

Abschätzung des Einflusses der Verkehrssicherheit auf die Routenwahl im Radverkehr anhand einer pseudo-repräsentativen Stichprobe von GPS-Daten

Schlussbericht

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
aus Mitteln zur Umsetzung des Nationalen Radverkehrsplans gefördert.

Projektbegleitung:



Bundesamt
für Güterverkehr



Bearbeitet durch:

Bettina Schröter
Sebastian Hantschel
Regine Gerike

Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List"
Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
Professur für Integrierte Verkehrsplanung und Straßenverkehrstechnik

Stefan Huber
Paul Lindemann

Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List"
Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
Professur für Verkehrsökologie

Juliane Anke

Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List"
Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
Professur für Verkehrpsychologie

INHALT

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	IX
1 EINLEITUNG	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2 Ziele.....	2
1.3 Vorgehen.....	3
2 KENNTNISSTAND	5
2.1 Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit Radfahrender.....	5
2.1.1 Exposition.....	9
2.1.2 Geschwindigkeit.....	10
2.1.3 Radverkehrsführung.....	11
2.1.4 Ruhender Verkehr	12
2.1.5 Anlagen des ÖPNV	12
2.1.6 Knotenpunktspezifische Merkmale.....	13
2.2 Routenwahl von Radfahrenden.....	16
2.3 Fazit.....	19
3 DATENERHEBUNG UND –AUFBEREITUNG.....	21
3.1 GPS-Trajektorien.....	21
3.1.1 Auswahl Untersuchungskollektiv	21
3.1.2 Datenerhebung.....	22
3.1.3 Datenaufbereitung.....	23
3.2 Infrastruktur- und Betriebsdaten	25
3.2.1 Abgrenzung und Definitionen	25
3.2.2 Attribute Strecken.....	26
3.2.3 Attribute Knoten.....	30
3.3 Exposition.....	31
3.4 Unfalldaten	34
3.5 Kritische Situationen.....	34
3.6 Daten: Vereinfachte Modelle	35
4 METHODIK.....	41
4.1 Analyse der Verkehrssicherheit.....	41
4.2 Analyse der Routenwahl	43

4.2.1	Modellierung diskreter Entscheidungen	43
4.2.2	Erzeugung von Routenalternativen	47
4.2.3	Attribuierung der Routen und -alternativen.....	48
4.2.4	Voraussetzungen der Modellschätzung.....	51
4.2.5	Routenwahlmodell.....	55
4.2.6	Bestimmung der Modellgüte.....	56
5	ANALYSE DER VERKEHRSSICHERHEIT.....	59
5.1	Differenzierte Unfallmodelle für Dresden.....	59
5.1.1	Strecken	59
5.1.2	Annäherungsbereiche	70
5.1.3	Knotenpunkte	74
5.1.4	Knotenpunktzufahrten	81
5.2	Vereinfachte Modelle für Dresden, Darmstadt und München.....	91
5.2.1	Deskriptive Statistik	91
5.2.2	Vereinfachtes Streckenmodell.....	92
5.2.3	Vereinfachtes Knotenpunktmodell.....	94
5.3	Vergleich der Modelle.....	96
5.4	Kritische Situationen.....	97
5.5	Zusammenfassung	99
6	ANALYSE DER ROUTENWAHL	101
6.1	Differenziertes Modell für Dresden	101
6.2	Vereinfachte Modelle für Dresden, Darmstadt und München.....	135
6.3	Vergleich der Modelle.....	145
6.3.1	Differenziertes vs. vereinfachtes Routenwahlmodell (Dresden)	145
6.3.2	Vergleich der vereinfachten Modelle (Dresden, Darmstadt und München)	148
6.4	Zusammenfassung	150
7	EINFLUSS DER VERKEHRSSICHERHEIT AUF DIE ROUTENWAHL.....	152
7.1	Rückkopplung des Einflusses der Verkehrssicherheit auf die Routenwahl	152
7.2	Fazit zur Wechselwirkung von Verkehrssicherheit und Routenwahl	156
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	159
9	LITERATURVERZEICHNIS	162
ANLAGEN.....		168

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Methodik Untersuchungsablauf	3
Abbildung 2	Altersverteilung der Proband*innen der Hauptstichprobe während der RadVerS-Feldstudie (Francke et al. 2020)	21
Abbildung 3	Screendesigns und Grundfunktionalität der RadVerS-App (Francke et al. 2020)	22
Abbildung 4	Ablaufschema Datenaufbereitung RadVerS (Francke et al. 2020).....	23
Abbildung 5:	Netzabdeckung der Infrastrukturdatenerhebung in der Stadt Dresden (Kartengrundlage: Openstreetmap)	25
Abbildung 6:	Differenzierung der Netzelemente (eigene Darstellung).....	26
Abbildung 7	Schematische Darstellung zur Ermittlung der Streckenlängen.....	28
Abbildung 8	Schematisches Vorgehen der Verschneidung mit der Umfeldnutzung	29
Abbildung 9	Knotenstromzählung des Radverkehrs (links) und motorisierten Verkehrs (rechts) (Straßen- und Tiefbauamt Dresden).....	31
Abbildung 10	Netzabdeckung der MOVEBIS-Daten (Kartengrundlage: OpenStreetMap)	32
Abbildung 11	Gegenüberstellung der Verkehrsstärken der Referenz- und GPS-Daten (MOVEBIS)	33
Abbildung 12	Relatives Fußverkehrsaufkommen im Innenstadtbereich (rote Schattierung) anhand von POIs (Kartengrundlage: OpenStreetMap)	34
Abbildung 13	Fragebogen-Item zur Art der erlebten kritischen Situation (Einfachauswahl), aus Mobilitätstagebuch des RadVerS-Projektes	35
Abbildung 14	Screen-Design der STADTRADELN-App.....	36
Abbildung 15	Lineare und logistische Regressionsfunktion im Vergleich.....	44
Abbildung 16	Gewählte Route (blau) und erzeugte Routenalternativen (grün, braun).....	48
Abbildung 17	Korrelationsmaße (Spearman) der verkehrlichen, betrieblichen und infrastrukturellen Merkmale an Strecken	63
Abbildung 18	Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeteiligung) an Strecken für alle Unfallkategorien (links) und Unfälle mit Personenschäden (rechts)	64
Abbildung 19	Absolute Häufigkeit der zweistelligen Unfalltypen für Längsverkehrsunfälle an Strecken.....	65
Abbildung 20	Verteilung der Beteiligtenkonstellation für Unfälle an Strecken	65
Abbildung 21	Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeteiligung) an selbstständigen Wegen für alle Unfallkategorien (links) und Unfälle mit Personenschäden (rechts)	70
Abbildung 22	Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeteiligung) an Annäherungsbereichen für alle Unfallkategorien (links) und Unfälle mit Personenschäden (rechts)	71
Abbildung 23	Korrelationsmaße (Spearman) der verkehrlichen, betrieblichen und infrastrukturellen Merkmale an Knotenpunkten.....	76
Abbildung 24	Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeteiligung) an Knotenpunkten für alle Unfallkategorien (links) und Unfälle mit Personenschäden (rechts)	77
Abbildung 25	Unfalldichten aller Unfälle und Abbiegeunfälle an Knotenpunktzufahrten in Abhängigkeit von der Absetzung der Zufahrt.....	81

Abbildung 26:	Korrelationsmaße (Spearman) zwischen Fahrstreifenanzahl und Verkehrsstärken des Kfz- und Schwerverkehrs.....	83
Abbildung 27	Korrelationsmaße (Spearman) der verkehrlichen, betrieblichen und infrastrukturellen Merkmale an Knotenpunktzufahrten.....	85
Abbildung 28	Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeteiligung) an Knotenpunktzufahrten für alle Unfallkategorien (links) und Unfälle mit Personenschaden (rechts)	86
Abbildung 29	Verteilung der Beteiligtenkonstellation für Unfälle an Knotenpunktzufahrten	86
Abbildung 30	Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeteiligung) der vereinfachten Modelle an Strecken (links) Knotenpunkten (rechts)	92
Abbildung 31	Streudiagramm der beobachteten und berechneten Unfallzahlen an Streckenabschnitten (vereinfachtes Modell).....	94
Abbildung 32	CURE-Plot der Streckenabschnitte (vereinfachtes Modell) in Abhängigkeit von der Radverkehrsstärke (links) und der Kfz-Verkehrsstärke (rechts)	94
Abbildung 33	Streudiagramm der beobachteten und berechneten Unfallzahlen an Knotenpunkten (vereinfachtes Modell).....	95
Abbildung 34	CURE-Plot der Knotenpunkte (vereinfachtes Modell) in Abhängigkeit von der Radverkehrsstärke (links) und der Kfz-Verkehrsstärke (rechts)	96
Abbildung 35	Lokalisierung der kritischen Situationen aus Mobilitätstagebuch - RadVerS-Projekt (Kartengrundlage: OpenStreetMap)	98
Abbildung 36	Häufigkeiten der kritischen Situationen (Einfachauswahl), $N_{ges} = 372$; aus Mobilitätstagebuch - RadVerS-Projekt	98
Abbildung 37	Geschlechterverteilung der Stichprobe ($n = 167$).....	101
Abbildung 38	Altersverteilung der Stichprobe ($n = 167$).....	101
Abbildung 39	Radfahr-Typen innerhalb der Stichprobe ($n = 167$).....	102
Abbildung 40	Anteile der Wegezwecke an den Fahrten ($n = 3.560$)	102
Abbildung 41	Radverkehrsmengen in Dresden ($N=3.988$ Fahrten)	103
Abbildung 42	Fahrtweitenverteilung	104
Abbildung 43	Anteile der Routen mit Radverkehrs-infrastruktur	105
Abbildung 44	Anteile der Routen mit Asphaltoberfläche	105
Abbildung 45	Routenanteile mit ruhendem Verkehr.....	106
Abbildung 46	Routenanteile mit einer max. zulässigen Höchstgeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs $\leq 30\text{km/h}$	106
Abbildung 47	Mittlerer DTV-Kfz entlang der Routen	107
Abbildung 48	Routenanteile mit 1 Richtungsfahrstreifen des MV	107
Abbildung 49	DTV-Rad > 500 [R/d] entlang der Routen	108
Abbildung 50	Streckenanteile mit geringer Fußverkehrsichte	108
Abbildung 51	Häufigkeit „rvl“ geregelter Knotenpunkte	109
Abbildung 52	Häufigkeit LSA-geregelter Knotenpunkte	109
Abbildung 53	Unfallhäufigkeit.....	109

Abbildung 54	Häufigkeit kritischer Situationen	109
Abbildung 55	Verteilung der Umfeldnutzung „Wohnflächen“.....	110
Abbildung 56	Verteilung der Umfeldnutzung „Grünflächen	110
Abbildung 57	Erklärungsgehalt der einzelnen Variablen.....	118
Abbildung 58	Entwicklung der LLR und der LL _{Model} mit der sukzessiven Aufnahme der Variablen	119
Abbildung 59	Entwicklung des McFadden-R ² mit der sukzessiven Aufnahme der Variablen.....	120
Abbildung 60	Geschlechterverteilung der Stichprobe (n = 391).....	137
Abbildung 61	Altersverteilung der Stichprobe (n = 391).....	137
Abbildung 62	Aggregierte Fahrten (Verkehrsmengen) im Verkehrsnetz von Darmstadt (N=4.479 Fahrten)	138
Abbildung 63	Fahrtweitenverteilung in Darmstadt.....	138
Abbildung 64	Routenanteile mit Radverkehrsinfrastruktur	139
Abbildung 65	Verteilung der maximalen Längsneigung	139
Abbildung 66	Verteilung der Längs-neigung ≤ 2%.....	139
Abbildung 67	Routenanteile mit Asphaltoberfläche.....	139
Abbildung 68	Box-Plot zum DTV _{Rad} entlang der gewählten Routen.....	139
Abbildung 69	Geschlechterverteilung der Stichprobe (n = 1.350)	141
Abbildung 70	Altersverteilung der Stichprobe (n = 1.350)	141
Abbildung 71	Aggregierte Fahrten (Verkehrsmengen) im Verkehrsnetz von München (N=10.630 Fahrten)	142
Abbildung 72	Fahrtweitenverteilung in München.....	142
Abbildung 73	Routenanteile mit Radverkehrsinfrastruktur	143
Abbildung 74	Verteilung der maximalen Längsneigung	143
Abbildung 75	Verteilung der Längs-neigung ≤ 2%.....	143
Abbildung 76	Routenanteile mit Asphaltoberfläche.....	143
Abbildung 77	Box-Plot zum DTV _{Rad} entlang der gewählten Routen	143
Abbildung 78	Visualisierung der Modellkoeffizienten zu Vergleichszwecken.....	146
Abbildung 79	Visualisierung der Modellkoeffizienten zu Vergleichszwecken.....	149
Abbildung 80	Vergleich der ermittelten SiPo	153
Abbildung 81	SiPo Dresden (Ausschnitt Innenstadt).....	154

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Rahmendaten der relevanten Studien zur Verkehrssicherheit Radfahrender	6
Tabelle 2	Unfallkennwerte differenziert nach Radverkehrsführungsform (innerorts, nur Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung)	11
Tabelle 3	Rahmendaten der relevanten Studien zur Routenwahl Radfahrender	17
Tabelle 4	Aufgezeichnete Sensordaten (Francke et al. 2020)	23
Tabelle 5	Attribute und Ausprägungen für Streckenelemente.....	27
Tabelle 6	Attribute und Ausprägungen Knotenelemente.....	30
Tabelle 7	Datenverfügbarkeit in den Vergleichsstädten München und Darmstadt.....	38
Tabelle 8	Attribute und Ausprägungen der Netzgrundlage der vereinfachten Modelle	39
Tabelle 9	Attribute der Routen und Alternativen	49
Tabelle 10	Ergänzende Attribute der Routen und Alternativen	51
Tabelle 11	Personenbezogene Charakteristika	51
Tabelle 12	In die Analyse aufgenommene Prädiktor-Variablen	55
Tabelle 13	Klassifikationsstatistik – Gegenüberstellung der beobachteten und der vorhergesagten Werte.....	58
Tabelle 14	Verteilung der Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Strecken	60
Tabelle 15	Endmodell Strecken alle Unfalltypen U(P,S)	67
Tabelle 16	Endmodell Strecken Fahrunfälle U(P,S)_Typ1.....	68
Tabelle 17	Endmodell Strecken Abbiegeunfälle U(P,S)_Typ2.....	68
Tabelle 18	Endmodell Strecken Einbiegen/Kreuzen-Unfälle U(P,S)_Typ3	69
Tabelle 19	Endmodell Strecken – Selbstständige Wege U(P,S).....	70
Tabelle 20	Verteilung der Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Annäherungsbereiche	71
Tabelle 21	Statistische Unabhängigkeit mittleren Unfalldichten gruppiert nach Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Annäherungsbereiche.....	73
Tabelle 22	Statistische Unabhängigkeit der mittleren Unfalldichten der kombinierten Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Annäherungsbereiche.....	74
Tabelle 23	Verteilung der Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Knotenpunkte	74
Tabelle 24	Endmodell Knotenpunkte alle Unfalltypen U(P,S)	79
Tabelle 25	Endmodell Knotenpunkte Fahrunfälle U(P,S)_Typ1.....	79
Tabelle 26	Endmodell Knotenpunkte Abbiegeunfälle U(P,S)_Typ2	80
Tabelle 27	Endmodell Knotenpunkte Einbiegen/Kreuzen-Unfälle U(P,S)_Typ3	80
Tabelle 28	Verteilung der Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Knotenpunktzufahrten	82

Tabelle 29	Endmodell Zufahrten alle Unfalltypen U(P,S).....	88
Tabelle 30	Endmodell Zufahrten Abbiegeunfälle U(P,S)_Typ2.....	89
Tabelle 31	Endmodell Zufahrten Einbiegen/Kreuzen-Unfälle U(P,S)_Typ3	90
Tabelle 32	Verteilung der Ausprägungen von Merkmalen der Strecken und Knoten in den vereinfachten Modellen.....	91
Tabelle 33	Vereinfachtes Modell Streckenabschnitte U(P)	93
Tabelle 34	Vereinfachtes Modell Knotenpunkte U(P)	95
Tabelle 35	Längsneigungen im Vergleich	104
Tabelle 36	Kennwerte der Merkmalsausprägung für die einzelnen Einflussfaktoren.....	111
Tabelle 37	Ergebnisse der logistischen Regressionsanalyse	112
Tabelle 38	Klassifikationsstatistik des Modells.....	120
Tabelle 39	Durchschnittswerte der geschlechter-spezifischen Modelle im Vergleich	122
Tabelle 40	Modellkoeffizienten der geschlechter-spezifischen Modelle im Vergleich	123
Tabelle 41	Medianwerte der Wegezweck-spezifischen Modelle im Vergleich	126
Tabelle 42	Modellkoeffizienten der Wegezweck-spezifischen Modelle im Vergleich	128
Tabelle 43	Medianwerte der Typen-spezifischen Modelle im Vergleich.....	131
Tabelle 44	Modellkoeffizienten der Typen-spezifischen Modelle im Vergleich	133
Tabelle 45	Ergebnisse der Modellschätzung für Dresden.....	136
Tabelle 46	Ergebnisse der Modellschätzung für Darmstadt.....	140
Tabelle 47	Ergebnisse der Modellschätzung für München	144
Tabelle 48	Vergleich der Modellergebnisse für Dresden	145
Tabelle 49	Vergleich der Wahlwahrscheinlichkeiten für die beiden Modelle und sechs Szenarien	146
Tabelle 50	Vergleich der Modellgüte.....	148
Tabelle 51	Kennwerte der deskriptiven Statistik für die vereinfachten Modelle	150
Tabelle 52	Analyseergebnisse der Routenwahl unter Einbezug des Sicherheitspotenzials	155
Tabelle 53	Vergleich der Modellkoeffizienten des vereinfachten Modells	155

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADFC	Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club
AIC	Informationskriterium von Akaike
AKP	Anschlussknotenpunkt
App	Smartphone-Applikation
Bet	Beteiligung
BNL	Binomiales Logit
DGM	Digitales Geländemodell
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
EBK	Erweiterte Blockkarte
EBM	Empirische Bayes Methode
ESKN	Erweitertes Straßenknotennetz
EUSKa	Elektronische Unfalltypenkarte
EVE	Empfehlungen für Verkehrserhebungen
Fg	Zufußgehende
FGZ	Fußgängerzone
FR	Fahrtrichtung
GIS	Geoinformationssystem
GLM	Generalisiertes Lineares Modell Generalized Linear Model
GPS	Global Positioning System
HVKP	Hauptverkehrsknotenpunkt
HVS	Hauptverkehrsstrecke
IIA	Independence of Irrelevant Alternatives
Kfz	Kraftfahrzeug
KP	Knotenpunkt
LSA	Lichtsignalanlage
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MNL	Multinomiales Logit
MV	Radverkehrsführung: Mischverkehr
NGO	Nichtregierungsorganisation Non-governmental organization
NKP	Nebennetzknotenpunkt
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OSM	Openstreetmap
POI	Point of Interest
QS	Querschnitt
Rf	Radfahrende
RFS	Radverkehrsführung: Radfahrstreifen

RmB	Radverkehrsführung: Radweg mit Benutzungspflicht
RoB	Radverkehrsführung: Radweg ohne Benutzungspflicht
RP	Revealed Preference
SP	Stated Preference
SSF	Radverkehrsführung: Mischverkehr mit Schutzstreifen
SSM	Surrogate Safety Measures
U(P)	Unfälle mit Personenschaden (Kat1-3)
U(P,S)	Unfälle mit Personenschaden und Sachschaden (Kat1-6)
U(P,SS)	Unfälle mit Personenschaden und schweren Sachschaden (Kat1-4)
UD	Unfalldichte
UKD	Unfallkostendichte
UKR	Unfallkostenrate
UR	Unfallrate
ZF	Knotenpunktzufahrt

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Eine wichtige Voraussetzung zur Umsetzung des NRVP bildet die Gestaltung sicherer und attraktiver Radverkehrsanlagen. Dabei wird Sicherheit und Attraktivität der Radverkehrsinfrastruktur von Radfahrenden unterschiedlich bewertet. Radfahrende lassen sich in unterschiedliche Typen untergliedern, die tendenziell ähnliche Radverkehrsanlagen präferieren. Jedoch kann insbesondere das unterschiedlich wahrgenommene Sicherheitsgefühl der Radfahrenden einen signifikanten Einfluss auf die Routenwahl haben.

Umfassende und quantifizierte Informationen zur Wirkung der objektiven und subjektiven Sicherheit auf die Nutzung von Radverkehrsinfrastruktur (Routenwahl) liegen aktuell nicht vor. Darüber hinaus fehlen umfassende Erkenntnisse zur Quantifizierung des Einflusses infrastruktureller, verkehrlicher und netzplanerischer Merkmale auf das Radunfallgeschehen differenziert nach Unfallkonstellationen an Streckenabschnitten und Knotenpunkten. Ziel des Vorhabens soll es demnach sein, ein Unfallmodell unter Berücksichtigung von infrastrukturellen, verkehrlichen und netzplanerischen Merkmalen zu erstellen (Abschätzung der objektiven Sicherheit). In der Folge soll der Einfluss der objektiven und subjektiven Verkehrssicherheit auf die Routenwahl von Radfahrenden bestimmt werden. Auf Basis dieser Modelle wird die Abschätzung von Unfall- und Nutzungswahrscheinlichkeiten ermöglicht, auch wenn keine Daten zum Unfallgeschehen vorliegen.

Für die Untersuchung werden Daten des NRVP-Projekts VB 1704 (RadVerS) genutzt, in welchen Fahrten von über 200 Proband*innen via GPS dokumentiert und deren Einschätzungen zur subjektiven Sicherheit während einer vierwöchigen Feldphase erhoben wurden. Die Proband*innen wurden anhand der Kriterien Radfahrttyp, Alter und Geschlecht als geschichtete Stichprobe gezogen und kommen dem Bevölkerungsquerschnitt deutscher Radfahrenden sehr nahe. Innerhalb des geplanten Vorhabens (SiRou) sollen diese Daten mit dem Unfallgeschehen überlagert werden.

Dazu wird ein Unfallmodell basierend auf Unfall-, Infrastruktur- und Verkehrsdaten erstellt. Das Modell kann zum einen, sofern alle Eingangsgrößen in den Städten vorliegen, Unfallzahlen für jedes Netzelement prognostizieren. Alternativ können typische Unfallkenngrößen (Unfallrate UR, Unfallkostenrate UKR) zur Beschreibung des Sicherheitsniveaus unterschiedlicher Strecken- und Knotenpunkttypen abgeschätzt werden.

Darauf aufbauend wird, basierend auf den GPS-basierten Verhaltensdaten, ein Routenwahlmodell geschätzt, um die Auswirkung der Sicherheitsbewertung in Wechselwirkung mit anderen Variablen auf die Nutzung von Radverkehrsanlagen zu quantifizieren. Dazu werden die gefahrenen Routen (GPS-Daten) sowie die nicht gewählten Alternativen mit Routeneigenschaften versehen und auf Basis multivariater statistischer Schätzverfahren miteinander verglichen.

Die Bewertung der subjektiven Sicherheit auf Basis der gemeldeten kritischen Situationen, die im Rahmen der Erhebung im NRVP-Projekt RadVerS erfasst wurden, kann anschließend mit den Ergebnissen des Unfall- und Routenwahlmodells räumlich überlagert werden.

Zusammenfassend wird das Ziel verfolgt, den Einfluss infrastruktureller, verkehrlicher und netzplanerischer Merkmale auf das Radunfallgeschehen an Streckenabschnitten und Knotenpunkten und die Bestimmung des Einflusses der objektiven und subjektiven Verkehrssicherheit auf die Routenwahl von Radfahrenden zu quantifizieren.

