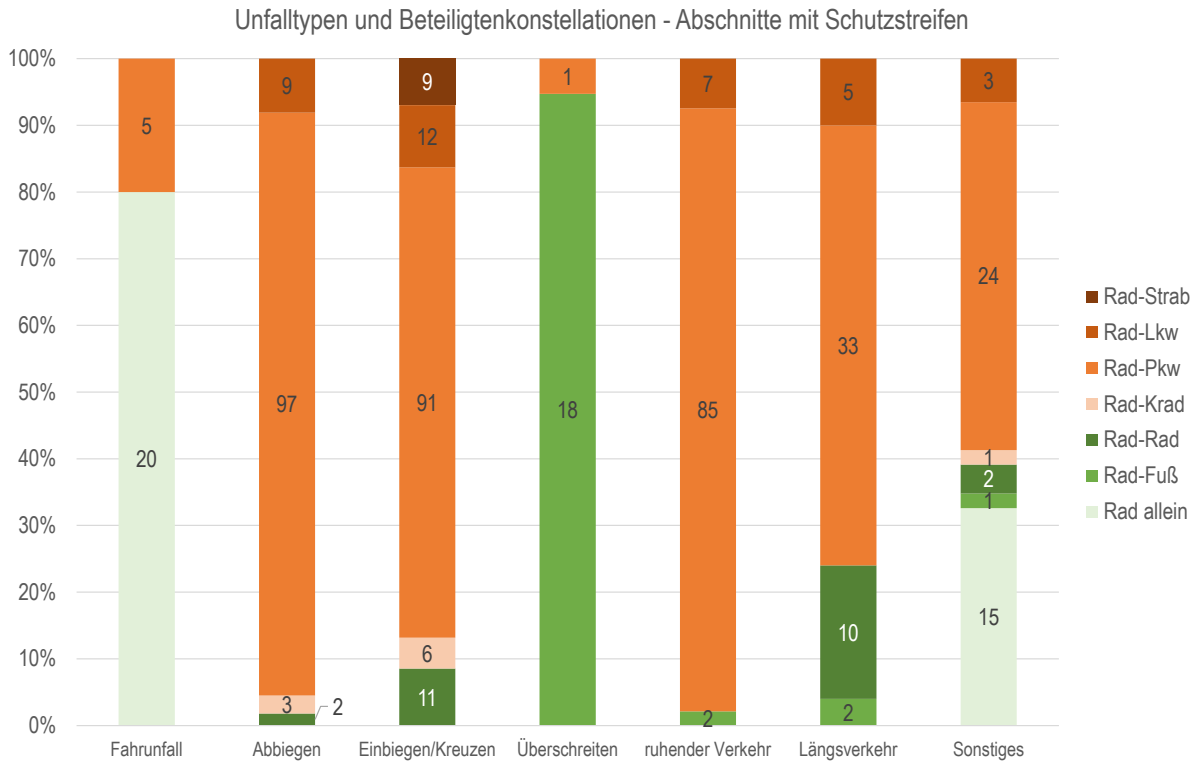


Bild-A 15 Unfalltypen und Beteiligtenkonstellationen – Abschnitte mit Schutzstreifen (n = 39)

Anlage 15 Teilmodelle Unfalltyp 1 (Fahrurfälle)

Tab.-A 14 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 1 (Fahrurfälle), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

$U_{Rf}(P)$ / (km*a)		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante		-	-7,623	1,114	****
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)		Rf/24 h	0,869	0,164	****
Gleise	Gleise im Mischverkehr		nein	Ref.		****
			ja	1,799	0,340	****

n_{Stellen} = 165

n_{Unfälle} = 1.262

Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 4,36

Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 1,57

erklärte Varianz = 83 %

AIC = 270,27

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

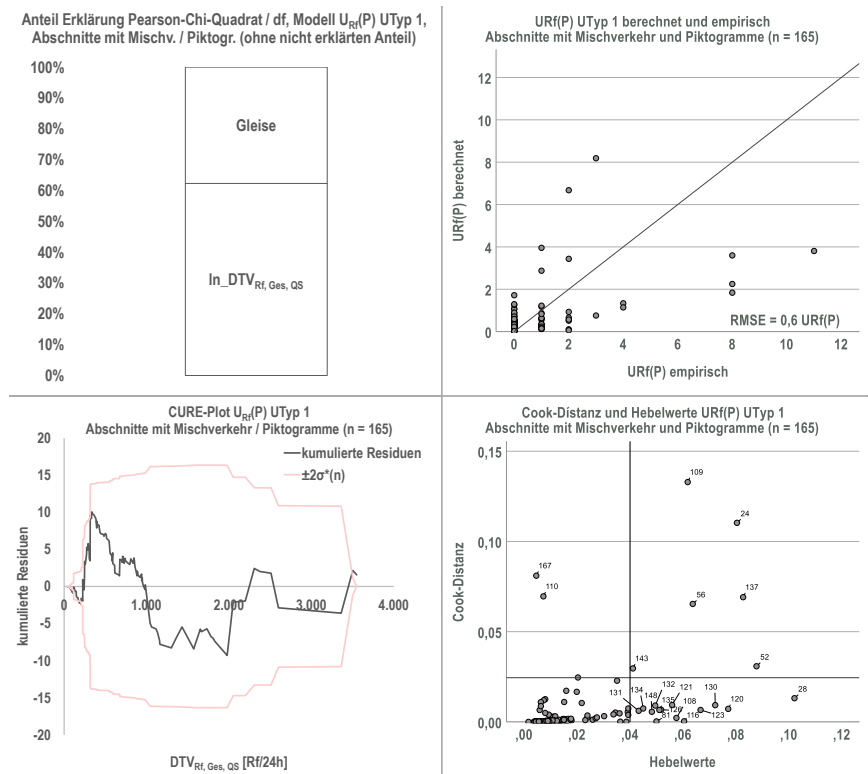


Bild-A 16 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat / df) der Variablen (oben, links); Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (oben, rechts); CURE-Plot (unten, links); Cook-Distanz und Hebelwerte (unten, rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 1 (Fahrurfälle), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