1.2 Ziele

Die Kernziele des Projekts lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Quantifizierung des Einflusses infrastruktureller, verkehrlicher und netzplanerischer Merkmale auf das Radunfallgeschehen an Streckenabschnitten und Knotenpunkten
 - Quantifizierung relevanter Einflussgrößen
 - Erstellung eines Unfallmodells für die freie Strecke (anhand der Pilotstadt Dresden: Hauptverkehrsstraßenennetzung und Radhauptrouten: ca. 280 km)
 - Erstellung eines Unfallmodells für Knotenpunkte (anhand der Pilotstadt Dresden: Hauptverkehrsstraßenknotenpunkte und Knotenpunkte entlang von Radhauptrouten nach Vorhandensein von Daten zur Verkehrsstärke: ca. 150 Knotenpunkte)
 - Betrachtung von lichtsignal- und vorfahrtzeichengeregelten Knotenpunkten
 - Teilmodelle nach Unfallkonstellationen
 - Aufbereitung als Faktoren zum Eingang in das Routenwahlmodell (je ein Faktor für subjektive und objektive Sicherheit pro Knoten und Kante)
- Bestimmung des Einflusses der objektiven und subjektiven Verkehrssicherheit auf die Routenwahl von Radfahrenden
 - Ermittlung relevanter Einflussfaktoren
 - Erstellung eines Routenwahlmodells
 - Ermittlung der Wirkung der Einflussfaktoren (insbesondere der objektiven und subjektiven Verkehrssicherheit)
- Prüfung der Umsetzbarkeit eines vereinfachten Unfall- und Routenwahlmodells
 - Erhebung und Aufbereitung von Infrastruktur-, Verkehrs-, Unfall- und Routenwahldaten für das Hauptverkehrsnetz zweier weiteren Kommunen
 - Erstellung und Evaluierung vereinfachter Modellversion des Unfall- und Routenwahlmodells auf Basis der vorhandenen Daten und Erkenntnisse
 - Bewertung der Übertragbarkeit der vereinfachten Modelle

1.3 Vorgehen

Die Vorgehensweise und die sich daraus ergebenden Arbeitsschritte sehen sieben inhaltlich aufeinander aufbauende Arbeitsschritte vor. Abbildung 1 zeigt Struktur und Ablauf des Vorgehens. Die Inhalte der Arbeitsschritte werden nachfolgend detailliert beschrieben.

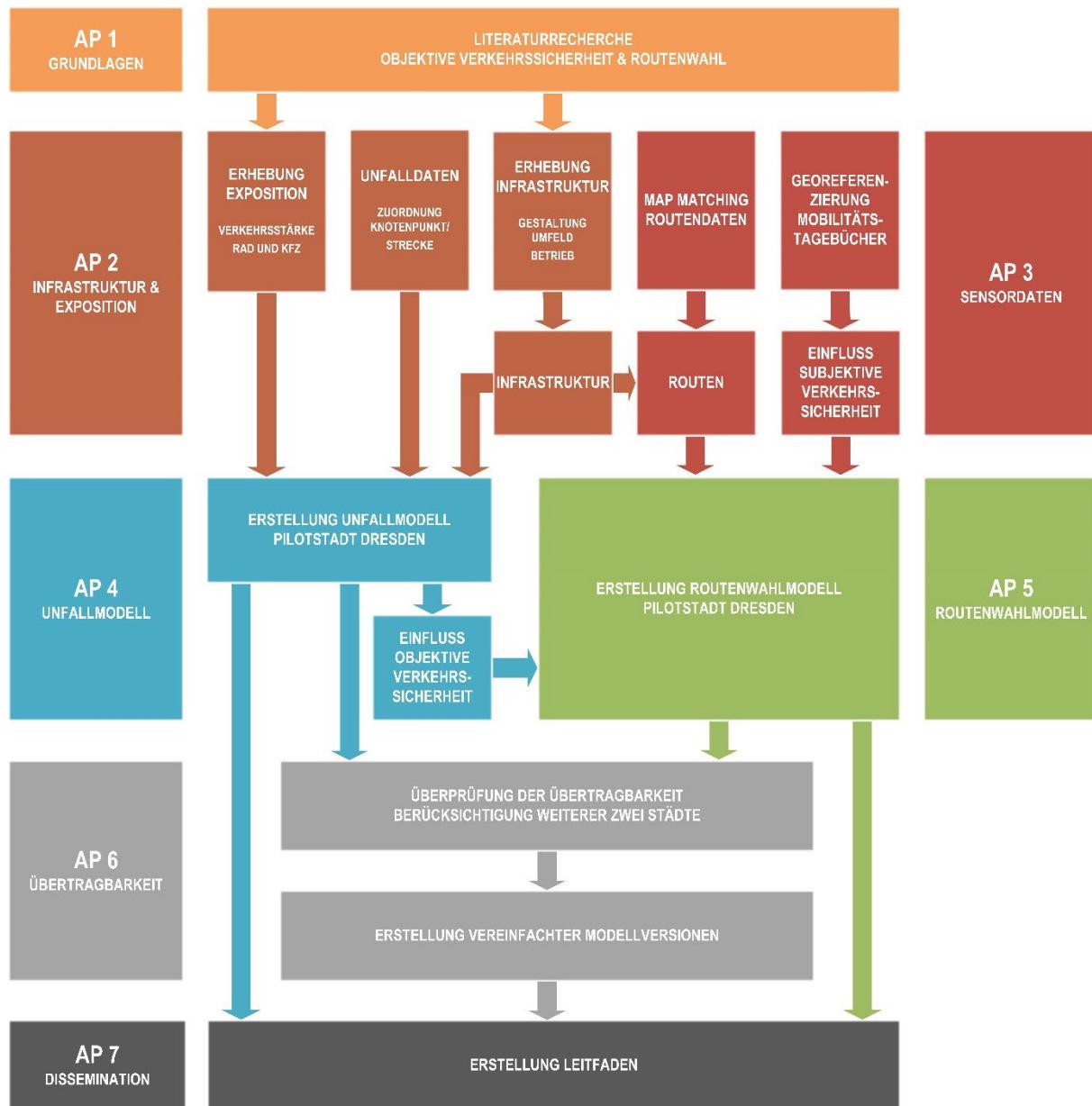


Abbildung 1 Methodik Untersuchungsablauf

AP 1 umfasst die Recherche nationaler und internationaler Literatur zum Thema Verkehrssicherheit und Routenwahl im Radverkehr. Dabei liegt der Fokus vor allem auf der Recherche von potenziellen Einflussfaktoren auf die Modellierung des Unfallgeschehens sowie der Routenwahl.

Die Arbeiten im **AP 2** umfassen die Erhebung und Aufbereitung der Infrastruktur- und Verkehrsdaten, die bei der Erstellung der Modelle berücksichtigt werden sollen. Dies erfolgt für das Hauptverkehrsstraßennetz der Stadt Dresden, ergänzt um die Radverkehrshauptrouten. Dabei werden strecken- und knotenpunktspezifische Merkmale erfasst, deren konkrete Auswahl aufbauend auf die Literaturrecherche in AP 1 erfolgt. Alle Datensätze werden für das Projekt innerhalb eines GIS aufbereitet und harmonisiert.

AP 3 umfasst die Aufbereitung der aus dem Projekt „*RadVerS: Mit Smartphones generierte Verhaltensdaten im Verkehr – Differenzierung des Nutzerverhaltens unterschiedlicher RadfahrerInnengruppen*“ erhobenen Daten. Dabei handelt es sich einerseits um Sensordaten zu etwa 4.000 bis 5.000 Fahrten von ca. 200 Radfahrenden in Dresden, die über die gewählten Routen der Radfahrenden während der Erhebungsphase in 2018 Auskunft geben. Die Routendaten werden mit dem genutzten Netzmodell, welches die in AP 2 erhobenen und aufbereiteten Daten enthält, verknüpft (Map Matching). Andererseits liegen aus den im Projekt RadVerS begleitenden Befragungen (318 Mobilitätstagebücher) vor. Sie lassen unter anderem Rückschlüsse auf die subjektive Sicherheit an konkreten Örtlichkeiten zu (z. B. wenn Proband*innen kritische Situationen oder andere sicherheitsrelevante Vorkommnisse auf ihren gefahrenen Routen gemeldet haben). Mittels Georeferenzierung dieser Daten könnten Abschnitte, auf denen die Radfahrenden ein geringes subjektives Sicherheitsempfinden haben, identifiziert werden.

Die Erstellung des Unfallmodells (**AP 4**) erfolgt auf Basis Generalisierter Linearer Modelle (GLM), wobei grundsätzlich zwischen Abschnitten der freien Strecke und Knotenpunkte unterschieden wird. Dabei werden bei der Modellerstellung neben der Verkehrsstärke des Kraftfahrzeug- und Radverkehrs die in AP 2 erhobenen Infrastrukturdaten berücksichtigt. Bei ausreichend großen Unfallkollektivgrößen können Teilmodelle für unterschiedliche Unfallkonstellationen erstellt werden.

Im **AP 5** wird die Wirkung der unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Routenwahl der Radfahrenden abgeschätzt. Um valide Aussagen hinsichtlich der Einflüsse auf die Routenwahl ableiten zu können, sollen möglichst alle im AP 1 identifizierten relevanten Einflussfaktoren in die Analyse einfließen. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Integration von Daten zum Unfallgeschehen bzw. zur Sicherheit. Diese basieren zum einen auf Daten zur subjektiven Sicherheit, die im AP 3 ausgewertet werden. Zum anderen werden die Unfalldaten zur objektiven Sicherheit, die auch für die Erstellung des Unfallmodells genutzt werden, in die Analysen einfließen. Die Integration dieser Daten soll es erlauben, den Einfluss der subjektiven und objektiven Sicherheit auf die Routenwahl statistisch abzuschätzen. Diese Analyse wird mit einem multivariaten statistischen Schätzverfahren umgesetzt, das dem Stand in Wissenschaft und Praxis entspricht.

AP 6 beinhaltet die Überprüfung einer vereinfachten Modellversion anhand der Städte München und Darmstadt und deren aggregierten Sachdatensätzen aus dem Projekt MOVEBIS. Ziel des AP ist die Evaluierung der Übertragbarkeit und Identifikation unabdingbarer Parameter für die Modellbildung. Die Überprüfung soll vorrangig auf Daten basieren, die den Kommunen bereits vorliegen oder die öffentlich zugänglich sind, um die Übertragbarkeit auf andere Kommunen zu gewährleisten. Dabei wird sowohl das Unfallmodell als auch das Routenwahlmodell auf Vereinfachungen geprüft, sodass auf möglichst wenige, jedoch maßgebende Einflussfaktoren reduzierte Modellversionen entstehen, welche auf möglichst viele Kommunen übertragbar sind.

Im Rahmen des **AP 7** entsteht ein praxistauglicher Leitfaden, der sich an die Anwender*innen aus deutschen Städten und Kommunen richtet. Da es unterschiedliche Gruppen potentieller Anwender*innen geben kann (z. B. Verkehrsplaner*innen und Straßenverkehrstechniker*innen, Ingenieurbüros, Verkehrsunternehmen oder auch NGOs), soll der Leitfaden zwei verschiedene Teile mit unterschiedlicher Ausrichtung und Tiefe enthalten. In dem ersten Teil sollen die wesentlichen Erkenntnisse des Forschungsprojekts zusammengefasst und Empfehlungen für die Planung einer möglichst sicheren und als sicher empfundenen Infrastruktur gegeben werden. Darüber hinaus soll ein zweiter Teil im Leitfaden verfasst werden, der die Nutzung der im Projekt entwickelten Modelle erlaubt. Zusätzlich zum Leitfaden wurde ein Seminar im Rahmen des Mobilitätsforum BUND angeboten, an dem die oben genannten Anwender*innen teilnehmen konnten.

2 KENNTNISSTAND

2.1 Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit Radfahrender

Im urbanen Kontext wirkt eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit Radfahrender. Nationale und internationale Untersuchungen geben Aufschluss über Umwelteinflüsse (Wetter, Licht) (z.B. Aurich et al. (2012), Eluru et al. (2008), Kim et al. (2007)) und soziodemographische Einflüsse (Geschlecht, Einkommen) (z. B. Geus et al. (2012), Eluru et al. (2008), Kim et al. (2007)) auf das Unfallgeschehen. Diese Variablen haben teilweise großen Einfluss auf das Unfallgeschehen, bieten jedoch nur Erklärungen für dieses und keine Handlungsoptionen für Kommunen. Nachfolgend werden für den Entwurf und Betrieb von Straßen bedeutende Einflussfaktoren erläutert.

Dafür zeigt Tabelle 1 eine Übersicht über die verwendeten Referenzen. Dabei wurden nur Untersuchungen betrachtet, die explizit Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung, bzw. verunfallte Radfahrende analysieren. Untersuchungen, die Verkehrsverhalten (z. B. Überholabstände) oder Surrogate Safety Measures (SSM) als Ersatzmaße der Verkehrssicherheit betrachten, werden nicht betrachtet.

Hinsichtlich der Auswertemethodik ist auffällig, dass im nationalen Raum vorwiegend deskriptive Untersuchungen vorliegen, also Unfalldichten (UD) bzw. Unfallraten (UR) ermittelt wurden. Da für diese Untersuchungen kein Signifikanzniveau ermittelt wurde, weisen diese keine Informationen zu signifikanten Einflussgrößen auf.

Werden die Untersuchungen auf Basis von Regressionsmodellen analysiert, sind die häufigsten Modellformen Generalized Linear Models (GLM; basierend auf der Poisson- und/oder Negativ-Binomial-Verteilung), die Empirische Bayes Methode (EBM; basierend auf der Poisson- und/oder Negativ-Binomial-Verteilung) und Logit-Modelle. Während Logit-Modelle vorrangig zur Bewertung der Unfallschwere oder im Rahmen von Cross-Over-Studien (Unfallstelle vs. unfallfreie Stelle) mit kategorisierten abhängigen Variablen verwendet werden, werden GLM und EBM zur Prognose von Unfallzahlen verwendet.

Zur Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes gibt es grundsätzlich zwei Vorgehensweisen: einige Untersuchungen beziehen sich auf (berichtete) Unfälle im festgelegten Untersuchungsgebiet (z. B. einer Stadt) und ordnen den Unfällen Infrastruktureigenschaften des Unfallortes zu. Andere Untersuchungen wählen zuerst Infrastrukturelemente (Knoten und/oder Strecken) eines oder mehrerer Untersuchungsgebiete aus und betrachten anschließend die Unfälle, die auf diesen Elementen auftreten.

Wird in den Modelluntersuchungen der Einfluss der Exposition (Verkehrsstärken) untersucht, werden diese in der Regel signifikant. Dabei wird teilweise nur die Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs oder des Radverkehrs betrachtet. Insbesondere an Knotenpunkten gibt es Unterscheidungen hinsichtlich Gesamtbelastungen und stromfeinen Betrachtungen der Verkehrsstärken (siehe auch Abschnitt 2.1.1).

In der Tabelle werden die signifikanten Einflussgrößen und deren Wirkrichtung auf die Unfallanzahl (-)/(+) zunächst überblicksartig dargestellt. Die signifikanten Einflussgrößen von Infrastruktur und Betrieb werden anschließend in den Abschnitten 2.1.2 bis 2.1.6 ausführlich erläutert.

Tabelle 1 Rahmendaten der relevanten Studien zur Verkehrssicherheit Radfahrender

Studie	Untersuchungsraum	Zielgröße	Auswertemethodik	Untersuchungsgegenstand	Exposition (Verkehrsstärke)	Signifikante Einflussgrößen
Allen-Munley et al. (2004)	Jersey, USA	Unfälle Rf-Bet.	Logit-Modell	314 Unfälle	Kfz [Kfz/24h] (Fahrstreifenfein)	Steigung/Gefälle (-), Einbahnstraße (-), Fahrstreifenbreite (-)
Alrutz et al. (2009)	Deutschland (verschiedene Städte)	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichten, Unfallraten	87 Strecken (ca. 111 km)	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]	-
Alrutz et al. (2015)	Deutschland (verschiedene Städte)	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichten, Unfallraten (Strecken und Knotenpunkte), GLM (Generalized linear model) nur für Strecken	165 Strecken (ca. 90 km), 218 Knotenpunkte	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]	Radverkehrsstärke (+), Radverkehrsführungsform (+), Umfeldnutzung (+), Anschlussknotenpunkte (+)
Aultman-Hall und Hall (1998)	Ottawa-Carleton, Kanada	berichtete Unfälle (Befragung)	deskriptiv: Unfallraten	Straßennetz Ottawa-Carleton, 1.604 Befragte	Verkehrsleistung der Befragten [km]	-
Aultman-Hall und Kaltenecker (1999)	Toronto, Kanada	berichtete Unfälle (Befragung)	deskriptiv: Unfallraten	Straßennetz Toronto, 1.196 Teilnehmende	Verkehrsleistung der Befragten [km]	-
Aurich et al. (2012)	Berlin, Deutschland	Unfälle u.a. Rf-Bet.	GLM (Generalized linear model)	Straßennetz Berlin, 2.968 Strecken (ca. 1.025 km), 4.658 Knotenpunkte	Kfz [Kfz/24h]	Kfz-Verkehrsstärke (+), Umfeldnutzung (+), Mittelstreifen (-), ruhender Verkehr (+), Radverkehrsanlage Strecke (+), Radverkehrsführung Knotenpunkt nicht abgesetzt (-), separate Phase Linksabbiegende an LSA (-), Abbiegeverbote an Knotenpunkten (-)
Aurich (2013)	Dresden, Deutschland	Unfälle u.a. Rf-Bet.	GLM (Generalized linear model)	Straßennetz Dresden, 666 Strecken (282 km), 206 Verkehrsknotenpunkte, 1.214 Anschlussknotenpunkte	Kfz [Kfz/24h]	Kfz-Verkehrsstärke (+), straßenbündiger Bahnkörper (+), soziodemografischer Faktor (Alter, Kfz-Bestand) (+), Wirtschaftsfaktor (Verkaufsfläche, Arbeitsplätze) (+)
Baier (2018)	Münster, Deutschland	Unfälle Rf-Bet.	Deskriptiv: Maßnahmenwirkung	63 Unfallhäufungsstellen	keine	
Berger et al. (2020)	Deutschland (verschiedene Städte)	Unfälle u.a. Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichten, Unfallraten	9.031 Haltestellen	Kfz [Kfz/24h]	-
Buch und Jensen (2017)	Kopenhagen, Dänemark	Abbiegeunfälle Rf-Bet.	Vorher-Nachher-Studie	189 Knotenpunktarme	Kfz [Kfz/24h]	Vorgezogene Haltelinie (+)
Brüde und Larsson (1993)	Schweden	Unfälle u.a. Rf-Bet.	GLM (Generalized linear model)	285 Knotenpunkte (vorfahrtzeichengeregelt, lichtsignalgeregelt, Kreisverkehre)	Kfz [Kfz/24h], Rf [Rf/24h], Fg [Fg/24h]	Kfz-Verkehrsstärke (+), Rad-Verkehrsstärke (+), Fg-Verkehrsstärke (+)
Chen und Shen (2016)	Seattle, USA	Unfälle Rf-Bet.	GOL (Generalized ordered logit model), GAM (Generalized additive model)	Straßennetz Seattle	keine	zulässige Höchstgeschwindigkeit (+), Radfahrende hatten reflektierende Kleidung (-), linksabbiegendes Kfz war beteiligt (+), Umfeldnutzung (-), Beschäftigungsdichte (-)
Collins und Graham (2019)	London, Vereinigtes Königreich	Unfälle Rf-Bet.	lineare Regression	unfallauffällige Gebiete	keine	Größe des Gebietes (+), Straßenklasse (+), Dichte Knotenpunkte (+), Anzahl Fahrstreifen (+), Länge Einbahnstraßen (-), Länge Radverkehrsnetz (+), Länge Busfahrstreifen (+), kein ruhender Verkehr (-), zulässige Geschwindigkeit (+)

Studie	Untersuchungsraum	Zielgröße	Auswertemethodik	Untersuchungsgegenstand	Exposition (Verkehrsstärke)	Signifikante Einflussgrößen
Eluru et al. (2008)	USA	Unfallschwere	MGORL (Generalized ordered response logit model)	2.944 Unfälle Rf und Fg-Beteiligung	keine	Alter > 60 J. (+), Geschlecht männlich (+), Alkohol (+), Eigenschaften Kfz SUV (+), zulässige Höchstgeschwindigkeit (+), Knotenpunkt LSA (-), Tageszeit Abend/Nacht (+), Unfallcharakteristik Frontalkollision (+)
Geus et al. (2012)	Belgien	berichtete Unfälle (Befragung)	deskriptiv: Anzahl, Raten	1.087 Befragte	Verkehrsleistung der Befragten [km]	-
Harris et al. (2013)	Toronto und Vancouver, Kanada	berichtete Unfälle (Krankhausbefragung)	Cross-Over-Studie, Logit-Modell	2.335 Befragte, Streckenabschnitte (478 berichtete, 801 Kontrollkollektiv), Knotenpunkte (210 berichtete, 272 Kontrollkollektiv)	-	Straßenklasse geringer (-), Verkehrsregelungsart Knotenpunkt LSA (-), zulässige Höchstgeschwindigkeit bis 30 km/h (-), Fahrtrichtung Rf frontal (+), Längsneigung Gefälle (+), Radverkehrsstärke (+)
Hu et al. (2018)	Houston, USA	Unfallschwere	GCLQ (Global Colocation Quotient), LCLQ- (Local Colocation Quotient)	2.389b Unfälle Rf-Kfz	keine	Verkehrsregelungsart Knotenpunkt LSA (+)
Jensen (2008)	Kopenhagen, Dänemark	Unfälle	Vorher-Nachher-Studie	65 Knotenpunkte (signalisiert)	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]	-
Kim et al. (2007)	North Carolina, USA	Unfallschwere (nur Unfälle Rf-Kfz)	Logit-Modell	2934 Unfälle	keine	Alter > 55 J. (+), Alkohol (+) (sowohl Radfahrende als auch Kfz-Fahrende), Helmnutzung (+), geschätzte Geschwindigkeit (+), Pickup/ Lastzug (+), Fahrtrichtung Radfahrende entgegen Kfz-Verkehr (-), abbiegendes oder einfädelndes Kfz (+), Frontalkollision [-], Hauptverursachender: Kfz (+), Hauptverursachender: Rad (+), Geschwindigkeitsübertretung (+), Radius (+), bauliche Mitteltrennung (+), Umfeldnutzung (+), Wochenende (+), Spitzstunde (morgens) (+), Niederschlag (+), Dunkelheit ohne Beleuchtung (+)
Kim et al. (2012)	Incheon, Korea	Unfälle Rf-Bet.	GLM (Generalized linear model)	112 Knotenpunkte (signalisiert, vierarmig)	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]	Breite Gehweg (-), Fahrbahnteiler (+)
Kolrep-Rometsch et al. (2013)	Deutschland (verschiedene Städte)	Abbiegeunfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichten, Unfallraten, Unfallquoten	271 Knotenpunktarme (signalisiert, vorfahrtszeichengeregt)	Kfz (stromfein) [Kfz/24h] Rad (stromfein) [Rf/24h]	
Ling et al. (2020)	Toronto, Kanada	Unfälle Rf-Kfz	Poisson Regression	6 Strecken	Rad [Rf/24h]	Radweg (-)
Lusk et al. (2011)	Montreal, Kanada	Unfälle Rf-Kfz	deskriptiv: Mit-ohne-Studie (Relative Risk)	Strecken (6 Radweg, 6 Vergleichsstrecken)	Rad [Rf/24h]	-
Nordback et al.	Boulder, USA	Unfälle Rf-Kfz	GLM (Poisson/NegBin)	211 Knotenpunkte (signalisiert)	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]	Kfz-Verkehrsstärke (+), Rad-Verkehrsstärke (+)
Ohm et al. (2015)	Deutschland (verschiedene Städte)	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichten	Strecken (267 km)	keine	-
Richter et al. (2019)	Deutschland (verschiedene Städte)	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichten, Unfallraten	143 Strecken (106 km)	Rad [Rf/24h]	-
Schepers et al. (2011)	Niederlande	Unfälle Rf-Kfz	GLM (Generalized linear model)	540 Knotenpunkte	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]	Kfz-Verkehrsstärke (+), Rad-Verkehrsstärke (+), Zweirichtungsradweg (+), Radweg mit Absetzung 2-5 m (-), Roteinfärbung Furt (+), geschwindigkeitsreduzierende Maßnahmen (-)