Tab.-A 15 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 1 (Fahrerunfälle), Abschnitte mit Schutzstreifen

$U_{Rf}(P) / (km^2 \cdot a)$		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante		-	-4,704 ***	1,419	****
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)		Rf/24 h	0,497 **	0,189	*

n_{Stellen} = 39
n_{Unfälle} = 437
Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 1,01
Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 0,87
erklärte Varianz = 100 %
AIC = 74,4

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

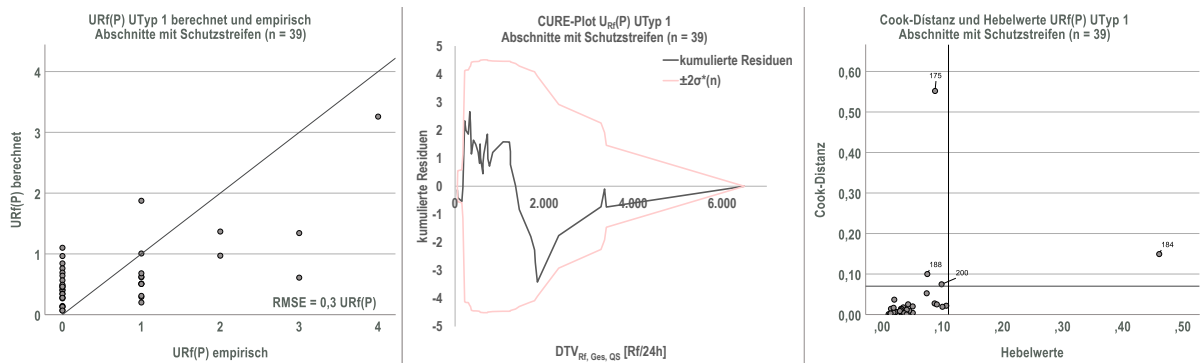


Bild-A 17 Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (links); CURE-Plot (Mitte); Cook-Distanz und Hebelwerte (rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 1 (Fahrerunfälle), Abschnitte mit Schutzstreifen

Anlage 16 Teilmodelle Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle)

Tab.-A 16 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

$U_{Rf}(P)$ / (km*a)		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante		-	-8,467 ****	0,937	****
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)		Rf/24 h	0,782 ****	0,123	****
A _{Fb, QS}	Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn im Querschnitt		%	0,027 **	0,010	**
DTV _{Kfz, QS}	DTV Kfz Querschnitt		Kfz/24 h	7,68E-05 **	0,000	**
V _{zul}	zulässige Geschwindigkeit		50 km/h	Ref.		**
			< 50 km/h	-1,151 **	0,427	
MT	Mitteltrennung		keine/markiert	Ref.		*
			baulich	-0,941 **	0,326	

n_{Stellen} = 165

n_{Unfälle} = 1.262

Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 3,43

Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 1,6

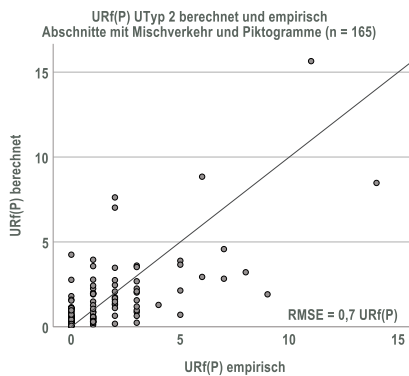
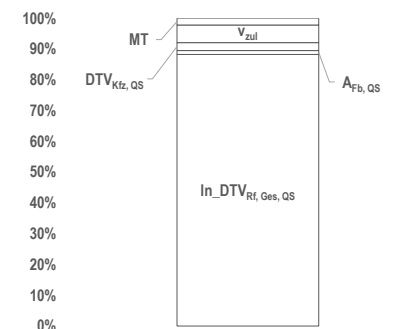
erklärte Varianz = 75 %

AIC = 407,07

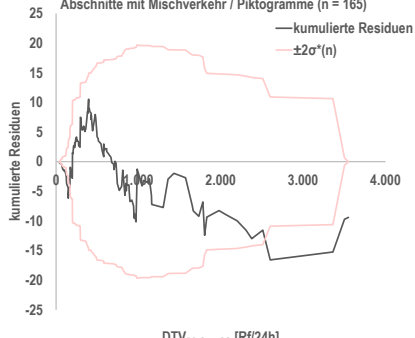
¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

Anteil Erklärung Pearson-Chi-Quadrat / df, Modell $U_{Rf}(P)$ UTyp 2, Abschnitte mit Mischv. / Piktogr. (ohne nicht erklärten Anteil)



CURE-Plot $U_{Rf}(P)$ UTyp 2, Abschnitte mit Mischverkehr / Piktogramme (n = 165)



Cook-Distanz und Hebelwerte $U_{Rf}(P)$ UTyp 2, Abschnitte mit Mischverkehr und Piktogramme (n = 165)

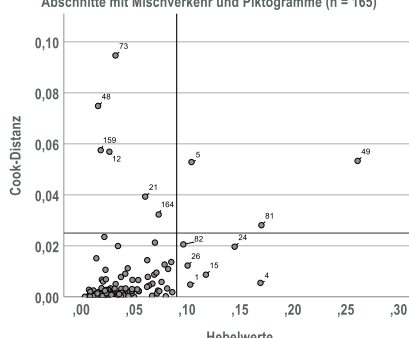


Bild-A 18 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat / df) der Variablen (oben, links); Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (oben, rechts); CURE-Plot (unten, links); Cook-Distanz und Hebelwerte (unten, rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

Tab.-A 17 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle), Abschnitte mit Schutzstreifen