Studie	Untersuchungsraum	Zielgröße	Auswertemethodik	Untersuchungsgegenstand	Exposition (Verkehrsstärke)	Signifikante Einflussgrößen
Schober (2018)	Wien, Österreich	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichten, Unfallraten	61 Strecken (ca. 60.000 km)	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h]	-
Schüller et al. (2019)	Deutschland (verschiedene Städte)	Unfälle Rf-Bet.	deskriptiv: Unfalldichten, Unfallraten GLM (Generalized linear model)	149 Strecken (74 km)	Kfz [Kfz/24h], Rad [Rf/24h], Fg [Fg/24h]	Kfz-Verkehrsstärke (+), Rad-Verkehrsstärke (+), zu Fuß Gehende (+), Dichte untergeordnete Knotenpunktarme (+), Fahrstreifenbreite (-), Straßenbahn im Mischverkehr (+), zulässige Höchstgeschwindigkeit 30 km/h (-)
Strauss et al. (2013)	Montreal, Kanada	Verunfallte (Rf)	EBM (Empirical Bayes method)	647 Knotenpunkte (signalisiert)	Kfz [Kfz/24h] (stromfein), Rad [Rf/24h]	Radverkehrsinfrastruktur 800 m um den Knotenpunkt (+), 3 Knotenpunktzufahrten (-) Bushaltestellen (+), Länge Furt (+), Fahrbahnteiler vorhanden (-), Umfeldnutzung (+)
Strauss et al. (2015)	Montreal, Kanada	Verunfallte (Rf)	EBM (Empirical Bayes method)	Strecken und Knotenpunkte (signalisiert und unsignalisiert)	Kfz [Kfz/24h] (stromfein), Rad [Rf/24h]	3 Knotenpunktzufahrten (-) an signalisierten und unsignalisierten Knotenpunkten, Bushaltestellen (+) an signalisierten Knotenpunkten, Straßenklasse (+), Umfeldnutzung (+)
Teschke et al. (2012)	Toronto und Vancouver, Kanada	berichtete Unfälle (Befragung)	Logit-Modell Cross-Over-Studie	690 Befragte	Verkehrsleistung der Befragten [km]	ruhender Verkehr (+), Schutzstreifen (-), Radfahrstreifen (-), Steigung/Gefälle (+), Gleise (+)
Turner et al. (2006)	Christchurch, Hamilton und Palmerston North City, Neuseeland	Unfälle Rf-Bet.	GLM (Generalized linear model)	446 signalisierte Kreuzungszufahrten, 186 Kreisverkehrszufahrten, 62 Querungsanlagen, 96 signalisierte Einmündungszufahrten	Kfz (stromfein) [Kfz/24h] Rad (stromfein) [Rf/24h] Fg (stromfein) [Fg/24h]	Unfälle an signalisierten Kreuzungen: Unfälle Kfz vs. Rad parallel (in Abh. Verkehrsstärken Kfz und Rad parallel) + Unfälle, rechtsabbiegende Kfz vs. entgegenkommende Rad (in Abh. Verkehrsstärken linkabbiegende Kfz und entgegenkommende Rad), Unfälle an Kreisverkehren: Unfälle einfahrende Kfz vs. Rad auf der Kreisfahrbahn (in Abh. der Verkehrsstärken einfahrende Kfz vs. Rad auf der Kreisfahrbahn), Unfälle an Querungsanlagen: Unfälle Kfz vs. Rad (in Abh. der Kfz und Radverkehrsstärke)
Vandenbulcke et al. (2014)	Brüssel, Belgien	Unfälle Rf-Bet.	Logit-Modell	Straßennetz Brüssel, Strecken	Kfz (in Belastungsklassen 1-5 für die Spaltenstunde)	Kfz-Verkehrsstärke (in Belastungsklassen) (+), Radverkehrsführung und Knotenpunkttyp (Kombinationen) (+), Straßenbahn (+), keine Garagen/private Stellplätze im Umkreis von 100 m (-), Distanz zu Verwaltungsbauten (+), Distanz zu Einkaufszentren (+), ruhender Verkehr (+)

2.1.1 Exposition

Die Verkehrsstärke sowohl der Radfahrenden als auch möglicher Beteiligter (MIV, Zufußgehende) hat einen großen Einfluss auf die Verkehrssicherheit. Dabei sind unterschiedliche Effekte zu beobachten: In den meisten Untersuchungen bildet die Radverkehrsstärke die Exposition für Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung. Je mehr Radfahrende auf der Infrastruktur fahren, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung auftreten – gleichzeitig kann kein Unfall mit Radverkehrsbeteiligung auftreten, wenn die Infrastruktur nicht durch Radfahrende genutzt wird. Mit steigenden Verkehrsstärken nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmender wirkt zusätzlich der „Safety-in-numbers“-Effekt. Dieser Effekt erklärt das Phänomen, dass die Anzahl der Unfälle (mit Radverkehrsbeteiligung) weniger stark ansteigt als die Radverkehrsstärke (Tasic et al. 2017; Elvik und Bjørnskau 2017; Elvik und Goel 2019). Dabei zeigen Elvik und Goel (2019), dass der „Safety-in-numbers“-Effekt bei Radfahrenden weniger stark wirkt als bei Zufußgehenden und auf makroskopischer Ebene (z. B. kommunale Ebene) stärker wirkt als auf mikroskopischer Ebene (z.B. an einzelnen Knotenpunkten).

Streckenabschnitte

In den meisten Untersuchungen wurde der Verkehrsstärke des motorisierten Verkehrs ein Einfluss als Exposition potenzieller Beteiligter bei Unfällen mit Radfahrenden nachgewiesen. Der Einfluss der Verkehrsstärke des motorisierten Verkehrs wurde in einer Vielzahl an Untersuchungen nachgewiesen, wobei sich hohe Verkehrsstärken als unfallbegünstigend erwiesen (Aurich et al. 2012). Teilweise konnte je nach Untersuchungsgegenstand und gewählter Methodik auch kein systematischer Zusammenhang zwischen Unfällen mit Radverkehrsbeteiligung und Kfz-Verkehrsstärke festgestellt werden (Alrutz et al. 2009; Ohm et al. 2015).

Alrutz et al. 2015 erstellen ein (Radverkehrs-) Unfallmodell für Streckenabschnitte, betrachten allerdings nur die Radverkehrsstärke als Exposition. Dieser konnte ein positiv degressiver Einfluss (Koeffizient = 0,525) auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden (was die These des „Safety-in-numbers“-Effekt stützt). Schüller et al. (2019) entwickeln ein Unfallmodell, in dem die Verkehrsstärke des motorisierten Verkehrs (Faktor 0,478) und von Radfahrenden (0,748) gleichzeitig wirken.

Neben den Verkehrsstärken des motorisierten Verkehrs und des Radverkehrs hat das Aufkommen des Fußverkehrs einen maßgebenden Einfluss auf das Unfallgeschehen (insbesondere zwischen Zufußgehenden und Radfahrenden). Flächendeckende Zählungen von Zufußgehenden liegen im Regelfall nicht vor. Um den Einfluss des Fußverkehrsaufkommens dennoch in der Unfallbetrachtung abilden zu können, wird statt der Verkehrsstärke u. a. in Aurich et al. (2012) ein Ersatzmaß in die Betrachtungen einbezogen. Dieses Ersatzmaß wird in Aurich et al. (2012) und Aurich (2013) als Umfeldfaktor bezeichnet, der sich aus den gewichteten Längenanteilen der Nutzungen der an die betrachteten Straßen angrenzenden Flächen ergibt, wobei die Nutzung in die Kategorien Wohnen, Wohnen mit Einzelhandel, Einzelhandel und Gewerbe differenziert wird. Zusätzlich werden durch Aurich (2013) eine soziodemografische (Alter und Kfz-Bestand) und wirtschaftsbezogene (Verkehrsfläche, Arbeitsplätze) Umfeldkomponente zur Modellierung des Unfallgeschehens verwendet.

Knotenpunkte

Alrutz et al. (2015) konnten keinen Einfluss der Radverkehrsstärke auf das Radverkehrsunfallgeschehen an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten nachweisen. Nach Harris et al. (2013) zeigt sich auch kein eindeutiger Einfluss der Radverkehrsstärke auf das Verletzungsrisiko an Knotenpunkten (mit und ohne LSA). Brüde und Larsson (1993) weisen der Kfz-Verkehrsstärke einen positiv degressiven Einfluss auf das Unfallgeschehen nach. Der Radverkehrsstärke wird hingegen ein negativ degressiver Einfluss auf das Unfallgeschehen nachgewiesen. Das heißt, je mehr Radfahrende, umso weniger Unfälle. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Untersuchung keine Differenzierung nach der Verkehrsregelungsart und weiteren infrastrukturellen Merkmalen erfolgte. Das Kollektiv umfasst somit vorfahrtzeichen- und lichtsignalgeregelte Knotenpunkte sowie Kreisverkehre.

Turner et al. (2006) konnten hingegen sowohl der Kfz- als auch der Radverkehrsstärke einen signifikanten Einfluss auf das Unfallgeschehen zwischen Kfz und Radfahrenden nachweisen. Dabei ist hervorzuheben, dass Modelle

(GLM) für einzelne Unfallkonstellationen erstellt wurden, wobei jeweils die Verkehrsstärke der konfigierenden Ströme einging. Im Ergebnis wurden Modelle u. a. für signalisierte Kreuzungen (Unfälle zwischen parallel fahrenden Kfz und Radfahrenden, Unfälle zwischen rechtsabbiegenden Kfz und entgegenkommenden Radfahrenden) und Unfälle an Kreisverkehren (bspw. Unfälle zwischen einfahrenden Kfz und Radfahrenden auf der Kreisfahrbahn) erstellt. Dabei wurden je Unfallkonstellation etwa doppelt so hohe Koeffizienten für die Kfz-Verkehrsstärke im Vergleich zur Radverkehrsstärke ermittelt, auch wenn in allen Fällen ein positiv degressiver Einfluss ($0 < \text{Koeffizient} < 1$) vorlag. Auch Nordback et al. (2014) finden an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten einen positiv degressiven Zusammenhang zwischen Kfz- (Koeffizient: 0,58-0,64) und Radverkehrsstärke (Koeffizient: 0,53-0,65).

Schepers et al. (2011) ermitteln an nicht signalisierten Knotenpunkten einen signifikanten Einfluss von Rad- (Koeffizient: 0,48) und Kfz-Verkehrsstärken (Koeffizient: 0,73). Dabei ist (wenngleich beiden Größen ein positiv degressiver Einfluss nachgewiesen wurde) der Einfluss der Kfz-Verkehrsstärke näher an einem proportionalen Einfluss.

Kim et al. (2012) zeigen an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten sowohl für die Rad- als auch Kfz-Verkehrsstärke einen positiven Einfluss auf das Unfallgeschehen, wobei der Einfluss der Kfz-Verkehrsstärke größer ist.

Strauss et al. (2013) finden an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten einen fast proportionalen Einfluss (Koeffizient nahe 1) der Radverkehrsstärke auf das Radunfallgeschehen. Weiterhin besitzen die Verkehrsstärken der rechts- und linkabbiegenden Kfz einen signifikanten Einfluss auf das Radverkehrsunfallgeschehen. Strauss et al. (2015) finden für lichtsignalgeregelte und nicht lichtsignalgeregelte Knotenpunkte einen signifikanten Einfluss der Radverkehrsstärke auf das Unfallgeschehen.

2.1.2 Geschwindigkeit

Streckenabschnitte

Hohe Geschwindigkeiten des motorisierten Verkehrs führen generell zu einer höheren Unfallschwere, es wird jedoch auch ein Zusammenhang mit der Unfallanzahl festgestellt (Taylor et al. 2000). Dabei beziehen sich einige Untersuchungen auf den Zusammenhang tatsächlich gefahrener Geschwindigkeiten mit dem Radverkehrsunfallgeschehen (z. B. Harris et al. 2013; Kim et al. 2007). In der Regel werden Geschwindigkeiten in den Untersuchungen durch zulässige Höchstgeschwindigkeiten abgebildet, da für diese eine höhere Datenverfügbarkeit vorliegt (z.B. Chen und Shen 2016; Collins und Graham 2019; Eluru et al. 2008; Schüller et al. 2019). Eluru et al. (2008) und Chen und Shen (2016) zeigen eine höhere Unfallschwere für Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung bei höheren Geschwindigkeiten des motorisierten Verkehrs. Kim et al. (2007), Harris et al. (2013) und Collins und Graham (2019) stellen für Strecken mit geringeren Geschwindigkeiten deutlich geringere Unfalldichten fest. Dabei zeigen insbesondere Geschwindigkeiten bis 30 km/h Sicherheitsvorteile für Radfahrende. Auch Schober (2018) findet für Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung in Wien höhere mittlere Unfallraten an Strecken mit zulässigen Geschwindigkeiten von 50 km/h, als an Strecken mit 30 km/h. Durch Schüller et al. (2019) konnte ebenfalls ein unfallreduzierender Einfluss bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h nachgewiesen werden.

Knotenpunkte

An Knotenpunkten verringert eine zulässige Höchstgeschwindigkeit bis zu 30 km/h im Vergleich zu zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von über 30 km/h das Verletzungsrisiko (Eluru et al. (2008); Harris et al. 2013). An unvollständig signalisierten Knotenpunkten wirkt sich eine zulässige Geschwindigkeit von unter 50 km/h reduzierend auf die Unfallanzahl aus (Aurich et al. 2012).

2.1.3 Radverkehrsführung

Streckenabschnitte

Zur Verkehrssicherheit von Radverkehrsanlagen liegen auf nationaler Ebene insbesondere Betrachtungen zu einzelnen Führungsformen oder univariante Vergleiche verschiedener Radverkehrsführungen vor. Aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungsansätze und notwendiger Verallgemeinerungen liegen derzeit widersprüchliche Aussagen zur Verkehrssicherheit der Radverkehrsanlagen vor. Eine Übersicht der Erkenntnisse zu Unfalldichten (UD) und Unfallraten (UR) im deutschsprachigen Raum befindet sich in Tabelle 2.

Tabelle 2 Unfallkennwerte differenziert nach Radverkehrsführungsform (innerorts, nur Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung)

	Untersuchung	Kollektiv	MV	SSF	RFS	RoB	RmB
UD (U/km^a)	Alrutz et al. (2009)	U(P,SS)	-	1,7	2	3,8	4,4
	Ohm et al. (2015)	U(P)	0,6-3,1 ¹	0,9-1,8 ¹	-	-	-
	Schober (2018) (A)	U(P)	1,6-2,5 ²	3,5	1,8	-	4,6
	Richter et al. (2019)	U(P)	-	2,2	1,5	-	-
	Schüller et al. (2019)	U(P)	1,0-4,0 ^{1,2}	-	-	-	-
UR ($U/10^6 Rf^km$)	Alrutz et al. (2009)	U(P,SS)	-	3	5	6	6
	Alrutz et al. (2015)	U(P)	8,3	8,6	7,9	9,9	9,6
	Schober (2018) (A)	U(P)	12,2-14,6 ²	13,8	15,8	-	8,0
	Richter et al. (2019)	U(P)	-	3,0	6,4	6,1	-
	Schüller et al. (2019)	U(P)	8,0-12,0 ^{1,2}	-	-	-	-

¹ Abhängig von der Anzahl der Fahrstreifen und Fahrbahnbreite

² Abhängig von der zulässigen Geschwindigkeit

MV: Mischverkehr, SSF: Mischverkehr - Schutzstreifen, RFS: Radfahrstreifen, RoB: Radweg ohne Benutzungspflicht, RmB: Radweg mit Benutzungspflicht

Alrutz et al. 2009 finden an Straßen mit Radwegen (mit und ohne Benutzungspflicht) etwa doppelt so hohe UD wie an Anlagen mit Schutz- oder Radfahrstreifen. Unter Berücksichtigung der Unfallschwere (mittels Unfallkosten) zeigen Radwege mit Benutzungspflicht hohe, Radwege ohne Benutzungspflicht und Radfahrstreifen moderate und Schutzstreifen niedrige UD. Um den Einfluss der Verkehrsstärke auf das Unfallgeschehen abzubilden, berechnen sie UR bezogen auf die Verkehrsstärke des Radverkehrs und des motorisierten Verkehrs. Dabei weisen die UR eine hohe Streuung auf. Strecken mit Radwegen zeigen höhere UR als Strecken mit Radfahrstreifen oder Schutzstreifen. Eine neuere Untersuchung von Alrutz et al. 2015 zeigt einen geringen Einfluss der Radverkehrsführungsform auf die UR. Radverkehrsführungen auf der Fahrbahn zeigen geringfügige Sicherheitsvorteile gegenüber Radwegen (mit und ohne Benutzungspflicht).

In Ohm et al. 2015 zeigt der Vergleich von Fahrbahnführungen (im Mischverkehr) mit und ohne Schutzstreifen höhere UD und UKD für zweistufige Strecken mit Schutzstreifen. Für vierstufige Querschnitte haben Strecken ohne Schutzstreifen höhere Unfallkennwerte. Die Betrachtung der Unfallschwere von Unfällen mit Personenschäden zeigt eine geringere Unfallschwere für Strecken mit Schutzstreifen (bei geringer Fallzahl).

Schober (2018) untersucht Strecken in Wien, weshalb Einflüsse auf die Kennwerte durch Unterschiede in Entwurfsvorgaben und Benutzungspflicht möglich sind. Einen klaren Sicherheitsunterschied zwischen einer Führung im Seitenraum und auf der Fahrbahn ist in der Untersuchung nicht erkennbar, wobei insb. die Ergebnisse zu Radwegen kritisch zu hinterfragen sind, da Zweirichtungs- und Einrichtungsradwege nicht differenziert betrachtet wurden. Richter et al. (2019) geben hinsichtlich von Fahrbahnführungen keinen klaren Aufschluss, ob Radverkehrsanlagen (Radfahrstreifen) gegenüber Schutzstreifen Sicherheitsvorteile bewirken. Sie untersuchen zusätzlich ein kleines Kollektiv von Protected Bike Lanes und finden für diese höhere UD (4,9 U/km^a) und UR (9,3 U/10⁶*Rf*km), welche aufgrund der geringen Fallzahl jedoch nicht interpretiert werden.

Richter et al. (2019) bewerten auch die Breiten der Radverkehrsführungen, wobei für Radfahrstreifen ein geringer Einfluss der Breite festgestellt wird, breitere Anlagen aber tendenziell geringere UD und UR aufweisen. Für Schutzstreifen weisen schmalere Anlagen geringere UD und höhere UR auf. Für Mischverkehrsführungen finden

Allen-Munley et al. (2004) und Schüller et al. (2019) einen positiven Zusammenhang zwischen Fahrstreifenbreite und Unfallschwere, bzw. -anzahl mit Radverkehrsbeteiligung.

Multikriterielle Ansätze zur Sicherheitsbewertung von Radverkehrsführungsformen liegen auf nationaler Ebene kaum vor. Alrutz et al. (2015) führen zusätzlich eine Bewertung der Sicherheit über Verallgemeinerte lineare Modelle durch. In der Modellrechnung zeigen Radwege ohne Benutzungspflicht und gemeinsame Geh- und Radwege ein vergleichsweise hohes Sicherheitsniveau, während Schutzstreifen und benutzungspflichtige Radwege zu deutlich höheren Unfallzahlen führen. Weitere Einflüsse auf das Radverkehrsunfallgeschehen bilden die Umfeldnutzung und die Anzahl der Anschlussknotenpunkte.

Aurich et al. (2012) finden bei der Untersuchung von Einflüssen auf die Verkehrssicherheit auf Streckenabschnitten höhere Zahlen von Abbiegeunfällen mit nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmenden bei Führung des Radverkehrs auf Radwegen oder Radfahrstreifen gegenüber der Führung auf Schutzstreifen. Unfälle durch ruhenden Verkehr mit Beteiligung nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmender treten bei Führung auf Radwegen seltener auf. Unfälle im Längsverkehr treten besonders bei Radfahrstreifen auf – Radwege wirken sich hingegen unfallreduzierend hinsichtlich dieser Konstellation aus. Allerdings ist zu anzumerken, dass die Exposition Radverkehrsstärke nicht berücksichtigt wurde.

In internationalen Untersuchungen finden Aultman-Hall und Hall (1998) und Aultman-Hall und Kaltenecker (1999) die höchsten Unfallraten für Radverkehrsführungen im Seitenraum, mittlere Unfallraten für markierte Radverkehrsführungen auf der Fahrbahn und die geringsten Unfallraten für die Führung im Mischverkehr. Allerdings wurde die Kfz-Verkehrsstärke, welche an Straßen mit Radverkehrsanlagen im Vergleich zur Führung im Mischverkehr tendenziell höher ist, bei beiden Untersuchungen nicht berücksichtigt.

Demnach finden Lusk et al. (2011) höhere UR bei Führungen auf der Fahrbahn gegenüber Radwegen. Auch Teschke et al. (2012) finden ein höheres Unfallrisiko an Strecken ohne Radverkehrsinfrastruktur, gegenüber solchen mit Radfahrstreifen. Harris et al. (2013) stützen diese Ergebnisse und ermitteln niedrigere UR, wenn an Strecken separate Radverkehrsanlagen, insbesondere Radwege und getrennte Radfahrstreifen, vorliegen. Zudem finden sie für Schutzstreifen bzw. Markierungen im Mischverkehr (shared lanes/sharrows) erhöhte UR gegenüber. z. B. Radfahrstreifen (nicht signifikant).

Knotenpunkte

Informationen zur Sicherheitswirkung der Radverkehrsführungsform an Knotenpunkten liegen insbesondere in Kombination mit der Verkehrsregelungsart vor, siehe Abschnitt 2.1.6.

2.1.4 Ruhender Verkehr

Streckenabschnitte

Anlagen des ruhenden Verkehrs zeigen in vielen Untersuchungen einen negativen Einfluss auf die Radverkehrssicherheit (Teschke et al. 2012; Richter et al. 2019; Schüller et al. 2019; Aurich et al. 2012; Collins und Graham 2019), wobei kaum Aussagen über die Wirkung verschiedener Radverkehrsinfrastrukturen und Infrastruktur für den ruhenden Verkehr getroffen werden (können).

Ohm et al. (2015) findet bei dem Vorhandsein von ruhendem Verkehr am Fahrbahnrand höhere Unfalldichten über alle Querschnittstypen. Dabei zeigt sich kein eindeutiger Trend hinsichtlich einer Unterscheidung zwischen Längs- und Schrägaufstellung.

2.1.5 Anlagen des ÖPNV

Streckenabschnitte

Anlagen des ÖPNV mit Einfluss auf die Verkehrssicherheit Radfahrender umfassen sowohl Straßenbahngleise (linienhaft), als auch Haltestellen (punktuell). Teschke et al. (2012), Vandenbulcke et al. (2014), Schober (2018), Schüller et al. (2019) und Berger et al. (2020) finden höhere Unfallzahlen an Strecken mit Gleisen, wobei

Vandenbulcke et al. (2014) und Schüller et al. (2019) insbesondere an Strecken mit Straßenbahngleisen im Mischverkehr oder an Stellen, an denen Straßenbahngleise gequert werden müssen, ein höheres Unfallrisiko finden. Berger et al. (2020) finden insbesondere Alleinunfälle Radfahrender an Haltestellen, an denen Radfahrende im Mischverkehr Straßenbahngleise queren müssen (Fahrbahnhaltestellen und Kaphaltestellen).