$U_{Rf}(P)$ / (km*a)		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante		-	-12,277 ****	1,988	***
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)		Rf/24 h	0,637 ****	0,144	***
A _{Fb, QS}	Anteil Radfahrende auf der Fahrbahn im Querschnitt		%	0,068 **	0,021	**
DTV _{Kfz, QS}	DTV Kfz Querschnitt		Kfz/24 h	1,38E-04 ***	0,000	***
AL _G	Anteil Länge Geschäftsbesatz (Mittelwert beider Straßenseiten)		%	0,015 *	0,006	*
MT	Mitteltrennung		keine/markiert	Ref.		**
			baulich	-1,395 ***	0,410	
N _{FLSA}	Anzahl LSA (Querungsanlage)		FLSA/km	0,327 ***	0,089	**

n_{Stellen} = 39

n_{Unfälle} = 437

Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 3,64

Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 1,34

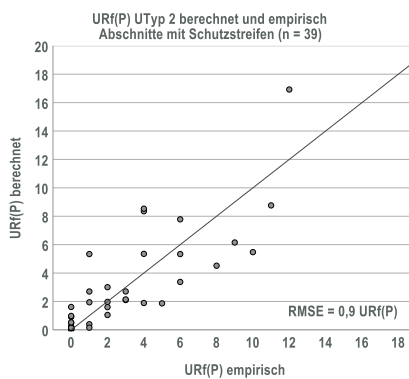
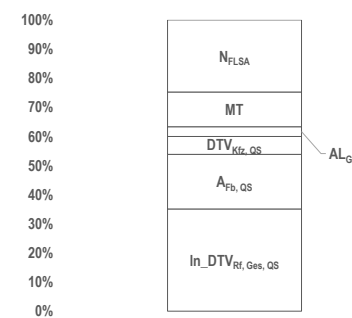
erklärte Varianz = 87 %

AIC = 136,35

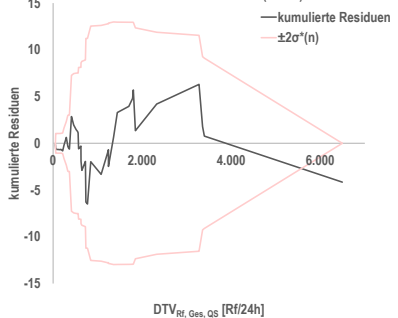
¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

Anteil Erklärung Pearson-Chi-Quadrat / df, Modell $U_{Rf}(P)$ UTyp 2, Abschnitte mit Schutzstreifen (ohne nicht erklärten Anteil)



CURE-Plot $U_{Rf}(P)$ UTyp 2, Abschnitte mit Schutzstreifen (n = 39)



Cook-Distanz und Hebelwerte $U_{Rf}(P)$ UTyp 2, Abschnitte mit Schutzstreifen (n = 39)

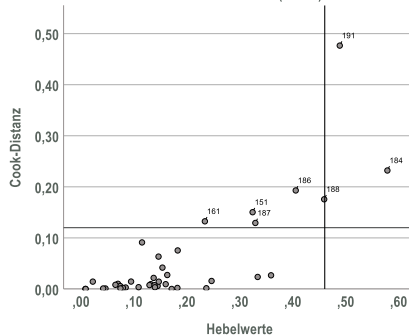


Bild-A 19 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat / df) der Variablen (oben, links); Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (oben, rechts); CURE-Plot (unten, links); Cook-Distanz und Hebelwerte (unten, rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfälle), Abschnitte mit Schutzstreifen

Anlage 17 Teilmodelle Unfalltyp 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle)

Tab.-A 18 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

$U_{Rf}(P)$ / (km*a)		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1	
k	Konstante		-	-4,957	****	0,522	****
In_DTV _{Rf, Fb, QS}	DTV Radfahrende Fahrbahn Querschnitt (logarithmiert)		Rf/24 h	0,599	****	0,084	****
DTV _{Kfz, QS}	DTV Kfz Querschnitt		Kfz/24 h	3,68E-05	*	0,000	*
v_{zul}	zulässige Geschwindigkeit		50 km/h	Ref.			0,10
			< 50 km/h	-0,426	0,09	0,250	
$N_{AKP, VZ}$	Anzahl Anschlussknotenpunkte Vorfahrtzeichen		AKP/km	0,078	*	0,033	**
N_{FLSA}	Anzahl LSA (Querungsanlage)		FLSA/km	0,196	**	0,073	*

$n_{Stellen} = 165$

$n_{Unfälle} = 1.262$

Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 3

Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 1,67

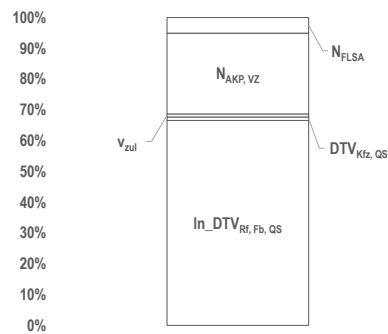
erklärte Varianz = 67 %

AIC = 493,17

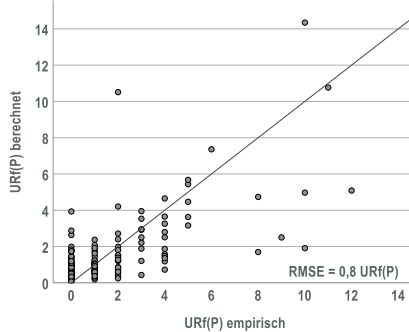
¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * $p < ,05$ ** $p < ,01$ *** $p < ,001$ **** $p < ,0001$

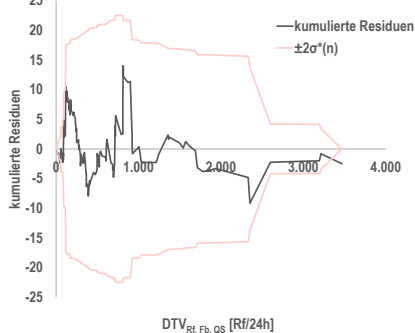
Anteil Erklärung Pearson-Chi-Quadrat / df, Modell $U_{Rf}(P)$ UTyp 3, Abschnitte mit Mischv. / Piktogr. (ohne nicht erklärten Anteil)