Berger et al. (2020) finden an Straßenbahnhaltestellen insgesamt höhere Unfallraten für Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung als an Bushaltestellen. In der weiteren Differenzierung des Unfallgeschehens nach Haltestellenform zeigen sich zwar Unterschiede in den Unfallkonstellationen (z. B. von Radfahrenden verursachte Unfälle mit dem MIV an Fahrbahnrandhaltestellen von Straßenbahnen), die jedoch eher auf die Radverkehrsleitung an den Haltestellenformen als auf die Haltestellenform selbst zurückzuführen sind.

Knotenpunkte

Strauss et al. (2013) und Strauss et al. (2015) finden einen positiven Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein von Bushaltestellen an Knotenpunkten und dem Radverkehrsunfallgeschehen.

2.1.6 Knotenpunktsspezifische Merkmale

Verkehrsregelung und Betrieb

Nach Eluru et al. (2008) ist das Risiko eines Unfalls mit Personenschäden an Knotenpunkten mit LSA im Vergleich zur Vorfahrtzeichenregelung geringer, während Hu et al. (2018) an Knotenpunkten mit LSA höhere Risiken für schwere Unfälle feststellen. Diese Ergebnisse werden jedoch nicht unter Einbezug der Exposition getroffen. Strauss et al. (2015) zeigen (unter Einbezug der Exposition), dass Knotenpunkte mit LSA ein mehr als doppelt so hohes Unfallrisiko im Vergleich zu nicht signalisierten Knotenpunkten aufweisen. Zu einem differenzierteren Ergebnis kommen Harris et al. (2013): Demnach ist das Verletzungsrisiko an Knotenpunkten mit Vorfahrtbeschilderung (Stopp) in allen Zufahrten am geringsten. Auf einem ähnlichen Niveau liegen Knotenpunkte mit LSA und eigener Signalisierung für Radfahrende sowie Knotenpunkte mit Stopp-Zeichen in zwei Zufahrten. Die höchste Verletzungswahrscheinlichkeit besteht an Knotenpunkten mit LSA ohne Signalgeber für Radfahrende, an Knotenpunkten ohne jegliche Regelung (in Kanada Rechts vor Links) sowie an Kreisverkehren.

Aurich et al. (2012) untersuchen auch betriebliche Merkmale an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten und finden einen unfallreduzierenden Einfluss auf Abbiegeunfälle mit Radverkehrsbeteiligung durch die gesicherte Führung linksabbiegender Fahrzeugströme sowie das Vorhandensein von Abbiegeverboten. Auch Baier (2018) zeigt in einer Vorher-Nachher-Untersuchung an fünf Unfallhäufungsstellen, dass die gesicherte Führung linksabbiegender Fahrzeugströme eine Maßnahmenwirkung gegenüber Abbiegeunfällen von 100 % aufweist.

Kolrep-Rometsch et al. (2013) untersuchen (für Rechtsabbiegeunfälle) unfallauffällige Knotenpunkte und finden an diesen häufig keine getrennte Signalisierung des rechtsabbiegenden motorisierten Verkehrs, was ein Indiz für eine unfallreduzierende Wirkung der getrennten Signalisierung sein kann.

Führungsform des Radverkehrs

An verkehrszeichengeregelten Knotenpunkten stellen Kolrep-Rometsch et al. (2013) für Mischverkehrsführungen geringe Unfallraten für Rechtsabbiegeunfälle, jedoch die höchsten Unfallraten für Linksabbiegeunfälle fest. Strauss et al. (2015) finden über alle Unfalltypen keinen Unterschied des Risikos an verkehrszeichengeregelten Knotenpunkten mit Führungen im Mischverkehr und Radverkehrsführungen, was bedeuten kann, dass die beiden Effekte (Unfälle mit rechtsabbiegenden und linksabbiegenden Kfz) sich ausgleichen.

Knotenpunktarme mit LSA und Radverkehrsführung auf der Fahrbahn (Radfahrstreifen oder Schutzstreifen) weisen laut Kolrep-Rometsch et al. (2013) bei niedrigen Unfallraten hohe Unfallanzahlen und Unfallkosten für Unfälle mit abbiegendem Kfz-Verkehr auf. Auch Alrutz et al. (2015) ermitteln an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten geringere Unfallraten für Radverkehrsführungen auf der Fahrbahn gegenüber Führungen im Seitenraum (Radweg bzw. gemeinsamer Geh- und Radweg). Strauss et al. (2015) zeigen, dass das Vorhandensein eines Radfahrstreifens das Unfallrisiko gegenüber Mischverkehrsführungen deutlich reduziert.

Laut Aurich et al. (2012) wirkt bei der Betrachtung von Knotenpunkten (sowohl lichtsignalgeregelte, als auch unvollständig lichtsignalgeregelte und vorfahrtzeichengeregelte) die Führung des Radverkehrs im Mischverkehr an mindestens einer Zufahrt gegenüber einer Führung mit (abgesetzten oder nicht abgesetzten) Furten unfallreduzierend auf Abbiegeunfälle und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung. Diese Aussage wird jedoch ohne Einbezug der Exposition getroffen. In den Zufahrtenmodellen hingegen wirkt (unter Einbezug der Exposition) nicht die Führung im Mischverkehr, sondern eine abgesetzte Furt unfallbegünstigend, was generell für die Verkehrssicherheit von Führungen auf der Fahrbahn spricht.

Ling et al. (2020) betrachten die Sicherheitswirkung der Installation von Radwegen, wobei sowohl im Vorher- als auch im Nachher-Zeitraum ca. 75 % der Unfälle an Knotenpunkten auftreten. Dabei stellen sie eine Unfallratenreduktion um 70 % fest, wenn vor der Einführung des Radweges keine Radverkehrsanlage vorhanden war. Wurde ein Radfahrstreifen in einen Radweg umgebaut, ergibt sich kein Sicherheitsgewinn. Aufgrund der fehlenden Differenzierung von Unfalltypen und Knotenpunktmerkmalen ist diese Aussage jedoch nicht verallgemeinerbar.

Vandenbulcke et al. (2014) erstellen ein Unfallmodell für Knotenpunkte, bei welchem die Verkehrsregelungsart in Kombination mit der Radverkehrsführungsform berücksichtigt wird. Am sichersten werden Kreisverkehre mit der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr bewertet. Eine mittlere Sicherheitsbewertung wird für vorfahrtzeichengeregelte Knotenpunkte mit Einrichtungsradwegen sowie lichtsignalgeregelte Knotenpunkte mit markierten Radfahrstreifen ermittelt. Am unsichersten sind Knotenpunkte mit Rechts-vor-Links-Regelung, und Schutzstreifen, Kreisverkehre mit markierten Radfahrstreifen und vorfahrtzeichengeregelte Knotenpunkte mit Zweirichtungsradwegen. Auch Schepers et al. (2011) finden an verkehrszeichengeregelten Knotenpunkten einen unfallerhöhenden Einfluss bei Anlagen mit Zweirichtungsradweg.

Harris et al. (2013) stellen keinen signifikanten Einfluss der Radverkehrsführungsform auf das Unfallgeschehen an Knotenpunkten fest.

Absetzung der Radfahrfurt

An Knotenpunkten ohne LSA haben Zufahrten mit weit abgesetzten Furten (≥ 4 m) laut Kolrep-Rometsch et al. (2013) gegenüber Führungen ohne Furt oder gering abgesetzten Furten deutlich höhere Unfallraten und Unfallkostenraten für Rechtsabbiegeunfälle. Für die gering abgesetzten Furten zeigen kleine Furtabsetzungen (0-2 m) etwa doppelt so hohe Unfallraten auf wie mittlere Furtabsetzungen (2-4 m). Schepers et al. (2011) kommen zu ähnlichen Ergebnissen, nach denen sich eine mittlere Absetzung der Furt von 2-5 m unfallreduzierend auswirkt.

An Knotenpunkten mit LSA hingegen weisen mittlere Furtabsetzungen (2-4 m) die höchsten Unfallraten für Rechtsabbiegeunfälle auf, während weite (≥ 4 m) und kleine (0-2 m) Furtabsetzungen etwa gleich sicher sind (Kolrep-Rometsch et al. 2013).

Roteinfärbung der Radfahrfurt

An Knotenpunkten ohne LSA stellen Schepers et al. (2011) einen unfallerhöhenden Einfluss für die Roteinfärbung der Furten fest.

Jensen (2008) untersucht die Auswirkung der (blauen) Einfärbung von Radverkehrsfurten auf das Unfallgeschehen (innerhalb einer Vorher-Nachher-Studie) an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten. Dabei wird an Knotenpunkten, an denen jeweils nur eine Furt eingefärbt wurde, ein leichter Rückgang der Unfallzahlen beobachtet. Knotenpunkte, an denen alle Furten blau eingefärbt wurden, weisen im Nachher-Zeitraum ein deutlich erhöhtes Unfallgeschehen auf. Dies ist vor allem auf eine Zunahme von Auffahrunfällen sowie von Einbiegen/Kreuzen-Unfällen (bei Rot) zurückzuführen. Erklärt wird dies damit, dass die Kfz-Führenden sich mehr auf die markierten Furten als auf die Signalgeber konzentrierten.

Auch Kolrep-Rometsch et al. (2013) untersuchen den Einfluss von Roteinfärbungen auf das Radunfallgeschehen und stellen hierbei für Knotenpunkte ohne LSA geringere Unfallkennwerte für eingefärbte Furten fest, für Knotenpunkte mit LSA jedoch höhere Werte. Aussagen zur Sicherheitswirkung werden jedoch nicht getroffen, da

Roteinfärbungen häufig an Knotenpunkten aufgebracht werden, die generell unsicher sind, z. B. als Maßnahme der Verkehrsunfallkommissionsarbeit. Somit sind höhere Unfallraten an rot eingefärbten Furtten nicht kausal auf die Einfärbung zurückzuführen.

Vorgezogene Haltelinien für den Radverkehr

Buch und Jensen (2017) stellen durch die Markierung von vorgezogenen Haltelinien keinen signifikanten Einfluss auf die Unfallanzahl gegenüber der Vorher-Situation (keine vorgezogene Haltlinie) fest. Es zeigt sich jedoch tendenziell eine Erhöhung der Unfallzahlen, insbesondere bei Sachschadensunfällen. In der Betrachtung der Infrastruktur für den motorisierten Verkehr zeigt die Studie, dass vorgezogene Haltelinien bei Vorhandensein eines Rechtsabbiegefahrstreifens keinen Sicherheitseffekt haben, sich die Anzahl der Rechtsabbiegeunfälle (nach Markierung von vorgezogenen Haltelinien) jedoch bei Mischfahrstreifen (Geradeaus-Rechts) signifikant erhöht.

Einflüsse von Anlagen des Fußverkehrs

Das Vorhandensein einer baulichen Mitteltrennung oder eines Fahrbahnteilers in den Knotenpunktarmen lichtsignalgeregelter Knotenpunkte zeigt laut Kim et al. (2012) einen unfallerhöhenden und laut Strauss et al. (2013) einen unfallreduzierenden Einfluss. Kim et al. (2012) finden zusätzlich einen negativen Zusammenhang zwischen Breite des Gehwegs und dem Unfallgeschehen. Dass sich die Gehwegbreite unfallreduzierend auswirkt, wurde damit begründet, dass mehr Radfahrende auf dem Gehweg anstatt auf der Fahrbahn fahren. Laut Strauss et al. (2013) hat weiterhin die Länge der Furt einen unfallerhöhenden Einfluss.

2.2 Routenwahl von Radfahrenden

Die Routenwahl von Radfahrenden wurde in zahlreichen Studien untersucht, wobei in den letzten Jahrzehnten zunehmend versucht wird, die unterschiedlichen Faktoren und deren Einfluss auf die Routenwahl zu identifizieren und zu quantifizieren.

In den meisten Studien werden dazu Stated Preference-Experimente (SP) durchgeführt, in denen sich Teilnehmende für eine Route aus einer vorgegebenen Menge hypothetischer und mit unterschiedlichen Charakteristika attribuierten Alternativen entscheiden. Ein Nachteil dieser SP-Experimente besteht darin, dass stets die Verifizierung der Ergebnisse durch die Beobachtung des wirklichen Verhaltens – die sog. Revealed Preference (RP) – fehlt, da nicht das realisierte Verhalten beobachtet wurde. Stattdessen werden bei SP-Befragungen Präferenzen der Radfahrenden, in konstruierten und teils hypothetischen Situationen, abgefragt (Broach et al. 2012; Hood et al. 2011). Aus diesem Grund stehen in der vorliegenden Arbeit die Studien im Fokus, die auf Daten zum real beobachteten Verhalten basieren.

Die ersten Studien zur Untersuchung des Routenwahlverhaltens von Radfahrenden, die RP-Daten nutzten, um die genannten Nachteile von SP-Daten zu vermeiden, wurden bereits in den 1980er Jahren durchgeführt. Frühe Studien gehen dabei bis ins Jahr 1978 zurück (siehe Lott et al. (1978)) und reichen bis in die jüngste Vergangenheit (siehe Ghanayim und Bekhor (2018)). Die seither entstandenen Arbeiten können und müssen jedoch hinsichtlich der Auswertungsmethoden unterschieden werden. Da Studien mit rein deskriptiver Analyse zwar einen Überblick über das Routenwahlverhalten und seiner Einflussfaktoren geben können, jedoch keine detaillierten Aussagen über kausale Zusammenhänge und Abhängigkeiten zulassen, werden sie im Folgenden nicht weiter betrachtet. Der Fokus liegt daher auf Studien, die multivariate Analysen durchgeführt haben, um Kausalitäten und damit Einflussfaktoren der Routenwahl zu bestimmen.

Es existiert eine Vielzahl entsprechender Arbeiten (Menghini et al. 2010; Hood et al. 2011; Charlton et al. 2011; Broach et al. 2012; Kang und Fricker 2013; Koh und Wong 2013; Casello und Usyukov 2014; Khatri et al. 2016; Ton et al. 2017; Chen et al. 2017). Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Rahmendaten der relevanten Studien zum Thema und fasst die Inhalte der recherchierten Studien kurz zusammen. Auch wenn diese auf Daten auf unterschiedlichen Untersuchungsräumen basieren, Erhebungszeiträume sich teils stark unterscheiden und der eigentliche Fokus der Studien teilweise stark variiert, so zeigt die Betrachtung der Studienergebnisse dennoch auf, dass sich einheitliche Tendenzen zur Wirkung der Einflussfaktoren auf die Routenwahl von Radfahrenden erkennen lassen.

So wirkt bspw. der negative Einfluss großer Distanzen oder starker Steigungen sowie der positive Einfluss vorhandener Radverkehrsinfrastruktur und geringer Geschwindigkeiten des fließenden MIV auf die Wahlwahrscheinlichkeit einer Route.

In den recherchierten Studien wird der Faktor Sicherheit nur indirekt über andere Einflussfaktoren in der Untersuchung berücksichtigt. Meist argumentieren die Autoren, dass bspw. die Geschwindigkeiten oder die Verkehrsstärken des Kfz-Verkehrs die objektive Sicherheit und das subjektive Sicherheitsempfinden entlang einer Route beeinflussen und damit Sicherheit einen erheblichen Einfluss auf die Routenwahl ausübt. Diese Annahme ist kaum anzuzweifeln, jedoch wird die Sicherheit in den Studien nicht direkt berücksichtigt und analysiert. Daher lässt sich deren Einfluss nicht quantifizieren. Einflussfaktoren wie bspw. der DTV, Schwerverkehrsanteile oder Geschwindigkeiten des fließenden Verkehrs dienen in den Studien lediglich als eine Art „Proxy“. Der Einfluss der Sicherheit wird mehr interpretiert, aber nicht quantifiziert. Im Folgenden soll beispielhaft auf zwei derartige Studien eingegangen werden.

Tabelle 3 Rahmendaten der relevanten Studien zur Routenwahl Radfahrender

Studie	Jahr ¹	Fokus	Untersuchungsraum	Stichprobe			Kenngrößen/Einflussfaktoren	Genutztes Modell
				Proband*innen	Fahrten	Zusammensetzung		
Krizek et al. (2007)	2005	Nutzung des „Bike Trail Systems“	Minneapolis (USA)	142 (3.121)	142 (3.121)	14-79a (MW: 40a), 43% weiblich	Alter, Geschlecht, Wegezweck, Unfallzahlen, Knotenpunkte, Wegelänge	Ordinary Least Square
Menghini et al. (2010)	2004	Untersuchung der Routenwahl	Zürich (Schweiz)	<2.045 (2.435)	2.498 (73.493)	-	Streckenlänge, durchschnittliche Steigung, maximale Steigung, Radwegeanteil, Anzahl LSA	Multinomial Logit
Hood et al. (2011; Charlton et al.)	2009/2010	Entwicklung eines Routenwahlmodells	City of San Francisco (USA)	366 (952)	3.034 (7.096)	79% männlich	Streckenlänge, Wenden, Anteil Falschfahrten (Richtung), Radverkehrsführungsform, Steigung, Geschlecht	Path Size Multinomial Logit
Broach et al. (2012)	2007	Entwicklung eines Routenwahlmodells	Portland (USA)	154 (164)	1.449 (1.777)	80% männlich, 89% zw. 25-64 Jahre	Streckenlänge, Wenden, Steigung, LSA, Anzahl Stopps, Radverkehrsführungsform, Wegezweck	Path Size Logit
Kang und Fricker (2013)	2006-2008	Unterschiede der Radwegenutzung (on- vs. off-street)	Purdue Univ., West Lafayette (USA)	178	931	100% zw. 18-30a, 75% männlich, Studierende	Radverkehrsführungsform, Straßenklasse, Segmentlänge, Sicherheit, Wegbreite, DTV, LSA, Oberflächenqualität, Fahrtrichtung (Einbahnstraße)	Mixed Logit
Koh und Wong (2013)	-	Einflussfaktoren der Routenwahl	Singapur (Singapur)	276 (1.146)	276	73% zw. 15-49a, m/w 50/50%	Verkehrsaufkommen, Hindernisse (z.B. Stufen), Unfallrisiko	Index-Modell, Logit
Casello und Usyukov (2014)	2011	Nutzenfunktion zur Bewertung von Routenalternativen	Waterloo, Ontario (Kanada)	~400	724 (~2.000)	Erfahrene Radfahrende	Distanz, Geschwindigkeit und Aufkommen des fließenden motorisierten Verkehrs, Steigung, Existenz Radverkehrsinfrastruktur	Multinomial Logit
Khatri et al. (2016)	2014-2015	Routenwahl von Bike-Sharing-Nutzern	Downtown Phoenix, Arizona (USA)	1.866	9.101 (20.468)	Bike-Sharing-Nutzer	Distanz, Anteil Radverkehrsinfrastruktur, Anzahl Abbiegevorgänge, Anteil Einbahnstraßen, Anzahl LSA-geregelter Knotenpunkte, DTV	Path Size Logit
Ton et al. (2017)	2015	Einflussfaktoren der Routenwahl	Amsterdam (Niederlande)	<3.045 (~5.000)	3.045 (12.413)	80% zw. 31-64a, ca. 69% Fahrten v/z. Arbeit	Distanz, Anzahl Knotenpunkte, Anteil baulich getrennter Radwege, Wegezweck	Multinomial Logit, Path Size Logit, Extended Path Size Logit
Chen et al. (2017)	2009-2014	Einfluss der gebauten Umwelt auf die Routenwahl	Seattle (USA)	197	2.922 (3.310)	72% zw. 10-61a, erfahrene Radfahrende	Distanz, Geschwindigkeit des fließenden MIV, Steigung, Landnutzung, Bebauungsdichte, Wasser- und Parkflächenanteil, Radverkehrsführungsform, Beleuchtungsdichte, Baumdichte	Path Size Logit Mixed-Logit Model
Zimmermann et al. (2017)	2012-2016(?)	Modellierung der Routenwahl	Eugene, Oregon (USA)	103	648	74% männlich, 81% älter als 26 Jahre	Distanz, Steigung, Verkehrsaufkommen MIV, Geschwindigkeiten, Richtungen (Einbahnstr.), Radverkehrsführungsform, LSA-geregelte Knotenpunkte, Anzahl Stopps	Recursive Logit Model
Ghanayim und Bekhor (2018)	2013-2014	Routenwahl von Radfahrenden	Tel Aviv (Israel)	221 (8.515)	545 (39.952)	Überdurchschnittlich jung (70% < 40a) und männlich (73%)	Distanz, Radverkehrsführungsform, Straßenklassen, Flächennutzung, Anteil der Wegstrecke am Meer	Mixed Multinomial Logit, Mixed Path Size Logit, Mixed C-Logit

¹ der Datenerhebung

In der Studie von Chen et al. (2017) untersuchen die Autoren den Einfluss der Stadtstruktur und der Eigenschaften des Verkehrsnetzes auf die Präferenzen bei der Routenwahl von Radfahrenden in Seattle (USA). Dazu nutzen sie GPS-Daten einer Erhebung der Jahre 2009-2014. Im Erhebungszeitraum wurden mit der Smartphone-App „Cycletracks“ insgesamt 3.310 Radfahrten erhoben. Nach der Datenbereinigung stehen 2.922 Tracks von 197 Radfahrenden für die Analysen zur Verfügung. Die erhobenen Routen werden mit weiteren Sekundärdaten angereichert, sodass Chen et al. (2017) vier Klassen von Einflussvariablen in ihren Analysen berücksichtigen können:

- personenspezifische Variablen (z.B. Alter, Geschlecht, Radfahrerfrequenz),
- Komfort (z.B. Distanz, Verfügbarkeit von Abstellanlagen, Anzahl Stopps),
- Sicherheit (z.B. zulässige Höchstgeschwindigkeit, Beleuchtung, Radverkehrsführungsform),
- sog. freizeitbezogene Einflüsse (z.B. Straßenbäume, Szenerie).

In der Studie werden somit unterschiedliche Variablen der Klasse „Sicherheit“ zugeordnet – die objektive oder subjektive Sicherheit findet jedoch nicht als Einzelvariable Eingang in die Untersuchung.

Als zentrale Einflussfaktoren identifizierten Chen et al. (2017) die Distanz einer Route, die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf den Streckenabschnitten, die Steigung, die Höhe des Radwegeanteils sowie das Vorhandensein von Straßenbeleuchtung entlang einer Route. Es zeigte sich, dass Radfahrende Routen mit kurzen Distanzen, geringen Steigungen und niedrigen Geschwindigkeiten des MIV bevorzugen. Zudem wirken sich das Vorhandensein von Straßenbegleitgrün und Straßenbeleuchtungen, die Nähe einer Route zu Parks und Wassertörpern sowie zu Gebieten mit hoher Durchmischung der Landnutzung positiv auf die Auswahl einer Route aus.

An der Arbeit von Chen et al. (2017) ist hervorzuheben, dass es ihnen möglich war, besonders viele potenzielle Einflussfaktoren der Routenwahl in die Analyse einzubeziehen und zu untersuchen. Darüber hinaus ist die genutzte Stichprobe der RP-Daten mit fast 3.000 Fahrten im Vergleich zu anderen Studien sehr groß, was die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich erhöht. Dem steht jedoch die Zusammensetzung der Stichprobe gegenüber, die vor allem Fahrten erfahrener Radfahrender enthält. Eine mögliche Verzerrung der Modellergebnisse ist damit nicht auszuschließen.

Die Studie von Kang und Fricker (2013) stellt ein weiteres Beispiel für Studien dar, die den Einfluss von Sicherheit auf die Routenwahl über andere Einflussfaktoren zu analysieren versuchen. Die Autoren untersuchen in ihrer Studie die Nutzung unterschiedlicher Radverkehrsführungsformen, fokussieren sich dabei vor allem auf die Entscheidung der Radfahrenden zwischen dem Fahren auf dem Geh-/Radweg (off-street) und der Nutzung der Straße (on-street). Ihre Untersuchungen basieren auf Befragungen, die auf dem Campus der Purdue University in Indiana (USA) durchgeführt wurden. Dabei wurden Studierende bei ihrer Ankunft auf dem Campus u. a. nach ihren Routen und der Radwegenutzung gefragt. Von 2006 bis zum Jahr 2008 wurden auf diese Weise 178 Radfahrende zu insgesamt 931 Fahrten befragt. Auf Basis der Befragungen sowie weiterer Sekundärdaten führten Kang und Fricker (2013) eine statistische Schätzung durch, um den Einfluss personenspezifischer Merkmale (z. B. Alter, Geschlecht, Tragen eines Helms), umweltspezifischer Variablen (z. B. Tageszeit, Windgeschwindigkeit, Temperatur) und routenspezifischer Variablen (z. B. Straßenklasse, Anzahl der Fahrstreifen, Steigungen, Anlagen des ruhenden Verkehrs, DTV, Oberflächenbeschaffenheit) auf die Routenwahl zu analysieren.

Ergebnis ihrer Analysen ist, dass Radfahrende generell das Fahren auf der Straße (on-street) präferieren. Andererseits tendieren sie auf großen Straßen oder Straßen mit hohem DTV zur Nutzung von separat geführten Radwegen (off-street), die auch allgemein gegenüber Radfahrstreifen bevorzugt werden. Kang und Fricker (2013) schließen aus ihrer Arbeit, dass bei der Nutzung spezifischer Radverkehrsinfrastruktur (off-street versus on-street) ein Zusammenhang zu dem Sicherheitsempfinden und zur Oberflächenqualität besteht.

An der Studie ist positiv hervorzuheben, dass sie viele Einflussfaktoren einschließt und diesbezüglich eine der umfangreichsten Studien darstellt. Zudem nutzen Kang und Fricker (2013) ihre Ergebnisse zur Berechnung unterschiedlicher Szenarien, mit denen sie nicht nur die Plausibilität ihrer Ergebnisse illustrieren, sondern die

Nutzung von Radverkehrsinfrastruktur nach deren Umgestaltung aufzeigen können. Sie betonen in ihrer Studie jedoch, dass ihr Modell die Nutzung von on-street-Segmenten in gewissem Grad überschätzt. Zudem lässt der Fokus der Arbeit nur wenig detaillierte Aussagen zu unterschiedlichen Radverkehrsführungsformen zu. Die Ergebnisse lassen sich aufgrund der Stichprobenzusammensetzung und -größe nur schwer generalisieren, da die für die Analyse erhobenen Daten von einer homogenen Gruppe an Proband*innen stammen (Studierende der Purdue University).

Ähnliche Interpretationen in Bezug auf Sicherheit finden bei Casello und Usyukov (2014) oder Broach et al. (2012) statt. Alle weiteren Studien stellen ebenfalls keinen direkten Zusammenhang zur Sicherheit her. Es existieren derzeit keine Studien, in denen der Einfluss der objektiven und subjektiven Sicherheit auf die Routenwahl auf Basis von RP-Daten untersucht wurde – bei denen also eigene Variablen für die Sicherheit in die Analysen einflossen.

Neben der mangelnden Aussagekraft in Bezug auf den Einfluss der Sicherheit auf die Routenwahl muss vor allem die Datengrundlage, auf deren Basis die Untersuchungen in den recherchierten Studien durchgeführt wurden, hinterfragt werden. Die Stichproben der Studien unterscheiden sich teils stark (z. B. Quantität und Stichprobenzusammensetzung) und nahezu alle Stichproben weisen „Schwächen“ auf. Diese Schwächen beziehen sich auf unterschiedliche Eigenschaften der Stichprobe, wie bspw. auf die geringe Anzahl an Probanden*innen (siehe bspw. Zimmermann et al. 2017) oder die geringe Fahrtenanzahl (siehe bspw. Koh und Wong (2013)). Sowohl zu wenig Proband*innen als auch zu wenig Fahrten beeinflussen die Aussagekraft der Studienergebnisse und stellen die Qualität der Ergebnisse in Frage.

Eine Problematik mit hoher Relevanz stellt die Zusammensetzung der Stichproben dar. Die meisten Studien nutzen zwar Daten, die eine ausreichend große Mengen an Proband*innen und Fahrten beinhalten (siehe bspw. Hood et al. (2011) oder Khatri et al. (2016)). Jedoch sind die Stichproben in nahezu allen Studien in bestimmten Aspekten zu homogen. In der bereits angesprochenen Studie von Khatri et al. (2016) sind bspw. alle Proband*innen Nutzer von Bike-Sharing-Systemen. Es ist jedoch fraglich, ob die Nutzer von Fahrradverleihsystemen die durchschnittlichen Radfahrenden darstellen. In der Stichprobe, deren Daten Casello und Usyukov (2014) für ihre Arbeit nutzen, sind hauptsächlich Daten von erfahrenen Radfahrenden enthalten. In anderen Studien werden wiederum Daten genutzt, bei denen die Geschlechterverteilung der Radfahrenden durch überproportional viele Männer in der Stichprobe stark verzerrt ist (siehe bspw. Hood et al. (2011)). Die Daten, die Kang und Fricker (2013) für ihre Arbeit nutzen, sind durch eine sehr homogene Nutzengruppe (100% Studierende) bestimmt. Darüber hinaus ist die Altersverteilung der Radfahrenden in vielen Stichproben nicht repräsentativ (siehe bspw. Broach et al. (2012) oder Kang und Fricker (2013)). Zudem haben alle Studien auf Basis von RP-Daten die Einschränkung, dass lediglich Personen befragt haben, die bereits Rad fahren, nicht aber diejenigen, die das Rad gar nicht erst nutzen.

2.3 Fazit

Die Exposition als Einflussfaktor auf das Unfallgeschehen von Radfahrenden kann in Modellen quantifiziert werden. Dabei zeigen die betrachteten Untersuchungen folgende Zusammenhänge:

- Die Kfz-Verkehrsstärke hat einen positiven (degressiven) Einfluss auf die Unfallanzahl.
- Der Radverkehrsstärke konnte in den meisten Untersuchungen ebenfalls ein positiver (degressiver) Einfluss auf die Unfallzahlen nachgewiesen werden, wobei diese weniger stark wirkt als die Kfz-Verkehrsstärke. Die Koeffizienten der Radverkehrsstärke weisen über die Untersuchungen eine größere Bandbreite auf.
- Die Umfeldnutzung besitzt einen positiven Einfluss auf das Unfallgeschehen, wobei diese ein Ersatzmaß für das Fußverkehrsaufkommen darstellt.

Für die Wirkung infrastruktureller und betrieblicher Einflussfaktoren auf Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung können folgende Aussagen getroffen werden:

- Höhere Geschwindigkeiten des Kfz-Verkehrs weisen einen positiven Zusammenhang zum Unfallgeschehen auf. Zulässige Geschwindigkeiten bis einschließlich 30 km/h weisen sowohl an Strecken als auch an Knotenpunkten die geringste Unfallanzahl und -schwere auf.
- Untersuchungen der Sicherheitswirkung von Radverkehrsführungen auf Strecken in Deutschland lassen keine eindeutigen Aussagen zu sicheren und unsicheren Führungsformen zu. Auch in der internationalen Literatur wird die gemeinsame Führung des Radverkehrs mit dem Kfz-Verkehr gegenüber einer getrennten Führung im Seitenraum teilweise als sicherer und teilweise als unsicherer bewertet.
- Für Mischverkehrsführungen wird ein positiver Zusammenhang zwischen Fahrstreifenbreite und Unfallgeschehen gefunden.
- Für die Radverkehrsführung an Knotenpunkten liegen nur vereinzelt Ergebnisse vor:
 - Mischverkehrsführungen in der Zufahrt können für ausgewählte Konfliktsituationen unfallreduzierend im Vergleich zu Führungen auf Radverkehrsanlagen wirken.
 - An Knotenpunkten mit LSA weisen Furten mit einer Absetzung von 2 - 4 m die höchsten Unfallkennwerte bzgl. Abbiegeunfällen im Vergleich zu kleineren und größeren Absetzungen auf. An Knotenpunkten ohne LSA ist diese Beziehung umgedreht (mittlere Absetzungen werden am sichersten bewertet)
 - Zur Sicherheitswirkung eingefärbter Radverkehrsfurten im Knoteninnernbereich sind aufgrund der unklaren Kausalität keine Aussagen möglich.
- Das Vorhandensein von Anlagen des ruhenden Verkehrs am Fahrbahnrand wirkt unfallerhöhend. Quantitative Aussagen zur Wirkung der Aufstellungsart liegen nicht vor.
- Werden Radfahrende im Mischverkehr mit Straßenbahngleisen auf der Fahrbahn geführt, erhöht sich vor allem das Risiko von Alleinunfällen.
- Hinsichtlich der Verkehrsregelungsart an Knotenpunkten weisen lichtsignalgeregelte Knotenpunkte häufig ein hohes Sicherheitsniveau auf. Der Anlage eines Fahrbahnteilers/einer baulichen Mitteltrennung wird ein signifikanter Einfluss, jedoch mit unterschiedlicher Wirkrichtung nachgewiesen.
- Separate Signalphasen für Linksabbiegende (und ggf. auch Rechtsabbiegende) wirken sich unfallreduzierend aus.

Für die Einflussfaktoren auf die Routenwahl Radfahrender liegen kaum repräsentative Erkenntnisse vor. Dennoch zeigen die Untersuchungen, dass:

- Identifizierte Einflussfaktoren vorwiegend auf Komfortkriterien basieren (kurze Distanzen, geringe Steigungen, Oberflächenbeschaffenheit)
- Der Einfluss von Sicherheit, bzw. Sicherheitsempfinden auf die Routenwahl in RP-Studien bisher nicht untersucht wurde, jedoch aufgrund des signifikanten Einflusses z. B. der zulässigen Geschwindigkeit vermutet werden kann.

Verkehrliche Einflussfaktoren, die sowohl auf die Verkehrssicherheit als auch auf die Routenwahl Radfahrender wirken sind Verkehrsstärken, zulässige Geschwindigkeiten, Radverkehrsführungsform, Straßenklasse und die Anzahl bzw. Regelungsart von Knotenpunkten.

3 DATENERHEBUNG UND –AUFBEREITUNG

In den folgenden Abschnitten 3.1 bis 3.4 wird die Datenerhebung und -aufbereitung für die differenzierten Modelle der Verkehrssicherheit und Routenwahl in Dresden beschrieben. Abschnitt 3.5 beschreibt die Datenerhebung für die kritischen Situationen. Abschnitt 3.6 beschreibt die Datenerhebung für die vereinfachten Modellversionen in den Vergleichskommunen.

3.1 GPS-Trajektorien

Die Repräsentation der räumlichen Bewegung von Radfahrenden erfolgt mittels aufgezeichneter GPS-Trajektorien. Diese Primärdaten liegen bereits vor und wurden im Rahmen des vorausgegangen NRVP-Projekts RadVerS erhoben und aufbereitet. Dabei wurden Daten von ca. 200 Proband*innen mit insgesamt 4.000 bis 5.000 Fahrten für das Untersuchungsgebiet gesammelt. Im Folgenden wird auf die Eckpunkte des Erhebungsrahmens und der Datenaufbereitung eingegangen. Für nähere Informationen sei an dieser Stelle auf den Abschlussbericht von RadVerS verwiesen (Francke et al. 2020).

3.1.1 Auswahl Untersuchungskollektiv

Die Akquise der Proband*innen erfolgte primär über eine Onlinebefragung. Als Kommunikationskanäle dienten Facebook, Twitter, E-Mailverteiler der TU-Dresden, des ADFC sowie Annoncen in Tageszeitungen und Nachrichtenportalen. Im Rahmen der Onlinebefragung konnten von über 10.000 Proband*innen Daten zu deren Radverkehrsverhalten erhoben werden. Die erhobenen Daten wurden für eine Typologisierung von Radfahrtypen genutzt, bei der mittels Clusterverfahren vier Radfahrtypen identifiziert werden konnten.

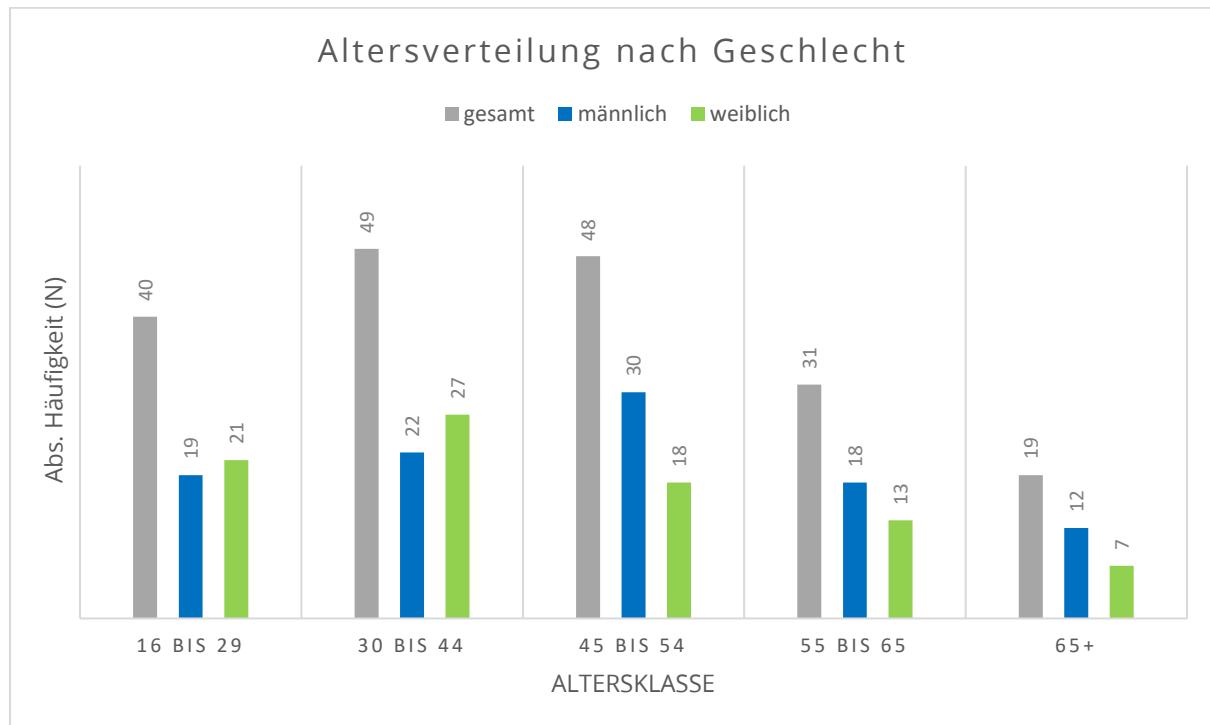


Abbildung 2 Altersverteilung der Proband*innen der Hauptstichprobe während der RadVerS-Feldstudie (Francke et al. 2020)

Für die Erhebung der Routendaten im Untersuchungsgebiet (Landeshauptstadt Dresden) wurden aus der Hauptstichprobe zu gleichen Teilen Proband*innen gezogen, die den vier Radfahrtypen entsprachen (geschichtete mehrstufige Stichprobenziehung). Teilnahmevoraussetzung war, dass die Proband*innen wohnhaft im Untersuchungsgebiet waren und dort der überwiegende Aufenthalt während der Erhebungsphase stattfand. Bei der Stichprobenziehung wurde auf ein ausgewogenes Geschlechterverhältnis und annähernd gleich große Typen-Gruppen (entsprechend der Ergebnisse der Clusteranalyse) geachtet. In einzelnen Personengruppen kam es zu

einer Nachakquise über interne Proband*innenlisten des Forschungsbereichs und weiteren Zeitungsannoncen, wodurch insgesamt 226 Proband*innen gewonnen werden konnten. In Abbildung 2 ist die Altersverteilung nach Geschlecht abgetragen. Im Vergleich zur demografischen Altersverteilung sind Menschen über 65 Jahren unterrepräsentiert. Das korreliert jedoch auch mit der Kohortenverteilung nach Ahrens et al. (2015) in dieser Altersklasse, die angibt, seltener das Fahrrad zu nutzen.

3.1.2 Datenerhebung

Die Datenerhebung fand jeweils zwei Wochen von Ende Mai bis Anfang Juni und Mitte bis Ende Juni 2018 statt. Nach den Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE) ist für diese beiden Zeiträume von Normalwochen auszugehen.

Die Aufzeichnung der GPS-Trajektorien erfolgte mittels einer speziell konfigurierten Smartphone-Applikation (App), die auf die integrierten Standortsensoren des Geräts zugreift. Ferner wurden die Proband*innen dazu angehalten ein rudimentäres Fahrtenbuch zu führen, in dem sie Besonderheiten wie gefährliche bzw. kritische Situationen u. ä. festhielten (siehe Abschnitt 3.5). Die Cyface GmbH stellte die für das Projekt konfigurierte RadVerS-App für das Android- und iOS-Betriebssystem bereit. Im Sinne des Datenschutzes wurde die App so angepasst, dass die Übertragung der Sensordaten direkt an einen datenschutzkonformen Server der TU Dresden erfolgte. In Abbildung 3 ist das bewusst einfach gehaltene Screendesign der App dargestellt. Jede aufgezeichnete Strecke wird unter Angabe des Wegezwecks (Arbeit/Bildung, Freizeit, Einkaufen) abgespeichert und übertragen.

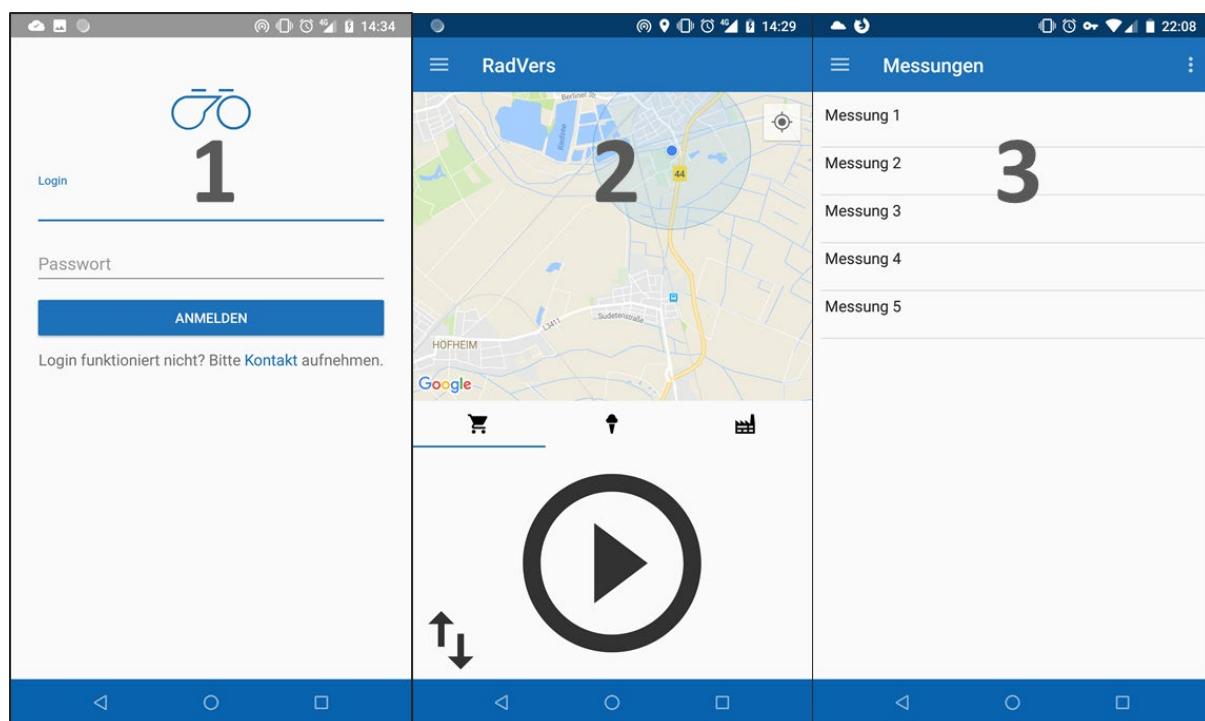


Abbildung 3 **Screendesigns und Grundfunktionalität der RadVerS-App (Francke et al. 2020)**

In Tabelle 4 sind die übertragenen Daten aufgeführt. Da es sich bei den erhobenen Daten um personenbeziehbare Daten handelte (vor allem die GPS-Daten lassen einen Personenbezug zu), mussten alle Proband*innen ihr Einverständnis zur Erhebung und Verarbeitung erklären. Vor der eigentlichen Feldphase wurden für jede*n Proband*in über die Onlinebefragung die folgenden persönlichen Daten erfasst: Alter, Geschlecht, Beruf/Bildung, Radfahrttyp, Wohnort.

Von den 226 Proband*innen meldeten 187 über die RadVerS-App GPS-Daten an den Server der TU Dresden zurück. Die hohe Antwortrate von 85% und die 4.000 bis 5.000 aufgezeichneten Fahrten lassen sich mit einem hohen Interesse der Teilnehmenden sowie täglichen Erinnerungsmails erklären.

Hervorzuheben ist die Datenakquise von Bewegungsdaten der Alterskohorte 65+, da diese im Großteil der bekannten Studien nicht repräsentiert sind.

Tabelle 4 Aufgezeichnete Sensorsdaten (Francke et al. 2020)

Sensor	Daten	Frequenz
GPS	Lat, Lon, Zeit	1 Hz
Accelerometer	ax, ay, az; Zeit	200 Hz
Magnetometer	mx, my, mz; Zeit	50 Hz
Gyroskop	rx, ry, rz; Zeit	50 Hz
Metadaten	Device_ID, Measurement_ID	1 mal pro Messung

3.1.3 Datenaufbereitung

Aufgrund der Anzahl an aufgezeichneten Fahrten wurde die Datenverarbeitung automatisiert vorgenommen. Dabei kamen typische Geoinformations-Algorithmen, Entscheidungsbäume, statistische Verfahren und Schwellwertfilter zur Anwendung. Es wurde ein Verfahren zur automatisierten Datenaufbereitung entwickelt, das in Form eines eigens für RadVerS entwickelten QGIS-Plug-Ins umgesetzt wurde. Zur Implementierung diente die Programmiersprache Python. Abbildung 4 stellt den Datenfluss anhand von sieben Teilschritten dar.