$U_{Rf}(P)$ UTyp 3 berechnet und empirisch Abschnitte mit Mischverkehr und Piktogramme (n = 165)



CURE-Plot $U_{Rf}(P)$ UTyp 3 Abschnitte mit Mischverkehr / Piktogramme (n = 165)



Cook-Distanz und Hebelwerte $U_{Rf}(P)$ UTyp 3 Abschnitte mit Mischverkehr und Piktogramme (n = 165)

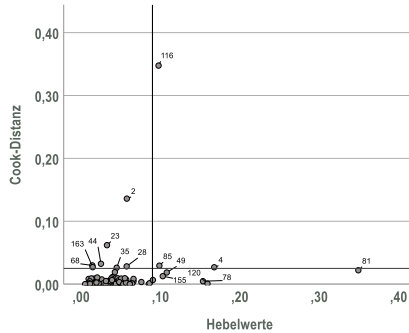


Bild-A 20 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat / df) der Variablen (oben, links); Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (oben, rechts); CURE-Plot (unten, links); Cook-Distanz und Hebelwerte (unten, rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

Tab.-A 19 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle), Abschnitte mit Schutzstreifen

$U_{Rf}(P)$ / ($km^2 \cdot a$)					
	Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressionskoeffizient β^1	Standardfehler	p^1
k	Konstante	-	-5,360 ****	0,949	*
In_DTV _{Rf, Fb, QS}	DTV Radfahrende Fahrbahn Querschnitt (logarithmiert)	Rf/24 h	0,708 ****	0,132	***
DTV _{Kfz, QS}	DTV Kfz Querschnitt	Kfz/24 h	5,47E-05 ^{0.12}	0,000	0,09
V _{zul}	zulässige Geschwindigkeit	50 km/h	Ref.		*
		< 50 km/h	-1,116 **	0,401	
N _{FLSA}	Anzahl LSA (Querungsanlage)	FLSA/km	0,292 **	0,112	*

n_{Stellen} = 39

n_{Unfälle} = 437

Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 6,59

Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 2,4

erklärte Varianz = 75 %

AIC = 165,77

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

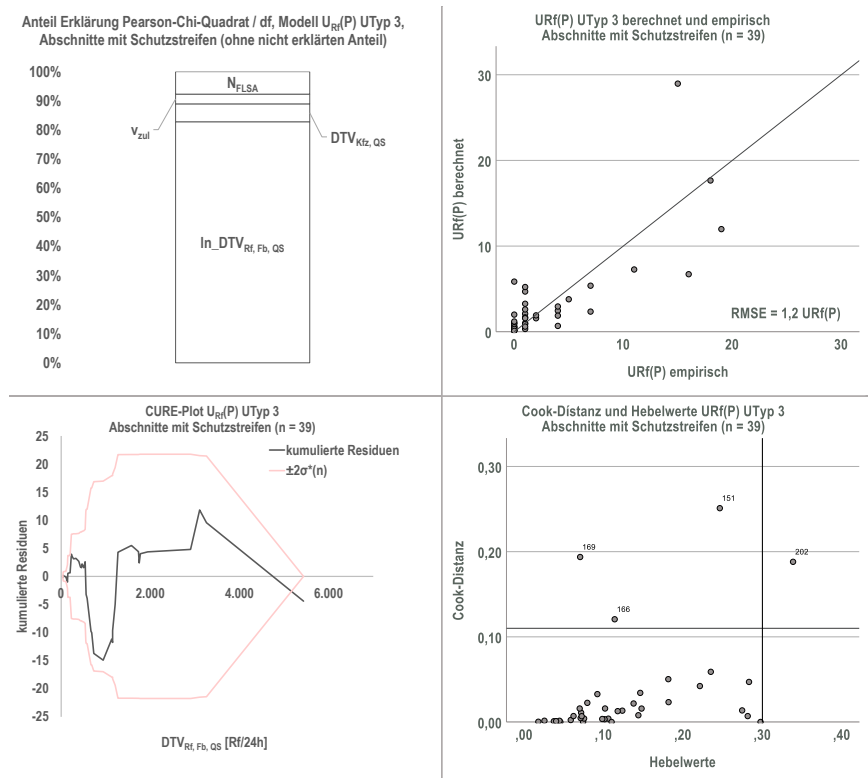


Bild-A 21 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat / df) der Variablen (oben, links); Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (oben, rechts); CURE-Plot (unten, links); Cook-Distanz und Hebelwerte (unten, rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 3 (Einbiegen/ Kreuzen-Unfälle), Abschnitte mit Schutzstreifen

Anlage 18 Teilmodelle Unfalltyp 4 (Überschreiten-Unfälle)

Tab.-A 20 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 4 (Überschreiten-Unfälle), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

$U_{Rf}(P)$ / (km*a)		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1	
k	Konstante	-	-	-11,803	****	1,514	****
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)	Rf/24 h		0,777	**	0,288	**
In_DTV _{Fg, QS}	DTV Gehende Querschnitt (logarithmiert)	Fg/24 h		0,582	**	0,189	**
N _{StrabHST, Mitte}	Anzahl Strab-Haltestellen in Mittellage	HST/km		0,378	****	0,071	****
N _{StrabHST, KapÜ}	Anzahl Strab-Haltestellen überfahrbares Kap	HST/km		0,382	0,28	0,350	0,10
N _{FGÜ}	Anzahl FGÜ (Querungsanlage)	FGÜ/km		0,171	*	0,072	*

n_{Stellen} = 165

n_{Unfälle} = 1.262

Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 6,75

Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 0,97

erklärte Varianz = 100 %

AIC = 171,74

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

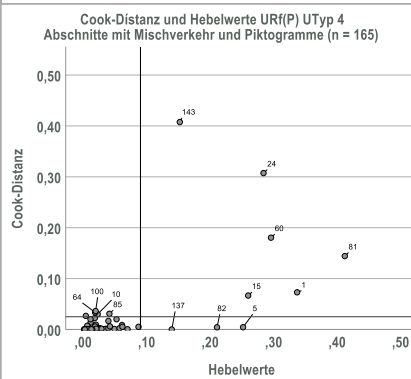
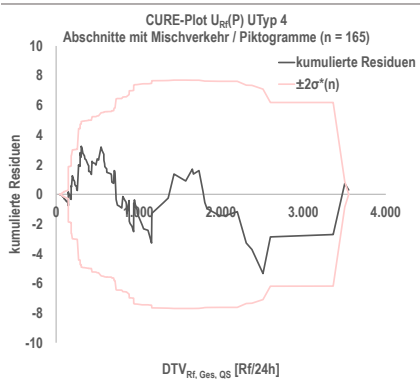
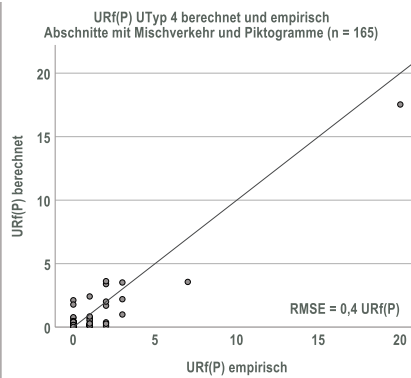
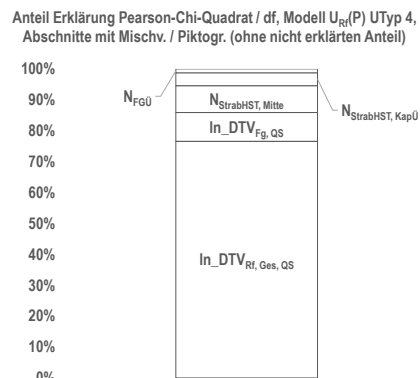


Bild-A 22 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat / df) der Variablen (oben, links); Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (oben, rechts); CURE-Plot (unten, links); Cook-Distanz und Hebelwerte (unten, rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 4 (Überschreiten-Unfälle), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

Tab.-A 21 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 4 (Überschreiten-Unfälle), Abschnitte mit Schutzstreifen

$U_{Rf}(P)$ / ($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)

	Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante	-	-8,520 ****	1,232	****
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)	Rf/24 h	0,979 ****	0,152	****

$n_{\text{Stellen}} = 39$

$n_{\text{Unfälle}} = 437$

Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 1,23

Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 0,66

erklärte Varianz = 100 %

AIC = 56,57

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * $p < ,05$ ** $p < ,01$ *** $p < ,001$ **** $p < ,0001$

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * $p < ,05$ ** $p < ,01$ *** $p < ,001$ **** $p < ,0001$

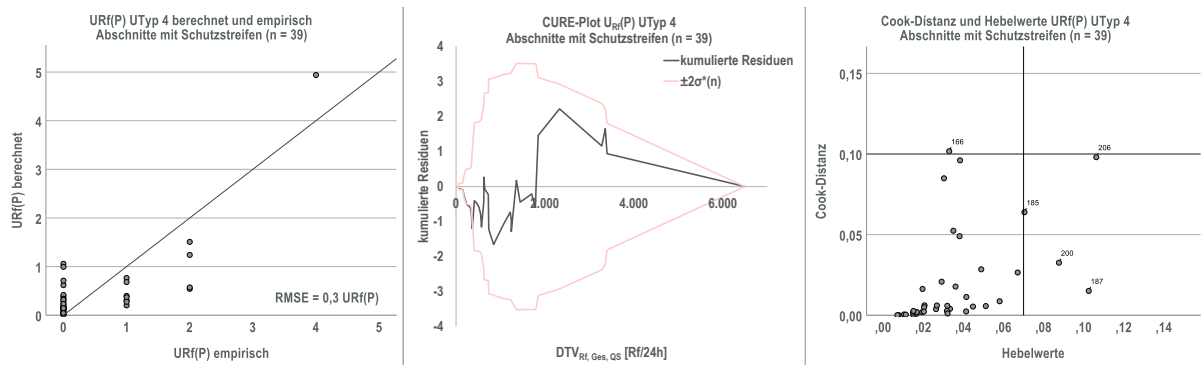


Bild-A 23 Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (links); CURE-Plot (Mitte); Cook-Distanz und Hebelwerte (rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 4 (Überschreiten-Unfälle), Abschnitte mit Schutzstreifen

Anlage 19 Teilmodelle Unfalltyp 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr)

Tab.-A 22 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

$U_{Rf}(P)$ / (km*a)		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante		-	-7,941 ****	0,657	****
In_DTV _{Rf, Fb, QS}	DTV Radfahrende Fahrbahn Querschnitt (logarithmiert)		Rf/24 h	1,081 ****	0,108	****
V _{zul}	zulässige Geschwindigkeit		50 km/h	Ref.		*
			< 50 km/h	-0,847 **	0,290	
AL _G	Anteil Länge Geschäftsbesatz (Mittelwert beider Straßenseiten)		%	0,021 ****	0,003	****

n_{Stellen} = 165

n_{Unfälle} = 1.262

Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 12,78

Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 1,31

erklärte Varianz = 97 %

AIC = 365,72

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** < ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

Anteil Erklärung Pearson-Chi-Quadrat / df, Modell $U_{Rf}(P)$ UTyp 5, Abschnitte mit Mischv. / Piktogr. (ohne nicht erklärten Anteil)