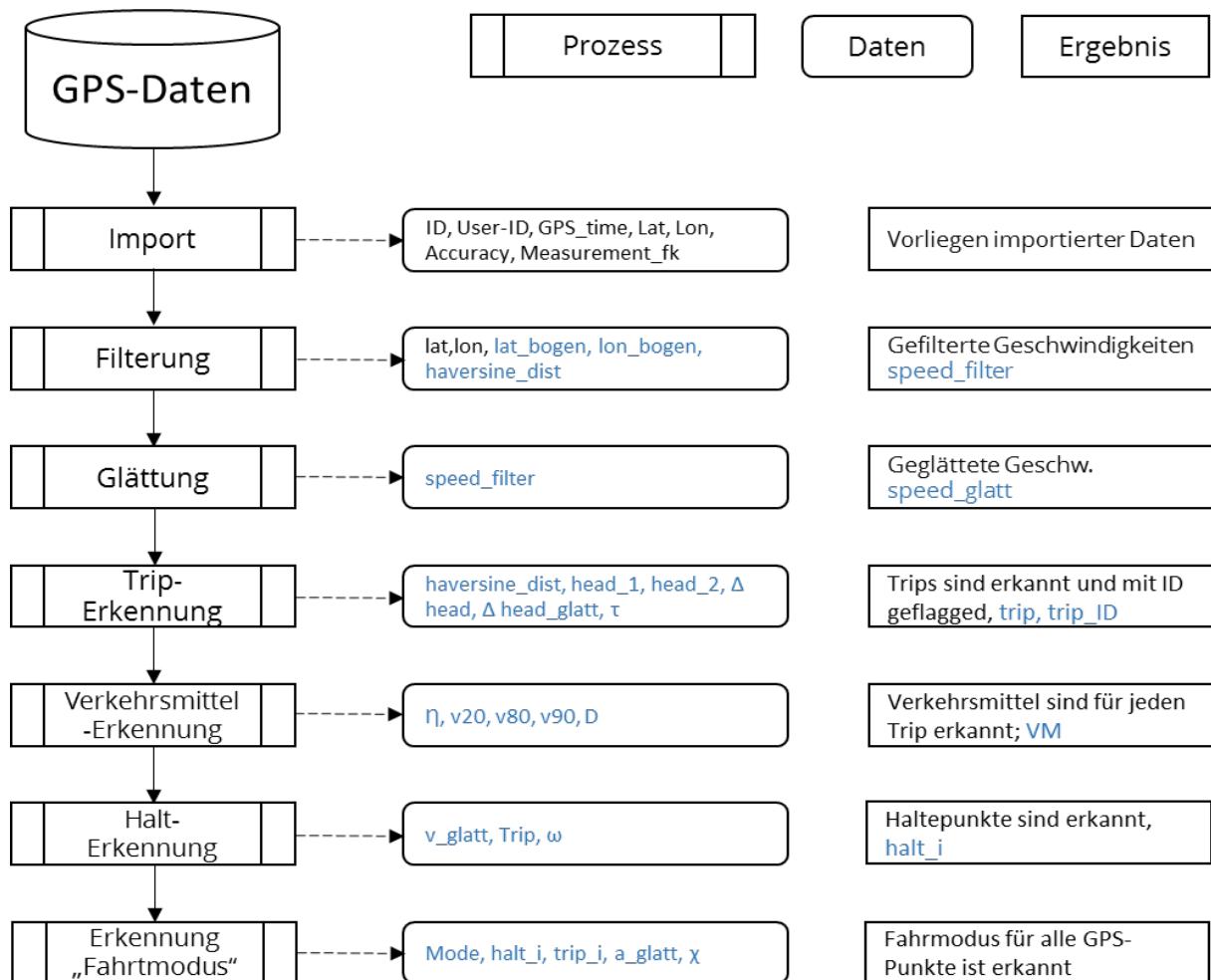


Abbildung 4 Ablaufschema Datenaufbereitung RadVerS (Francke et al. 2020)

Die aufgezeichneten Bewegungsdaten der Proband*innen lagen nach der Feldphase in einer PostgreSQL-Datenbank vor. Jeder aufgenommene Punkt kann dabei über einen Schlüssel einer Fahrt eines Nutzers zugeordnet werden. GPS-Daten sind i. d. R. durch Umwelteinflüsse fehlerbehaftet und weisen in günstigen Fällen ein

Genauigkeitsfenster von 3-10 m auf.² Auftretende Signalfehler können jedoch zu Ausreißern führen, die bei weiteren Berechnungen zu Verzerrung führen können (Francke et al. 2020, S. 16). Mittels Schwellwertfilterung anhand aufgenommener GPS-Genauigkeitswerte und einer Glättung der Geschwindigkeiten wurde Ausreißern begegnet. Dieser Schritt war notwendig, da Geschwindigkeits- und Beschleunigungsperzentile im weiteren Verlauf der Datenaufbereitung wichtige Entscheidungsmaße darstellen.

Fehlverhalten seitens der Proband*innen führte teilweise zu längeren Fahrtaufnahmen. Das war meistens dann der Fall, wenn eine Aufzeichnung nicht nach einer abgeschlossenen Fahrt beendet wurde. Das Erkennen von Wegen (GPS-Sequenz in Bewegung) und Aktivitäten (GPS-Sequenz in Ruhe) einer aufgenommenen Fahrt gewährleistet die weitere Validität des Datensatzes. Anhand der Geschwindigkeit und Richtungsänderungen innerhalb eines gleitenden Zeitfensters von 180 Sekunden konnte diese Unterscheidung (Triperkennung) getroffen werden. Jeder Weg (Trip) wurde anschließend durch einen eindeutigen Schlüssel gekennzeichnet. Die weitere Verarbeitung beschränkte sich auf die erkannten Wege.

Eine nachgelagerte Verkehrsmittelerkennung filterte Radfahrten bzw. Radsportfahrten von den übrigen aufgenommenen Wegen. Dadurch wurde ein weiteres nutzerseitiges Fehlverhalten – die Aufzeichnung der Nutzung anderer Verkehrsmodi kompensiert. Anhand von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsperzentilen, Maximalgeschwindigkeit, Weglänge und Umwegefaktor wurden verkehrsmittelspezifische Kennwerte mittels eines Entscheidungsbaums unterschieden. Die Grenzwerte für den Entscheidungsbaum wurden iterativ durch die empirische Auswertung und Validierung des Datensatzes identifiziert.

Die Fahrtzustandserkennung umfasst die Ermittlung von positiver und negativer Beschleunigung, gleichförmiger Bewegung und Halten. Mit Hilfe dieser Informationen können statistische Auswertungen wie Beschleunigungs vorgänge und Haltezeiten erfolgen.

Als letzten Schritt der automatisierten Datenaufbereitung wurden die gefilterten Radfahrten auf eine Verkehrsinfrastruktur projiziert. Dieser Schritt war nötig, um die per GPS aufgezeichneten Radfahrten den Kanten einer Infrastruktur zuzuordnen und Aussagen über z. B. die Nutzung von Radverkehrsanlagen treffen zu können. Als Netzgrundlage dienten aufgrund eines hohen geometrischen Detaillierungsgrads Daten des OpenStreetMap Projekts (OSM) sowie das erweiterte Straßenknotennetz (ESKN) des städtischen Dienstes Cardo für die Radinfrastrukturdaten. Der erzeugte Verkehrsgraph besitzt über eine mehrstufige Verschneidung die räumliche Auflösung der OSM-Daten und die Radinfrastrukturtypologie der kommunalen Ämter. Ein Rückgriff auf bestehende Map-Matching-Werkzeuge in Form der Graphhopper-Softwarebibliothek ermöglichte die Verwendung des weit verbreiteten Matching-Algorithmus nach Newson und Krumm (2009).

Die Ergebnisse der Datenverarbeitung wurden in die PostgreSQL-Datenbank geschrieben, wobei ein Datensatz der Wegedaten mit den Attributen der Datenaufbereitung sowie ein mit Infrastrukturdaten verknüpfter Datensatz vorliegt. Für das aktuelle Projekt werden nur die Wegedaten verwendet. Aufbauend auf den Erkenntnissen über das Map-Matching aus RadVerS wird ein angepasstes Verfahren angewandt. Indem über ein angepasstes Routingprofil plausiblere Zuordnungsergebnisse erwartet werden und ein reduziertes OSM-Verkehrsnetz erzeugt und mit weiteren Infrastrukturdaten verknüpft wird (siehe Abschnitt 1.3 mit AP 3 und Abschnitt 3.2), sollen insgesamt belastbarere Aussagen getroffen werden können.

² Aus diesem Grund kann die Zuordnung von Fahrten zur genutzten Infrastruktur fehlerbehaftet sein. Um Fehler zu minimieren und die Fahrten konkreten Infrastrukturelementen zuzuweisen, werden in einem späteren Schritt sog. Map-Matching-Verfahren genutzt.

3.2 Infrastruktur- und Betriebsdaten

3.2.1 Abgrenzung und Definitionen

Um die von den Radfahrenden genutzte Infrastruktur zu charakterisieren, werden für das Straßennetz Eigenschaften erhoben, aufbereitet und in einer GIS-Datenbank hinterlegt. Dabei wird das Hauptverkehrsstraßennetz vollständig erhoben. Im Nebennetz fahren Radfahrende insbesondere, wenn ihre Quelle oder ihr Ziel sich innerhalb dieses Netzes befindet oder die Radfahrenden auf das Nebennetz ausweichen, um Hauptverkehrsstrecken zu meiden. Mögliche Gründe für die Vermeidung können das subjektive Sicherheitsempfinden der Radfahrenden sein oder generelle Präferenzen, welche als Ziel des Forschungsvorhabens ermittelt werden sollen. Nebennetzstrecken werden für die Routenwahl vollständig betrachtet. Für die Bewertung der Verkehrssicherheit wird nur ein Teil des Netzes abgebildet, da für viele Nebennetzstrecken keine Informationen zur Exposition (Kfz- und Radverkehrsstärke) vorliegen. Attribute im Nebennetz (siehe 3.2.2 und 3.2.3) werden nur für Strecken und Knoten erhoben, auf denen im RadVerS-Untersuchungszeitraum eine Mindestanzahl von 10 Fahrten durch Radfahrende erfolgt ist.

Dadurch ergibt sich die in Abbildung 5 abgebildete Netzabdeckung für die Stadt Dresden.

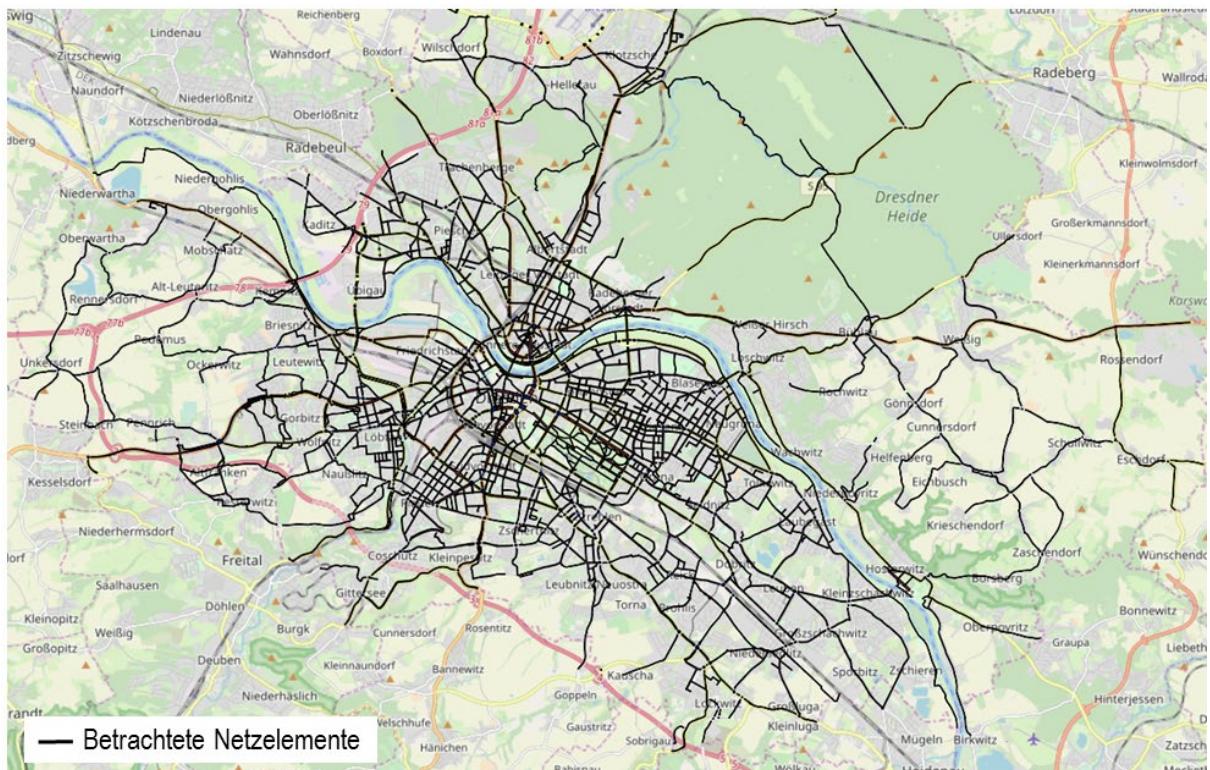


Abbildung 5: Netzabdeckung der Infrastrukturdaterhebung in der Stadt Dresden (Kartengrundlage: Openstreetmap)

Streckenabschnitte werden zwischen Hauptverkehrsknotenpunkten auf Basis homogener Streckenabschnitte gebildet. Homogen sind Streckenabschnitte, die sich hinsichtlich der folgenden Eigenschaften nicht unterscheiden (vgl. Aurich et al. 2012; Aurich 2013; Schüller et al. 2019):

- Radverkehrsführung
- ruhender Verkehr
- Fahrstreifenanzahl
- Zulässige Geschwindigkeit
- Gleise/bauliche Mitteltrennung

Die räumliche Abgrenzung bzw. Zuordnung des Unfallgeschehens erfolgt mit Hilfe von Polygonen. Dabei wird in Streckenabschnitte und Knotenpunkte unterschieden (siehe Abbildung 6).

Knotenpunkte weisen eine andere Charakteristik als Strecken auf und werden gesondert erhoben. Dabei werden Knotenpunkte von Hauptverkehrsstrecken (HVS) als Hauptverkehrsknotenpunkte (HVKP) bezeichnet. Knotenpunkte im Hauptverkehrsnetz mit Strecken des Nebennetzes werden als Anschlussknotenpunkte (AKP) und Knotenpunkte zwischen Strecken des Nebennetzes als Nebennetzknotenpunkte (NKP) bezeichnet.

Für die Zuordnung/Abgrenzung des Unfallgeschehens zu Knotenpunkten werden analog zu den Streckenabschnitten Polygone für alle HVKP, AKP und NKP erstellt (siehe Abbildung 6). Die Attributerhebung (siehe 3.2.3) erfolgt für HVKP, AKP und NKP, wenn für diese Verkehrsstärken vorliegen (vgl. Abschnitt 3.6).

HVKP haben einen nachweisbaren unfallerhöhenden Einfluss auf das Unfallgeschehen angrenzender Streckenabschnitte (u. a. Baier et al. 2007, Wang et al. 2008). Dieser Einfluss ist u.a. auf die Zunahme an Fahrstreifenwechseln und Haltevorgängen im Nahbereich des Knotens zurückzuführen. Zusätzlich ändert sich der Querschnitt der Strecken in der Regel vor dem Knotenpunkt, z. B. durch Abbiegefahrstreifen oder Haltestellen des ÖPNV. Deshalb werden diese sog. Annäherungsbereiche längenmäßig abgegrenzt (50 m; siehe Abbildung 6).

Die Berücksichtigung von Annäherungsbereichen vor Anschluss- und Nebennetzknotenpunkten kann zu einer deutlichen Reduktion der Gesamtlänge der Streckenabschnitte und einer Bildung sehr kurzer Teilstrecken führen. Kurze Abschnittslängen führen zu teils erheblichen Streuungen und damit verbundenen Schwierigkeiten bei der statistischen Modellschätzung. Zudem konnte Berger (2008) anhand einer Untersuchung des Dresdener Hauptstraßennetzes einen nur geringen Einfluss von Anschlussknotenpunkten auf das Unfallgeschehen der angrenzenden Strecke nachweisen. Daher werden für Anschlüsse des untergeordneten Netzes auf Hauptverkehrsstraßen sowie bei Nebennetzknotenpunkten keine Annäherungsbereiche abgegrenzt.

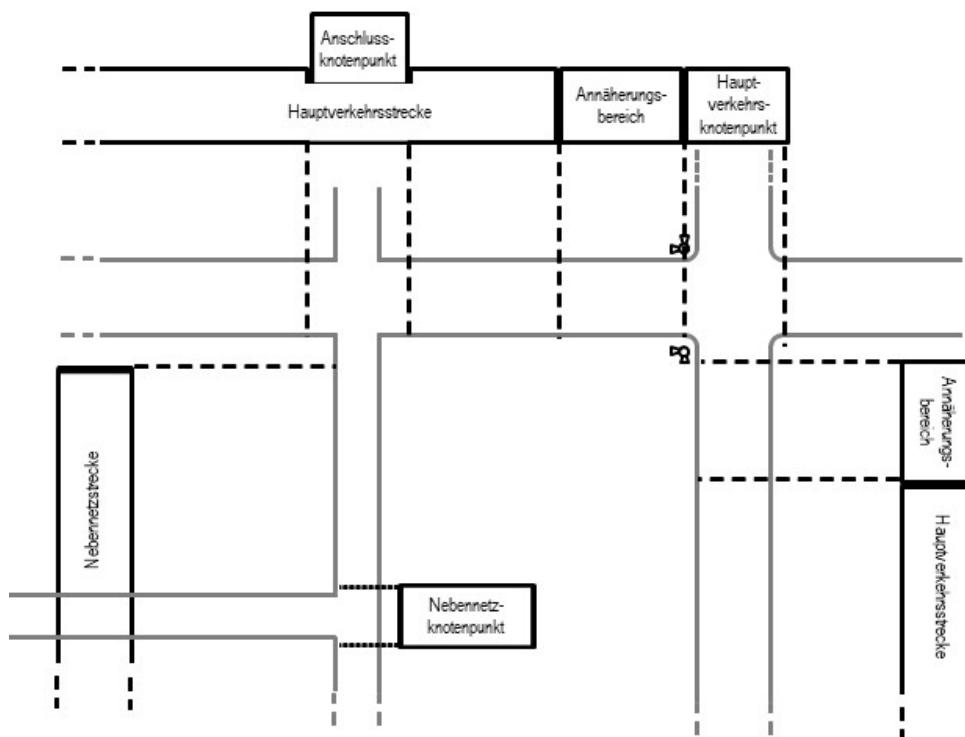


Abbildung 6: Differenzierung der Netzelemente (eigene Darstellung)

3.2.2 Attribute Strecken

Für die Streckenabschnitte (charakterisiert durch Polygone, siehe Abschnitt 3.2.1) werden Informationen zu baulichen und betrieblichen Eigenschaften gemäß Tabelle 5 erhoben, aufbereitet und in der Datenbank hinterlegt. Für die Verkehrsflächen werden auf Grundlage der Literaturanalyse (vgl. Abschnitt 2.3) und weiterer Überlegungen Attribute entweder je Fahrtrichtung (FR) oder für den gesamten Querschnitt (QS) erfasst.

Tabelle 5 Attribute und Ausprägungen für Streckenelemente

	Merkmal	QS/FR	Einheit/Ausprägungen	Bemerkung
Infrastruktur	nutzbare Fahrbahnbreite	FR	m	Zwischen Mittelmarkierung, Fahrbahn oder baulicher Mitteltrennung und ruhendem Verkehr oder Schutzstreifen für den Radverkehr
	Anzahl der Fahrstreifen	FR	-	
	Mitteltrennung	QS	Keine Markiert Baulich	
	Radverkehrsführungsform	FR	Mischverkehr Mischverkehr mit Schutzstreifen Radfahrstreifen Radweg (mit/ohne Benutzungspflicht) Gemeinsamer Geh- und Radweg Selbstständige gemeinsame Geh- und Radwege Selbstständige getrennte Geh- und Radwege Selbstständige Gehwege (auch FGZ) Fahrradstraße	Bei nicht benutzungspflichtigen Anlagen jeweils mit möglichem Zusatz „Radfahrende frei“
	Breite Radverkehrsführung	FR	m	Bei Schutzstreifen, Radfahrstreifen, Radweg, und gemeinsamen Geh- und Radwegen
	Breite Sicherheitstrennstreifen zu ruhendem Verkehr	FR	m	Bei Schutzstreifen, Radfahrstreifen
	Abstand Radweg – Fahrbahn/ruhender Verkehr	FR	m	Bei Radwegen und gemeinsamen Geh- und Radwegen
	Oberfläche	FR	Asphalt Pflaster Kopfsteinpflaster Natur, gebunden (Schotter) Natur, ungebunden (Waldboden)	auf der Radverkehrsanlage bzw. im Mischverkehr auf der Fahrbahn (bei freigegebenen Seitenräumen wird die Oberfläche auf der Fahrbahn erfasst)
	Gleise im Mischverkehr	QS	Vorhanden Nicht vorhanden	
	Art des ruhenden Verkehrs	FR	Nicht vorhanden Längs Schräg Senkrecht Kombination	
	Lage des ruhenden Verkehrs	FR	Nicht vorhanden Fahrbahn Fahrbahn markiert Fahrbahn baulich Seitenraum Fahrbahn/Seitenraum Mittellage	
	Länge ruhender Verkehr	FR	m	Auf dem Streckabschnitt
	Längsneigung	FR	%	
	Anzahl Querungsanlagen	QS	Fahrbahnteiler/bauliche Mitteltrennung Vorgezogene Seitenräume Fußgänger-LSA Fußgängerüberweg	
	Anzahl Haltestellen ÖV	QS	-	
Betrieb	Anzahl Grundstückzufahrten	FR	-	Wohnen Geschäftlich (auch Einzelstellplätze)
	Straßenklasse	QS	Hauptverkehrsstraße andere	
Exposition	Zulässige Geschwindigkeit	FR	km/h	
	Umfeldnutzung	FR	%	
	Länge Streckenabschnitt	QS	m	
	Proxy Zufußgehende	QS	POI/m	Siehe Abschnitt 3.3
	DTV Kfz	QS	Kfz/Tag	
	DTV Rad	QS	Rad/Tag	

Die Erhebung der infrastrukturellen Merkmale erfolgt über Luftbilder. Die angegebenen Breiten werden mittels Längenmessung in den Luftbildern entsprechend der Definition der Regelwerke der FGSV gemessen (z. B. bezüglich der Markierung von Radverkehrsanlagen). Dabei werden die Messungen aus dem Koordinatenbezugssystem WGS84/Pseudo Mercator vorgenommen, dem ein Messfehler von 0,7 % (der Länge) unterliegt. Insbesondere geringe erfasste Breiten können somit Messfehlern bzw. Messungenauigkeiten unterliegen.

Die Längen der Strecken selbst wurden so bestimmt, dass Längenanteile der Knotenpunkte aus der (Strecken-)Längenermittlung extrahiert werden. Diese befinden sich zwar innerhalb des Streckensegmentes, gehören aber zu einem Anschlussknotenpunkt oder Nebennetzknotenpunkt.

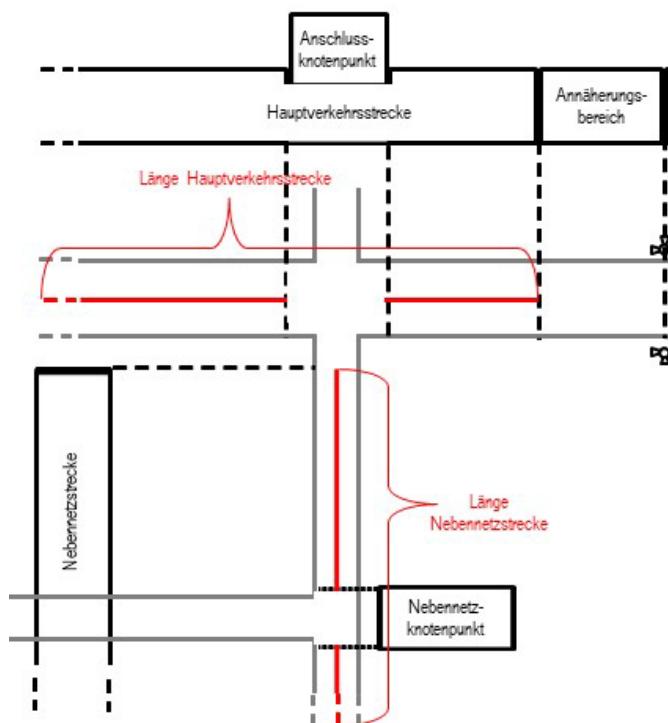


Abbildung 7 Schematische Darstellung zur Ermittlung der Streckenlängen

Die Radverkehrsführungsform kann nur teilweise aus Luftbildern erhoben werden. Informationen zu gemeinsamen Geh- und Radwegen und zu für den Radverkehr freigegebenen Gehwegen werden aus dem Verkehrszeicheninformationsdienst cardo der Stadt Dresden entnommen.