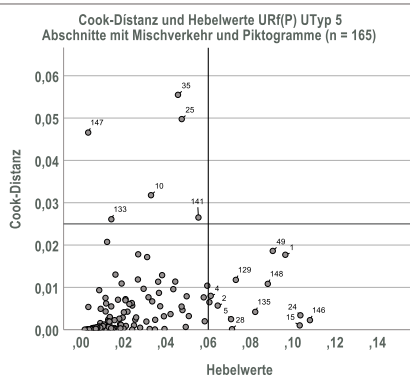
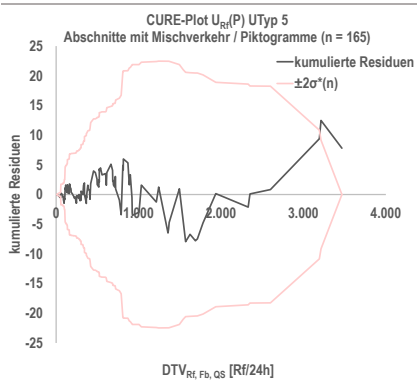
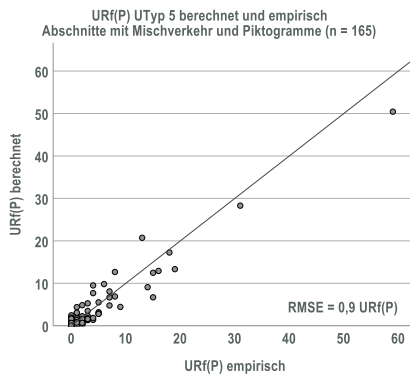
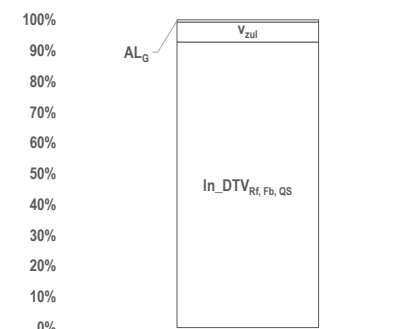


Bild-A 24 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat / df) der Variablen (oben, links); Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (oben, rechts); CURE-Plot (unten, links); Cook-Distanz und Hebelwerte (unten, rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

Tab.-A 23 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr), Abschnitte mit Schutzstreifen

$U_{Rf}(P)$ / (km*a)		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante		-	-4,900 ****	0,633	****
In_DTV _{Rf, Fb, QS}	DTV Radfahrende Fahrbahn Querschnitt (logarithmiert)		Rf/24 h	0,407 ***	0,108	**
AL _G	Anteil Länge Geschäftsbesatz (Mittelwert beider Straßenseiten)		%	0,016 ***	0,005	*
AL _{LIV}	Anteil Länge ruhender Verkehr (Mittelwert beider Straßenseiten)		-	2,679 ***	0,709	***

n_{Stellen} = 39
n_{Unfälle} = 437
Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 5,37
Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 1,21
erklärte Varianz = 95 %
AIC = 112,53

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

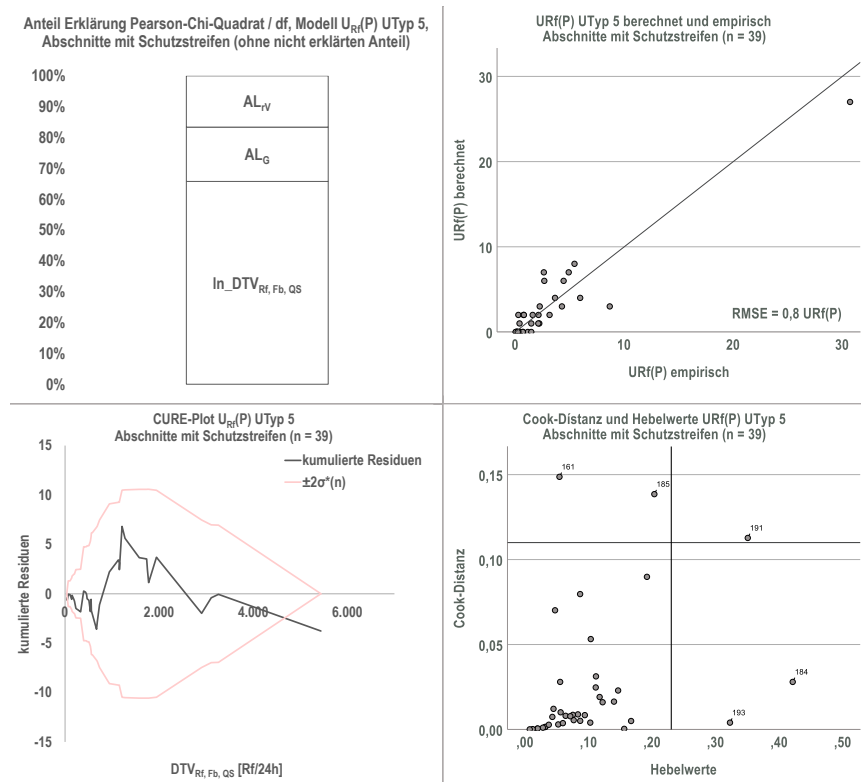


Bild-A 25 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat / df) der Variablen (oben, links); Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (oben, rechts); CURE-Plot (unten, links); Cook-Distanz und Hebelwerte (unten, rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 5 (Unfälle durch ruhenden Verkehr), Abschnitte mit Schutzstreifen

Anlage 20 Teilmodelle Unfalltyp 6 (Unfälle im Längsverkehr)

Tab.-A 24 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 6 (Unfälle im Längsverkehr), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

$U_{Rf}(P)$ / (km*a)		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1	
k	Konstante		-	-8,935	****	0,883	****
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)		Rf/24 h	1,096	****	0,127	****
DTV _{Kfz, QS}	DTV Kfz Querschnitt		Kfz/24 h	4,49E-05	**	0,000	*
AL _G	Anteil Länge Geschäftsbesatz (Mittelwert beider Straßenseiten)		%	0,013	****	0,003	**