Zur Bestimmung der Längsneigung der Straßenkanten wird ein digitales Geländemodell (DGM) mit einer hochauflösenden Maschenweite von 2 m verwendet.³ Für die weitere Analyse wird sowohl die maximale wie auch die durchschnittliche Längsneigung pro Straßenkante berechnet.

Informationen zu Haltestellen und zulässigen Höchstgeschwindigkeiten werden aus OSM-Daten generiert.

Da die Erhebung der Strecken auf Basis von Polygonen (und nicht von Kanten) vorgenommen wurde, musste weiterhin ein Ansatz zum Bestimmen der Längen definiert werden (da dies aus der geometrischen Form Rechteck nur bedingt und aus anderen geometrischen Formen nicht möglich ist). Um die Längen zu ermitteln, wurde in jedes Streckenelement eine Kante eingefügt, die im Mittel dem Streckenverlauf folgt (siehe Abbildung 7).

Um die Umfeldnutzung im Straßenraum zu charakterisieren, wird auf frei verfügbare Flächendaten der Stadt Dresden zurückgegriffen.⁴ Dabei handelt es sich um eine das gesamte Stadtgebiet umfassende erweiterte

³ Das Geoportal des Staatsbetriebs Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) stellt die Daten kostenfrei zur unter <https://www.geodaten.sachsen.de/downloadbereich-dgm2-4164.html> zur Verfügung.

⁴ Die Daten sind über das OpenData-Portal der Stadt Dresden verfügbar - <https://opendata.dresden.de/DreiD/>.

Blockkarte (EBK). In der EBK sind Flächen entlang von Nutzungsarten voneinander getrennt (Pippig 2010, 36 f.), wodurch sie sich für die Generierung von Informationen für die Umfeldnutzung eignen. Die Straßen des städtischen Verkehrsnetzes sind nicht Teil der EBK.

Da die EBK die Flächennutzung sehr detailliert, aber teils zu kleinteilig, ausweist, werden die Nutzungsarten aufbauend auf der gewählten Klassifizierung nach Pippig (2010, Anhang C, S. 245 ff.) weiter zusammengefasst und kategorisiert. Aus der Aggregation ergeben sich die folgenden Nutzungsarten:

- Wohngebiete
- Grünflächen
- Gewerbegebiete
- Mischnutzung
- Industrie
- Sonstige oder keine Angabe

Sie sollen die Umfeldnutzung exemplarisch darstellen. Der Aggregationsschlüssel, mit dem die unterschiedlichen Nutzungsarten zusammengefasst werden, ist in Anlage 1 detailliert dargestellt.

Die Verschneidung der Flächeninformationen mit dem Straßennetz erfolgt mittels einer beidseitig räumlichen Linierverschiebung der Straßenkanten und der Berechnung der Überlappung mit den jeweiligen Nutzungsarten. Schematisch ist das Ergebnis in Abbildung 8 dargestellt. Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, eine seitenabhängige Umfeldnutzung abzubilden.

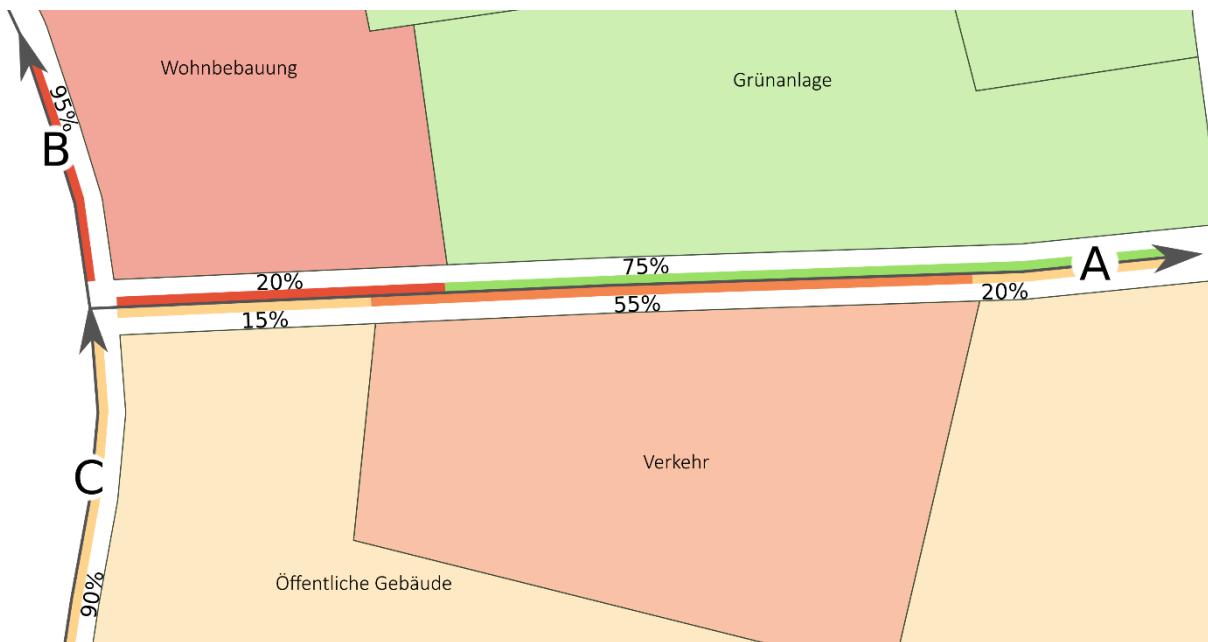


Abbildung 8 Schematisches Vorgehen der Verschneidung mit der Umfeldnutzung

3.2.3 Attribute Knoten

Knotenpunkte im Netz werden nach Abschnitt 3.2.1 in HVKP, AKP (Nebennetz mit Hauptverkehrsnetz) und NKP differenziert. Für die HVKP und alle weiteren Knotenpunkte, für die differenzierte Verkehrsstärken des Rad- und motorisierten Verkehrs vorliegen, werden die Eigenschaften in Tabelle 6 erfasst. Dabei werden einige Merkmale für den gesamten Knotenpunkt (KP) und einige Merkmale zufahrtsfein (ZF) erhoben.

Für die AKP und NKP wird im ersten Schritt der Unfallanalyse vorerst die Anzahl der in diesen Bereichen auftretenden Unfälle geprüft und anschließend eine differenzierte Sicherheitsbewertung und somit auch Datenerhebung für diese Knotenpunktformen festgelegt.

Die Erhebung der Attribute erfolgt auf Basis von Luftbildern und Befahrungen.

Tabelle 6 Attribute und Ausprägungen Knotenelemente

	Merkmal	KP/ZF	Einheit/Ausprägungen	Bemerkung
Infrastruktur	Knotenpunktform	KP	Einmündung Kreuzung Sonderform	Aus Anzahl Zufahrten
	Übergeordnete Straße	ZF	Hauptrichtung Nebenrichtung	Aus vorfahrtsregelnden Verkehrszeichen
	Kreuzungswinkel	KP	80-100 gon/<80	
	Anzahl der Fahrstreifen	ZF	-	Gesamt Davon: Misch-, Linksabbiege-, Geradeaus-, Rechtsabbiege-, Bussonderfahrstreifen
	Radverkehrsführung in der Annäherung	ZF	siehe Tabelle 5	
	Absetzung Radverkehrsfurt im Knotenpunkt	ZF	m	Abstand zwischen Fahrbahnrand und Radverkehrsfurt
	Roteinfärbung Radfahrfurt	ZF	Ja/nein	
	Radverkehrsführung Linksabbiegende	ZF	keine/Mischverkehr direkt indirekt	
	Ausrundungsradius	ZF	m	
	Haltestellen	KP	Keine Bushaltestellen Straßenbahnhaltestellen Bus- und Straßenbahnhaltestellen	Wenn < 50 m
Betrieb	Abstand ruhender Verkehr zum Knotenpunkt	ZF	m	Wenn < 50 m
	Verkehrsregelungsart	KP	Recht-vor-Links Verkehrszeichengeregt (Z205) Verkehrszeichengeregt (Z206) Teil-LSA LSA Kreisverkehr	
	Signalisierung Linksabbiegende Kfz	ZF	Nicht gesichert Gesichert	
	Signalisierung Rechtsabbiegende Kfz	ZF	keine separate Signalisierung (2-feldig) separate Signalisierung (3-feldig) Dreiecksinsel ohne LSA Dreiecksinsel mit LSA	
	Abbiegeverbote Kfz	ZF	Keine Rechts Links Geradeaus links und rechts	
	Grünpfeil (Z720)	ZF	Ja Nein	
	Signalgeber Radverkehr	ZF	mit MIV eigener Signalgeber Fuß/Rad-Kombischeibe	

3.3 Exposition

Für die Exposition des motorisierten Verkehrs und des Radverkehrs wurden drei Eingangsdatensätze verarbeitet:

- Knotenstromzählungen für Verkehrsstärken des Rad- und Kfz-Verkehrs an Knotenpunkten und Strecken
- Verkehrsmengenkarte der Stadt Dresden für Verkehrsstärken des Kfz-Verkehrs an Strecken
- MOVEBIS-Datensätze für Verkehrsstärken des Radverkehrs an Strecken.

Die detailliertesten Datensätze zur Exposition stellen die Knotenstromzählungen dar, die durch das Straßen- und Tiefbauamt der Stadt Dresden zur Verfügung gestellt wurden. Die Daten umfassen Zählungen des Kfz-Verkehrs inkl. des Schwerverkehrs und des Radverkehrs, welche in Kurzzeitzählungen in den Jahren 2017 bis 2019 erhoben wurden. Die Verkehrsstärken liegen stromfein für die Zufahrten an 136 Knotenpunkten vor. Abbildung 9 zeigt beispielhaft eine Knotenstromzählung für einen Knotenpunkt im Kollektiv. Dabei liegen die Verkehrsstärken des Radverkehrs (links) an jedem Knoten für einen Vormittags- und einen Nachmittagszeitraum über 5 h und jeweils für die Spitzenstunde des Zeitraums vor. Die Verkehrsstärken des motorisierten Verkehrs wurden über denselben Zeitraum erhoben und liegen ebenso für die Zählstunden, Spitzenstunden und als hochgerechnete DTV-Werte vor (siehe Abbildung 9, rechts). Die Daten enthalten in Klammern auch die Verkehrsstärke des Schwerverkehrs.

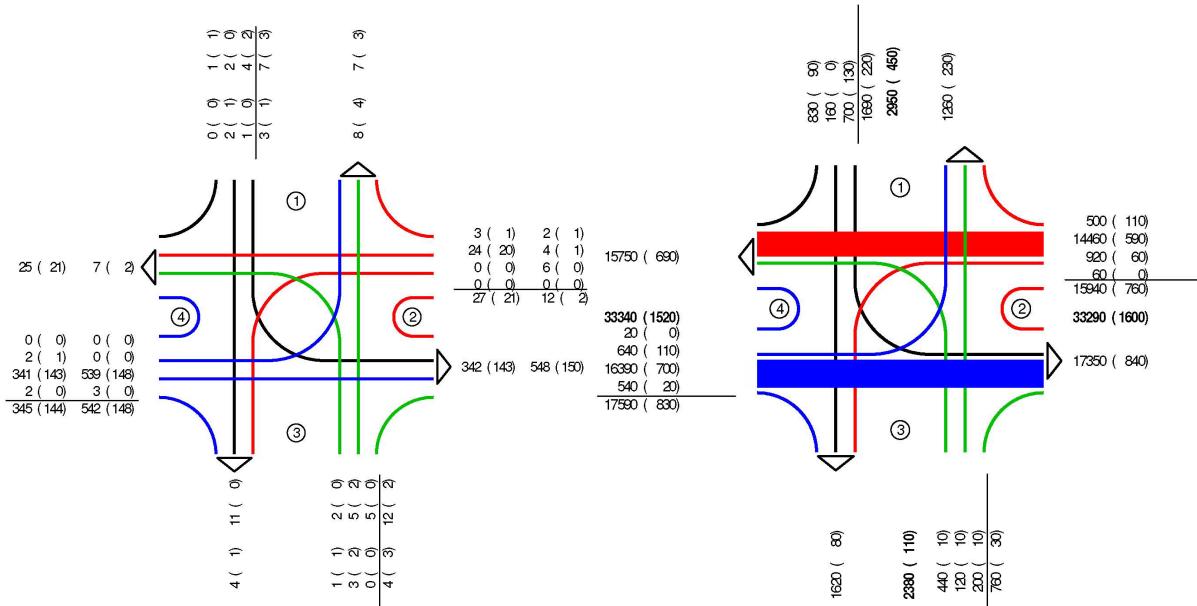


Abbildung 9 Knotenstromzählung des Radverkehrs (links) und motorisierten Verkehrs (rechts) (Straßen- und Tiefbauamt Dresden)

Für die Hochrechnung der Radverkehrsstärken wurden für Dresden spezifische Stunden-, Tages-, und Monatsganglinien aus sieben Dauerzählstellen analysiert und aus diesen Faktoren für die Hochrechnung der Radverkehrsstärken ermittelt. Mittels dieser (multiplikativ verknüpften) Hochrechnungsfaktoren wurden die Spitzenstundenwerte aus den Knotenstromzählungen zu durchschnittlich täglichen Belastungen hochgerechnet.

Um die Daten für die weiteren Arbeitsschritte nutzbar zu machen, wurden die Knotenpunkte der Knotenpunktzählungen zuerst in dem aufbereiteten georeferenzierten Netz (siehe Abschnitt 3.2.1) identifiziert, lokalisiert und anschließend die Verkehrsstärkewerte (Linksabbiegende, Geradeausfahrende, Rechtsabbiegende, Gesamt Zufahrende jeweils für Kfz-, Schwer und Radverkehr) den einzelnen Zufahrten zugewiesen.

Die Zuweisung der Verkehrsstärken aus den Knotenpunkttdaten auf die Strecken erfolgt durch das Übertragen der Querschnittsbelastung (Gesamt Zu- und Ausfahrende) einer Zufahrt auf die anliegende Strecke. Die Verkehrsstärken wurden dabei von einem Knoten auf den Streckenzug bis zum nächsten HVKP übertragen, da anzunehmen ist, dass sich die Verkehrsstärken des Kfz-Verkehrs zwischen zwei HVKP nicht maßgeblich ändern. Die Ergebnisse dieser Methode wurde mittels Verkehrsmengenkarte der Stadt Dresden überprüft. Im Ergebnis

entsprechen die von den Knoten übertragenen Verkehrsstärken des Kfz-Verkehrs denen der Verkehrsmengenkarte. Dieser Vergleich zeigt auch, dass die Verkehrsmengen des Kfz-Verkehrs in der Verkehrsmengenkarte durch diese auf Basis der Knotenstromzählungen ermittelt werden. Diese einheitliche Datenbasis ermöglicht die Zuweisung von Verkehrsstärken aus der Verkehrsmengenkarte an weitere Strecken des Untersuchungskollektivs, welche nicht an den untersuchten Knotenpunkten liegen. Dies sind vorwiegend Strecken, deren Verkehrsmengenzählung in den Jahren 2015 und 2016 durchgeführt wurden, da für diese Strecken keine Knotenstromzählungen vorliegen, aber Verkehrsstärken in der Verkehrsmengenkarte ausgewiesen sind. Zählwerte, die älter als 2015 sind, werden in der Untersuchung nicht betrachtet.

Neben den Kfz-Verkehrsstärken werden auch die Radverkehrsstärken für die Analyse benötigt. Da für das Untersuchungsgebiet nur punktuelle Daten zu den Radverkehrsstärken vorliegen (z. B. aus Knotenstromzählungen oder von den Dauerzählstellen), wird auf einen an der TU Dresden vorliegenden Datensatz zurückgegriffen, der eine stadtweite Darstellung der Radverkehrsstärken zulässt. Bei dem Datensatz handelt es sich um einen GPS-Datensatz mit rund 20.000 Fahrten von 1.300 Radfahrer*innen, die ihre Wege per App während der Aktion STADTRADELN 2019 aufgezeichnet haben. Die Stichprobe deckt das gesamte Verkehrsnetz der Stadt Dresden ab (siehe Abbildung 10) und eignet sich daher gut für die Abbildung der stadtweiten Radverkehrsstärken.

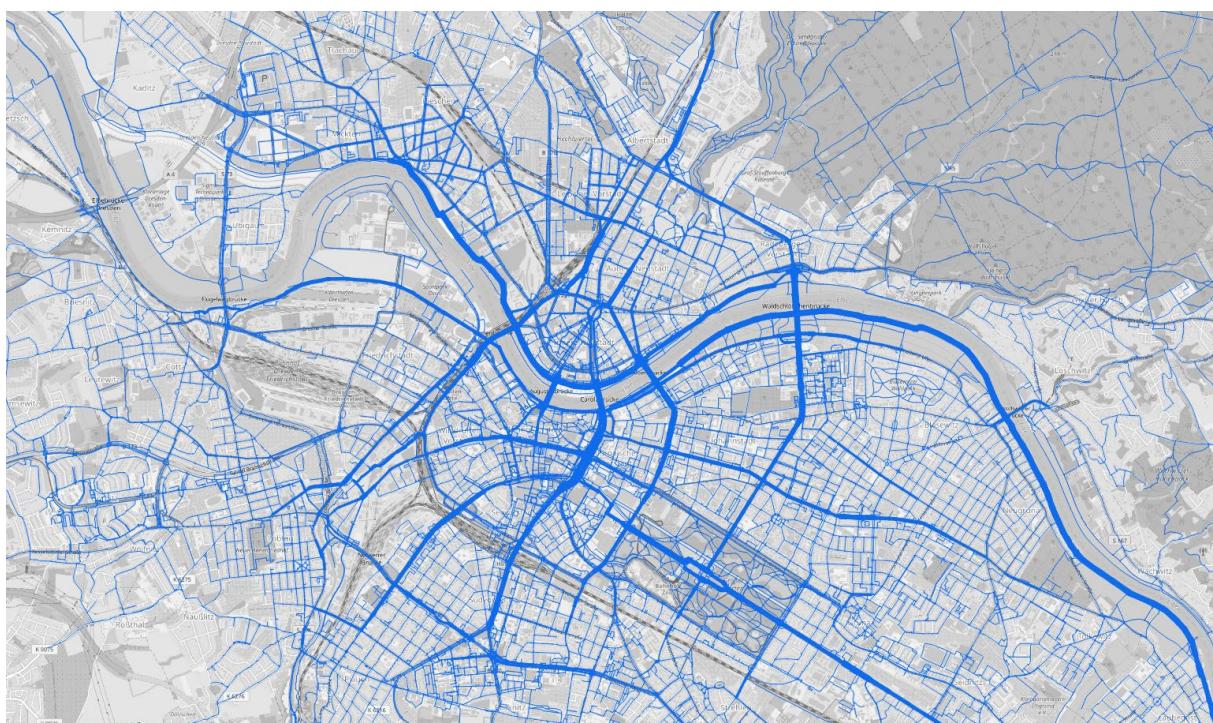


Abbildung 10 Netzabdeckung der MOVEBIS-Daten (Kartengrundlage: OpenStreetMap)

Die Daten können nur dann für die Analyse genutzt werden, wenn die für die Netzelemente berechneten Verkehrsstärken ein realistisches Abbild des Radverkehrs im Stadtgebiet darstellen. Aus diesem Grund wurde der Zusammenhang zwischen den Verkehrsstärken aus dem GPS-Datensatz und Referenzwerten aus Querschnittszählungen untersucht. Für die Analyse wurde an den Dauerzählstellen zunächst der durchschnittlich tägliche Verkehr (DTV) im Erhebungszeitraum berechnet und anschließend den Verkehrsstärken der GPS-Daten an diesen Querschnitten gegenübergestellt. Zu Bestimmung des Zusammenhangs wurde eine lineare Regressionsanalyse in SPSS (Version 27) durchgeführt. Die Ergebnisse weisen einen starken und hoch signifikanten linearen Zusammenhang zwischen den beiden Datensätzen auf ($R^2 = 0,83$; $\text{sign.} = 0,00$). Aus den Analyseergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass ein statistischer Zusammenhang zwischen den GPS-Daten und den Referenzdaten besteht. Dieser Zusammenhang ist vor allem bei hohen Verkehrsstärken – also an Querschnitten mit hohen Radverkehrsmengen – gesichert. Abbildung 11 verdeutlicht den Zusammenhang grafisch.

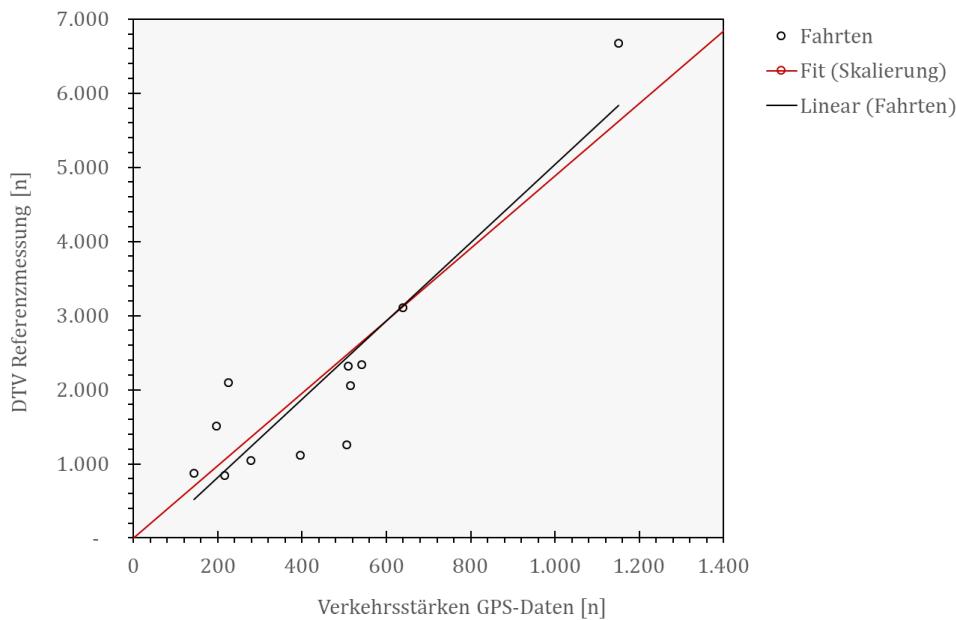


Abbildung 11 Gegenüberstellung der Verkehrsstärken der Referenz- und GPS-Daten (MOVEBIS)

Die aus der Analyse resultierende Regressionsgleichung ($y = 5,2801 \cdot X - 237,35$) kann jedoch nicht direkt für das Hochskalieren der Fahrten auf den DTV genutzt werden, weil sich, bedingt durch den zweiten Term der Gleichung, bei deren Anwendung auf die Verkehrsstärken aus den GPS-Daten negative Werte (z.B. bei null Fahrten) ergeben könnten. Daher muss die Regressionsgerade im Nullpunkt fixiert werden (rote Gerade in Abbildung 11). Dadurch ergibt sich ein Skalierungsfaktor von SF = 4,89, der für die Skalierung der Radverkehrsstärken auf den DTV genutzt wird. Im Ergebnis liegen für alle Strecken im Verkehrsnetz Werte zum DTV des Radverkehrs vor.