$n_{Stellen} = 165$

$n_{Unfälle} = 1.262$

Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 7,39

Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 1,41

erklärte Varianz = 94 %

AIC = 331,23

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** < ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * $p < ,05$ ** $p < ,01$ *** $p < ,001$ **** $p < ,0001$

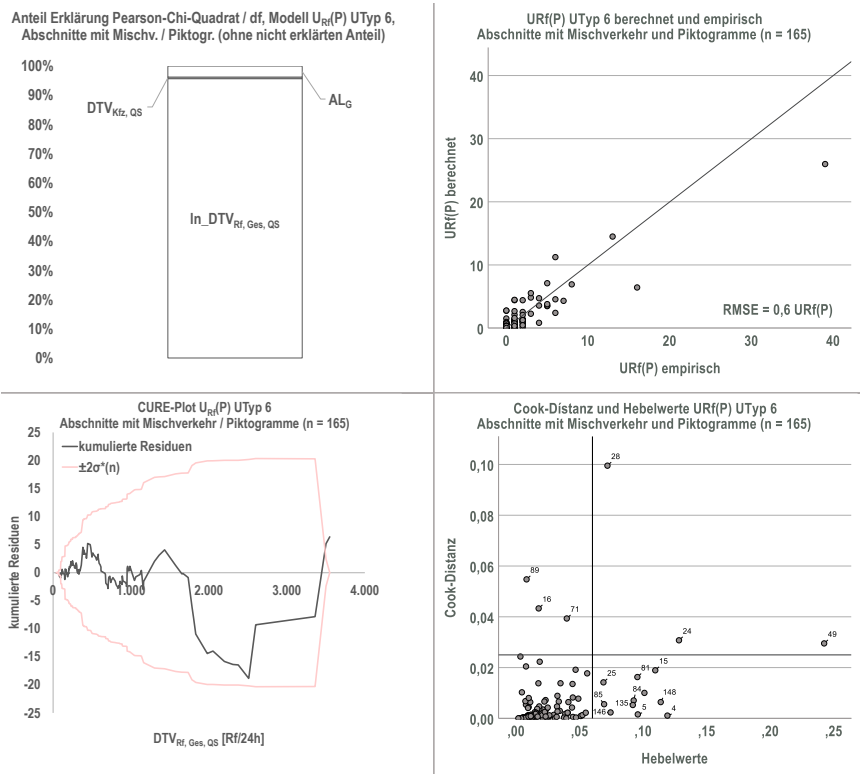


Bild-A 26 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat / df) der Variablen (oben, links); Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (oben, rechts); CURE-Plot (unten, links); Cook-Distanz und Hebelwerte (unten, rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 6 (Unfälle im Längsverkehr), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

Tab.-A 25 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 6 (Unfälle im Längsverkehr), Abschnitte mit Schutzstreifen

$U_{Rf}(P)$ / (km*a)		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante		-	-6,814 ****	1,046	****
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)	Rf/24 h		0,742 ****	0,156	****
DTV _{Kfz, QS}	DTV Kfz Querschnitt	Kfz/24 h		6,85E-05 *	0,000	*

n_{Stellen} = 39
n_{Unfälle} = 437
Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 3,61
Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 1,06
erklärte Varianz = 98 %
AIC = 91,74

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

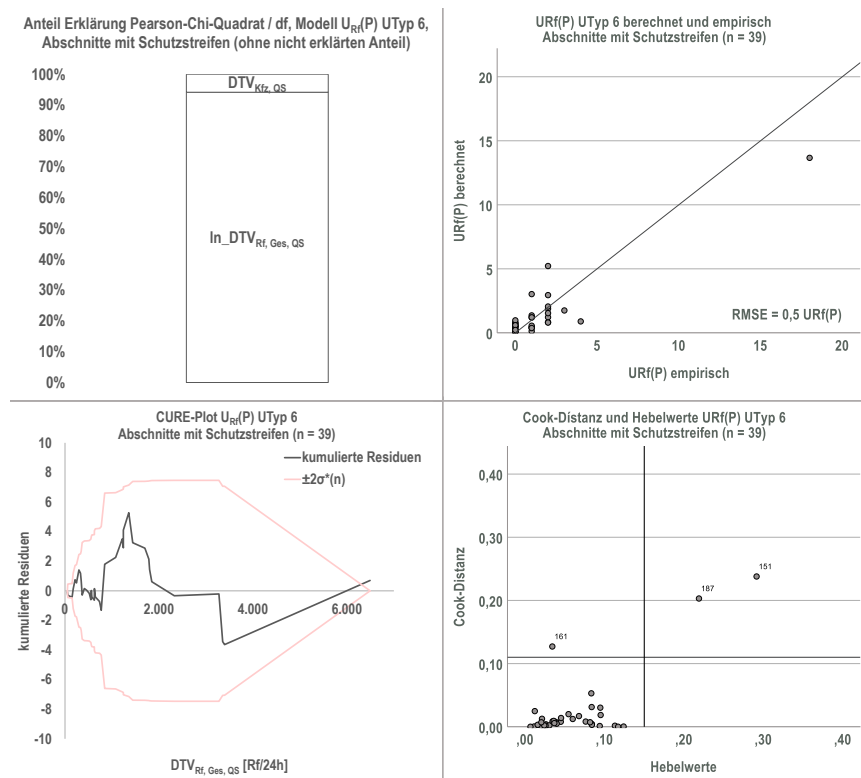


Bild-A 27 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat / df) der Variablen (oben, links); Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (oben, rechts); CURE-Plot (unten, links); Cook-Distanz und Hebelwerte (unten, rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 6 (Unfälle im Längsverkehr), Abschnitte mit Schutzstreifen

Anlage 21 Teilmodelle Unfalltyp 7 (Sonstige Unfälle)

Tab.-A 26 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 7 (Sonstige Unfälle), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

$U_{Rf}(P)$ / (km*a)		Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressionskoeffizient β^1	Standardfehler	p^1
k	Konstante		-	-10,222 ****	1,259	****
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)		Rf/24 h	1,368 ****	0,178	****
Gleise	Gleise im Mischverkehr		nein	0a ****		0,09
			ja	0,568 ^{0,11}	0,356	
V _{zul}	zulässige Geschwindigkeit		50 km/h	0a ****		*
			< 50 km/h	-1,149 **	0,437	

n_{Stellen} = 165

n_{Unfälle} = 1.262

Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 3,57

Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 1,42

erklärte Varianz = 83 %

AIC = 281,2

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

Anteil Erklärung Pearson-Chi-Quadrat / df, Modell $U_{Rf}(P)$ UTyp 7, Abschnitte mit Mischv. / Piktogr. (ohne nicht erklärten Anteil)

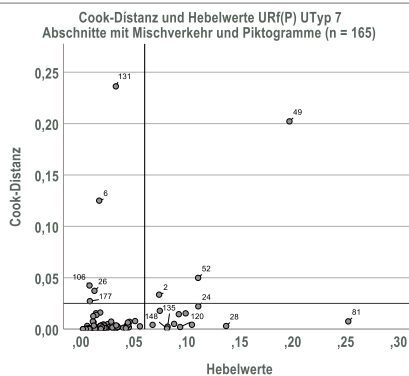
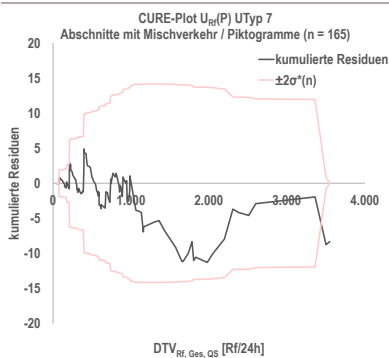
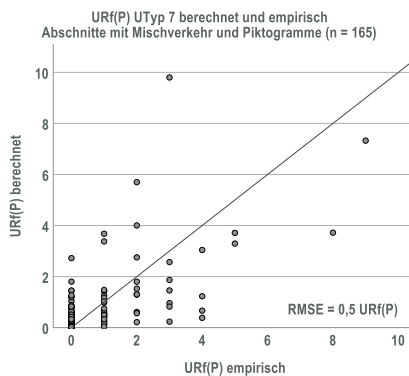
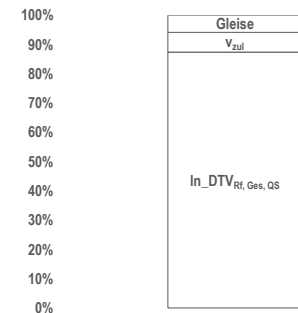


Bild-A 28 Anteil Erklärungsgehalt (Pearson-Chi-Quadrat / df) der Variablen (oben, links); Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (oben, rechts); CURE-Plot (unten, links); Cook-Distanz und Hebelwerte (unten, rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 7 (Sonstige Unfälle), Abschnitte mit Mischverkehr/ Piktogramme

Tab.-A 27 Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 7 (Sonstige Unfälle), Abschnitte mit Schutzstreifen

$U_{Rf}(P)$ / ($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)					
	Variable	Einheit/ Ausprägung	Regressions- koeffizient β^1	Standard- fehler	p^1
k	Konstante	-	-3,876 **	1,296	***
In_DTV _{Rf, Ges, QS}	DTV Radfahrende Querschnitt (logarithmiert)	Rf/24 h	0,466 **	0,178	*

n_{Stellen} = 39
n_{Unfälle} = 437
Pearson-Chi-Quadrat / df Nullmodell (Poisson) = 2,07
Pearson-Chi-Quadrat / df Modell (Poisson) = 1,8
erklärte Varianz = 26 %
AIC = 118,28

¹ Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test) * < ,05 ** < ,01 *** ,001 **** < ,0001

Signifikanz Modelleffekt (Likelihood-Ratio-Test) * $p < ,05$ ** $p < ,01$ *** $p < ,001$ **** $p < ,0001$

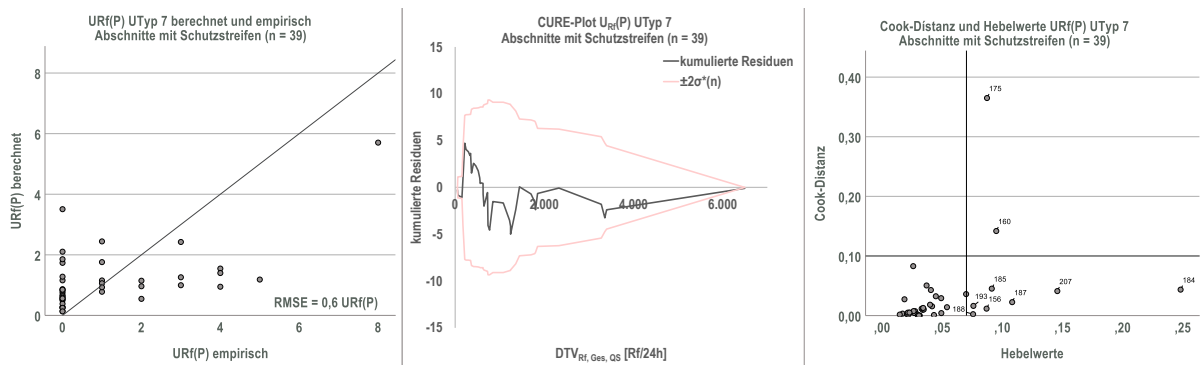


Bild-A 29 Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$) berechnet und empirisch (Mitte) und CURE-Plot (rechts) – Teilmodell Radverkehrsunfälle mit Personenschaden ($U_{Rf}(P)$), Unfalltyp 7 (Sonstige Unfälle), Abschnitte mit Schutzstreifen