Als weiterer Aspekt des Umfeldgeschehens wurde versucht, das Fußverkehrsaufkommen mit Hilfe eines Proxys abzubilden. Als Proxy dienen hierbei Verkehrserzeuger in Form von öffentlichen Gebäuden, Geschäften des täglichen Bedarfs, soziale und kulturelle Einrichtungen sowie weitere Serviceeinrichtungen. Das Openstreetmap-Projekt bietet auch in diesem Fall einen flächendeckenden Datensatz an unterschiedlichen points-of-interest (POI). Dieser wurde für das Stadtgebiet der Landeshauptstadt Dresden mittels der thematischen Attribute nach den genannten verkehrserzeugenden Einrichtungen gefiltert. Im OSM-Projekt sind das in diesem Fall die Attribute *Shop* und *Amenity*. Ersteres klassifiziert den jeweiligen POI als Geschäft für Waren oder Dienstleistungen. Letzteres enthält ein breiteres Spektrum an Ausprägungen, weshalb diese nochmals anhand für die Untersuchung relevanter Einrichtungen gefiltert wurde. Das Ergebnis sollte die Menge an verkehrserzeugenden Einrichtungen je Streckenabschnitt sein. Um die unterschiedlichen Längen der Netzkanten zu kompensieren, wurde die Menge an POIs zur Vereinheitlichung ins Verhältnis zur Länge des jeweiligen Streckenabschnitts gesetzt. Die Menge an POI je Streckenabschnitt bestimmte sich aus der räumlichen Nähe zum POI und wurde explorativ auf einen Radius von 50 Metern um die Netzkante festgesetzt. Das Ergebnis für den Dresdner Innenstadtbereich ist in Abbildung 12 dargestellt. Für die Analyse wurde die Menge an POIs je Meter Streckenabschnitt den Klassen niedriges, mittleres und hohes Fußverkehrsaufkommen zugeteilt. Zu berücksichtigen ist, dass es sich bei diesem POI-Ansatz um einen sehr ungefähren Proxy für die Abschätzung des tatsächlichen Fußverkehrsaufkommens handelt und vor allem geschäftsreiche Fußgängerzonen abbildet.

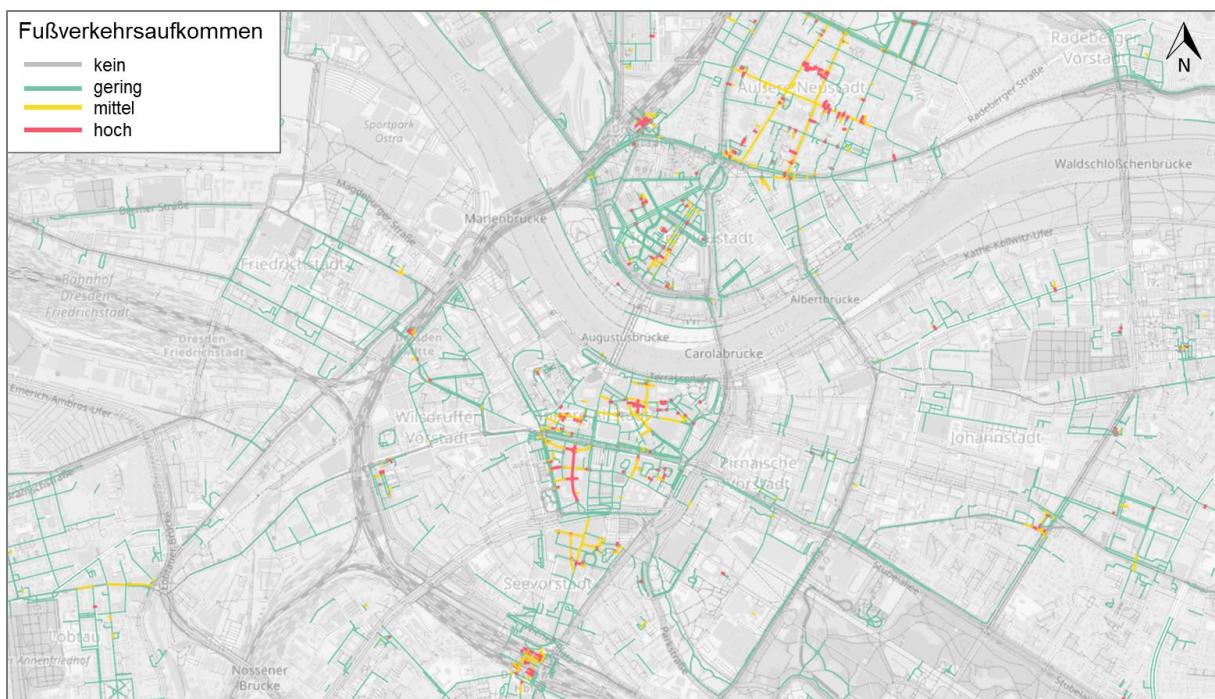


Abbildung 12 Relatives Fußverkehrsaufkommen im Innenstadtbereich (rote Schattierung) anhand von POIs (Kartengrundlage: OpenStreetMap)

3.4 Unfalldaten

Für die Bewertung der Verkehrssicherheit ist die Betrachtung der Unfalldaten für einen 5-Jahres-Zeitraum vorgesehen, da der Mindestauswertezeitraum laut FGSV (2012b) bei 3 Jahren liegt, die Betrachtung eines größeren Zeitraums jedoch die Kollektivgröße und damit die Aussagekraft der Untersuchung erhöht. Die Begrenzung auf 5 Unfalljahre wird gewählt, um Einflüsse verkehrlicher und baulicher Veränderungen auf die Unfallanzahl zu minimieren.

Das Unfallkollektiv beschreibt alle Unfälle, die in der Stadt Dresden (Gemeindeschlüssel: Dresden) im Zeitraum 01.01.2015 bis 31.12.2019 mit der Verkehrsbeteiligung Radfahrender polizeilich erfasst wurden. Die Datenabfrage erfolgt dabei über die Datenbank EUSKa. In diesem Zeitraum wurden insgesamt 6606 Unfälle registriert.

Um den Unfällen spezifische Unfallkonstellationen zuweisen zu können, wird für die auf den zu untersuchenden Infrastrukturelementen liegenden Unfälle über den Unfalltext der dreistellige Unfalltyp laut FGSV (2012b) ermittelt. Die Zuweisung zu den Infrastrukturelementen erfolgt über die Polygone (Strecken, Knotenpunkte, Annäherungsbereiche; siehe Abschnitt 3.2.1). Dabei werden an den Strecken auch die Unfälle an Anschluss- und Nebennetzknotenpunkten über deren Geometrie gefiltert, sodass das Unfallgeschehen an Knoten nicht im Streckendatensatz beachtet wird.

Unfälle an Knotenpunkten werden darüber hinaus der Zufahrt zugeordnet, aus der die Unfallverursachenden kamen. Auf Basis der deskriptiven Unfallanalyse (Unfallstruktur, Unfallbeteiligung, Unfallschwere etc.) werden Kollektive gebildet, die in den Unfallmodellen betrachtet werden und zur Definition der Teilmodelle dienen.

3.5 Kritische Situationen

Die Feldstudie im Rahmen des NRVP-Projektes RadVerS fand im Mai und Juni 2018 statt (Becker et al. 2020). Mögliche Teilnehmende wurden über die vorangegangene Onlinebefragung akquiriert. Neben der Aufzeichnung ihrer Radfahrten über eine Tracking-App wurden die Teilnehmenden gebeten, während der zweiwöchigen Erhebung ein Mobilitätstagebuch auszufüllen. Dabei wurden die Teilnehmenden u. a. täglich gefragt, ob Sie eine oder mehrere kritische bzw. gefährliche Situationen erlebt oder bestimmte Streckenabschnitte vermieden haben. Wurden diese Fragen bejaht, wurde nach der Art der kritischen Situation gefragt (Behinderung/Konflikt/Beinahe-

Unfall vs. Unfall/Zusammenstoß), siehe Abschnitt 3.5. Abschließend wurden die Teilnehmenden um die Angabe von Uhrzeit und Örtlichkeit gebeten. Dabei konnten pro Tag auch mehrere kritische oder gefährliche Situationen berichtet werden. Anhand der Angaben zu Zeit und Ort wurden die erhobenen kritischen Ereignisse der 192 Teilnehmenden aus Dresden anschließend in QGIS verortet und daneben zu jedem Ereignispunkt die Art der kritischen Situation sowie der Probandencode hinterlegt.

Bitte wählen Sie aus, was für eine kritische Situation Sie heute erlebt haben:

- Ein Fußgänger ist mir vor das Fahrrad gelaufen.
- Ich musste einem Gegenstand oder Auto auf dem Radweg ausweichen.
- Ein Radfahrer hat mir die Vorfahrt genommen.
- Ein Autofahrer hat mir die Vorfahrt genommen.
- Ein Radfahrer hat mich zu dicht überholt.
- Ein Autofahrer hat mich zu dicht überholt.
- Vor mir wurde plötzlich eine Autotür aufgerissen.
- Ein Autofahrer hat mich beim Rechtsabbiegen übersehen.
- Ich bin mit dem Fahrrad (beinahe) in Straßenbahnschienen stecken geblieben.
- Ein Auto kam kurz vor mir plötzlich aus einer Ausfahrt.
- Ein Auto fuhr plötzlich kurz vor mir in eine Einfahrt.

Sonstiges:

Abbildung 13 Fragebogen-Item zur Art der erlebten kritischen Situation (Einfachauswahl), aus Mobilitätstagebuch des RadVerS-Projektes

3.6 Daten: Vereinfachte Modelle

GPS-Trajektorien: Primärdatenerhebung und Datenaufbereitung Routenwahl

Um die Routenwahl in den anderen Pilotkommunen analysieren zu können, sind Routendaten für diese Stadtgebiete notwendig. Daher wurde auf Routendaten aus einer Datenerhebung zurückgegriffen, die im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geförderten Forschungsprojekt „MOVEBIS – Nutzung Auswertung von Crowdsourced-Daten zur Verbesserung der kommunalen Fahrradinfrastruktur“ realisiert wurde.

Die Datenerhebung erfolgte im Rahmen der Aktion STADTRADELN im Jahr 2019 (Stadtradeln 2020). Das STADTRADELN ist eine Kampagne, die seit dem Jahr 2008 vom Klima-Bündnis durchgeführt wird. Das Klima-Bündnis ist ein Netzwerk bestehend aus rund 1.700 Städten, Gemeinden und Landkreisen, die gemeinsam den kommunalen Klimaschutz vorantreiben möchten. Ein wesentliches Ziel ist öffentlichkeitswirksame Arbeit und Unterstützung aktiver Mobilität als eine Maßnahme im Kampf gegen den Klimawandel (Klima-Bündnis 2020). Im Rahmen der Aktion STADTRADELN, die jedes Jahr im Zeitraum vom 1. Mai bis 30. September stattfindet, wird in den teilnehmenden Kommunen für einen dreiwöchigen Zeitraum zur Nutzung des Fahrrads auf Alltagswegen aufgerufen. Die Aktion STADTRADELN findet in einem Zeitraum statt, der nach den Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE) für die Datenerhebung empfohlen wird. Darin werden „jahresmittlere“ Monate (März bis Oktober) für die Erhebungen im Radverkehr empfohlen (FGSV 2012a).

Das STADTRADELN fand in Darmstadt und München im Jahr 2019 jeweils im Juni/Juli statt. Die dreiwöchige Datenerhebung wurde damit in sog. Normalwochen durchgeführt. Dies sind Wochen, die nicht durch besondere Ereignisse geprägt sind und die daher für Erhebungen des üblichen Verkehrsverhaltens gewählt werden sollten. Die Motivation der teilnehmenden Radfahrer*innen ist es, in den drei Wochen möglichst viele Wege mit dem Fahrrad zurückzulegen und so, im Vergleich zur Nutzung des Pkw, Wege möglichst CO₂-frei zurückzulegen.⁵ Zur

⁵ Eine große Umfrage zum Mobilitätsverhalten der Teilnehmenden vor, während und nach der Kampagne hat ergeben, dass der Einfluss der Kampagne auf die Nutzungshäufigkeit oder die Fahrleistung insgesamt als eher gering einzuschätzen ist. Während bspw. 65% der Teilnehmenden für ihre Arbeitswege angaben, diese genauso häufig zurückzulegen wie außerhalb des Kampagnenzeitraums, nutzten 19% der Befragten das Rad seltener für Arbeitswege und 16% häufiger. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass im Rahmen der Aktion STADTRADELN das alltägliche Verkehrsverhalten der Teilnehmer*innen erfasst und abgebildet wird. Siehe dazu Lüßner et al. 2021.

Aufzeichnung der mit dem Fahrrad zurückgelegten Wege wurde vom Klima-Bündnis eine App für Smartphones der Betriebssysteme Android und iOS bereitgestellt. Die am STADTRADELN teilnehmenden Bürger*innen konnten sich die STADTRADELN-App in den entsprechenden Stores (App-Store von Apple bzw. Play-Store von Google) herunterladen und damit während des Kampagnen-Zeitraums ihre Fahrten aufzeichnen.

Abbildung 14 zeigt die Nutzeroberfläche der STADTRADELN-App. Die Aufzeichnung kann zu Beginn einer Fahrt durch die Radfahrenden über den grünen Play-Button (siehe mittlere Abbildung) gestartet und am Ende der Fahrt über den gleichen Button beendet werden. Nach Aufzeichnungsende wird die gefahrene Route angezeigt (siehe Abbildung rechts), die geradelten Kilometer dokumentiert und der GPS-Track hochgeladen.

Um an der Aktion STADTRADELN teilnehmen zu können, mussten sich die Radfahrenden vorab auf der Website des STADTRADELN oder über die STADTRADELN-App registrieren. Sowohl bei der Registrierung als auch während der Aufzeichnung der gefahrenen Routen wurden Daten erhoben, die für die Arbeit von großer Relevanz sind. Zum einen wurden personenbezogene Daten der Teilnehmenden erhoben, die für die Registrierung und Teilnahme am STADTRADELN sowie die Nutzung der App notwendig waren. Es wurden neben Vor- und Nachname bspw. auch Alter, Geschlecht und Kommune bei der Registrierung abgefragt. Die Informationen zu Alter, Geschlecht und Kommune sind für die vorliegende Arbeit von besonderer Bedeutung. Die Daten lassen einerseits eine Beschreibung der Teilnehmenden zu. Andererseits können die Daten über einen Identifikator (eindeutige ID) mit den aufgezeichneten Routen verknüpft werden. Die Erhebung dieser Daten erfolgte bei der Registrierung der Nutzer*innen über die STADTRADELN-Website bzw. STADTRADELN-App. Die Daten wurden durch die Teilnehmenden selbst eingegeben.

Darüber hinaus wurden über die Aufzeichnungskomponente der App eine Vielzahl von Daten erhoben, die von den im Smartphone verbauten Sensoren erzeugt werden. Dazu gehören GPS-Daten, mit denen die gefahrenen Routen räumlich verortet werden, sowie Daten weiterer Sensoren (bspw. des Beschleunigungssensors, des Magnetometers und des Gyroskops), die für die vorliegende Arbeit zu vernachlässigen sind. Durch das Einloggen der Teilnehmenden in der App konnten die Radfahrenden eindeutig mit dem Smartphone (Device-ID), mit dem sie ihre Strecken aufgezeichnet haben, verknüpft werden. Über die Device-ID einer aufgezeichneten Fahrt ist ein Rückschluss auf die Radfahrenden und ihre Eigenschaften (Alter und Geschlecht) möglich.

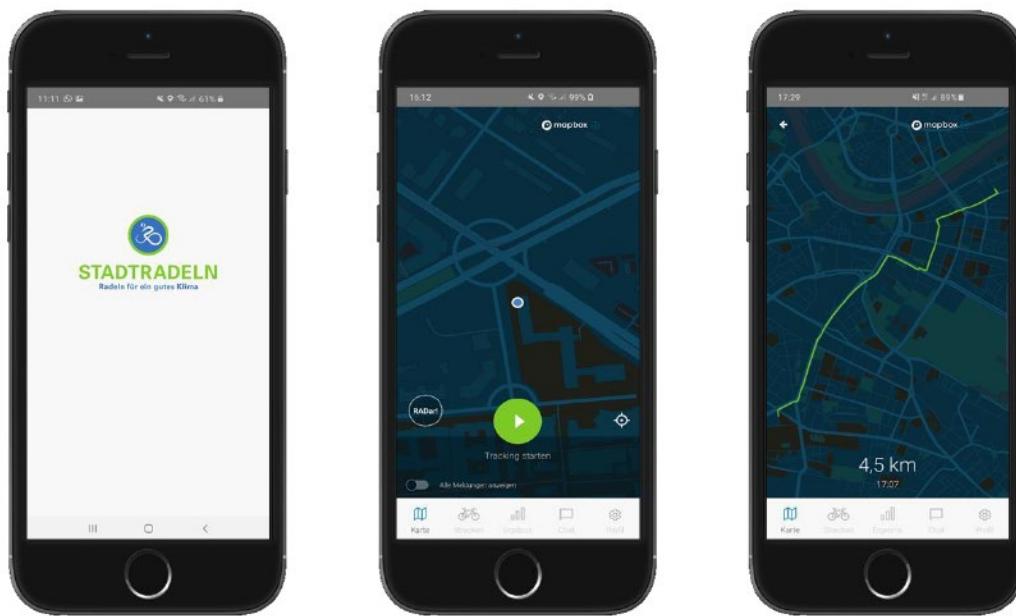


Abbildung 14 Screen-Design der STADTRADELN-App

Die Nutzer*innendaten wurden beim Klima-Bündnis gespeichert und lediglich in anonymisierter Form zu Forschungszwecken an die Technische Universität Dresden (TUD) übermittelt. Die vom Klima-Bündnis erhobenen und übermittelten Sensordaten wurden auf separaten Servern gespeichert, die von der TUD betreut wurden. Da es sich bei den erhobenen Daten um personenbeziehbare Daten handelt – vor allem die GPS-Daten lassen über

die Verortung von Fahrtbeginn und -ende das Herstellen eines Personenbezugs zu – mussten alle Proband*innen ihr Einverständnis bezüglich der Erhebung und Verarbeitung ihrer personenbezogenen Daten erklären.

Alle Prozesse mit Bezug zu personenbezogenen oder personenbeziehbaren Daten fanden entsprechend der datenschutzrechtlichen Vorgaben der Europäischen Union (EU-DSGVO), des Bundes (BDSG) und der Länder (HDSG, SächsDSG) statt. Zur Gewährleistung der Datensicherheit wurden angemessene personelle, technische und organisatorische Maßnahmen ergriffen, um eine den datenschutzrechtlichen Vorgaben nach Art. 5 und 32 EU-DSGVO, §9 BDSG, §10 HDSG und §10 SächsDSG entsprechende Datensicherheit zu gewährleisten.

Während der dreiwöchigen STADTRADELN-Kampagne im Juni/Juli 2019 wurden über die STADTRADELN-App umfangreiche Daten zum Radverkehr für **Darmstadt** erhoben. An der Aktion STADTRADELN haben sich im Kampagnen-Zeitraum knapp 1.454 Radfahrende beteiligt und dabei insgesamt eine Strecke von ca. 285.809 km zurückgelegt. Insgesamt haben in Darmstadt 391 Radfahrende ihre Wege mit der STADTRADELN-App aufgezeichnet. Der Anteil der App-Nutzenden an den insgesamt Teilnehmenden beträgt damit rund 26,9 %. Im Rahmen der Aktion STADTRADELN wurden 5.522 GPS-Tracks per App aufgezeichnet.

In **München** haben sich im Kampagnen-Zeitraum knapp 5.500 Radfahrende an der Aktion STADTRADELN beteiligt und dabei insgesamt eine Strecke von ca. 1.164.400 km zurückgelegt. Insgesamt haben in München 1.350 Radfahrende ihre Wege mit der STADTRADELN-App aufgezeichnet. Der Anteil der App-Nutzenden an den insgesamt Teilnehmenden beträgt damit rund 24,4 %. Im Rahmen der Aktion STADTRADELN wurden mehr als 22.000 GPS-Tracks per App aufgezeichnet und übermittelt.

Die Aufbereitung der erhobenen und übermittelten Daten erfolgte analog zur Aufbereitung der Routendaten aus Dresden (siehe Abschnitt 3.1.3).

Infrastruktur- und Betriebsdaten

Für die Infrastruktur- und Betriebsdaten sollen insbesondere Merkmale betrachtet werden, die den Kommunen zur Verfügung stehen, sodass die vereinfachten Modellversionen auch durch die Kommunen umsetzbar sind. Daher wurde für die Pilotkommunen ein Kurzfragebogen entworfen, welche Informationen diesen in welchem Format zur Verfügung stehen. Ergänzt wurden diese abgefragten Daten durch frei verfügbar Daten. Tabelle 7 zeigt die Übersicht der vorhandenen Datensätze. Die im Projekt verwendeten Datensätze sind jeweils unterstrichen. Hinsichtlich der Netzgrundlage zeigt sich, dass nicht jede Kommune über ein Verkehrsnetz verfügt, in OSM jedoch eine einheitliche Kartengrundlage gegeben ist. Kfz-Verkehrsstärken liegen in beiden Kommunen (teilweise) vor (siehe Abschnitt Exposition). In München liegt eine Hochrechnung für die Radverkehrsmengen vor, in Darmstadt jedoch nicht, weshalb in dem Projekt auf Hochrechnungen aus den MOVEBIS-Daten zurückgegriffen wurde. Die für die Routenwahlmodelle notwendigen Reisezeiten konnten, ebenso wie die Längsneigungen, aus den Routendaten ermittelt werden (mittels frei verfügbarer Digitaler Geländemodelle DGM).

Hinsichtlich Infrastruktur und Betrieb ergeben sich für Darmstadt und München verschiedene Datenverfügbarkeiten: In Darmstadt liegt eine Datentabelle zu Radverkehrsführungsform, Oberflächenbeschaffenheit, zulässiger Höchstgeschwindigkeit und Anordnung des ruhenden Verkehrs vor, welche durch die Initiative „Darmstadt fährt Rad“ erhoben wurden. Diese liegen jedoch nur für einen Ausschnitt des Netzes (503 Streckenabschnitte richtungsfein) vor. In München liegen für das gesamte Netz Informationen zur Radverkehrsführung vor, jedoch keine weiteren (in dem Projekt angefragten) Datensätze. Daher wurden für die Aufbereitung die Informationen zur Radverkehrsführung für Darmstadt aus der Datentabelle und für München aus der Flächennutzung bezogen, die fehlenden Strecken in Darmstadt wurden mittels Luftbild- und Befahrungsbilderanalyse nacherhoben. Die Anwendung von OSM-Daten wurde für dieses Attribut abgelehnt, da dieser Datensatz häufig Ungenauigkeiten aufweist.

Für die Standorte und Regelung von Knotenpunkten, Oberflächenbeschaffenheit und zulässige Höchstgeschwindigkeit wurden für eine einheitliche Datengrundlage OSM-Daten verwendet.

Informationen zum ruhenden Verkehr wurden in Darmstadt aus der Datentabelle bezogen (und durch Erhebungen ergänzt). In München liegen im Hauptverkehrsstraßennetz aus dem Projekt „Sicherheitskonzept München“ Informationen zum ruhenden Verkehr mit dem Stand 2016 vor, welche dem Datensatz hinzugefügt wurden.

Tabelle 7 Datenverfügbarkeit in den Vergleichsstädten München und Darmstadt

Daten	Darmstadt	München	Frei verfügbare/andere Quellen
Netz (Knoten & Kanten)	-	(aus Mengenkarten)	<u>OSM</u>
DTV Kfz	<u>(Belegungen Detektoren)</u>	<u>Verkehrsmengen</u>	-
DTV - Rad (eigentlich Knotenstromzählungen)	-	Radverkehrsmengen	<u>MOVEBIS</u>
Reisezeit bzw. Distanz	-	-	<u>Berechnung aus Routendaten</u>
Längsneigung (Steigungsdaten bzw. DGM notwendig)	-	-	<u>DGM30m</u>
Führungsform des Radverkehrs	<u>Datentabelle DarmstadtFährtRad</u>	<u>Flächennutzung</u>	(OSM)
Knotenpunkte und deren Verkehrsregelung	-	(x) nur LSA Knotenpunkte	<u>OSM</u>
Oberflächenbeschaffenheit bzw. Qualität des Fahrbahnbelauges	Datentabelle DarmstadtFährtRad		<u>OSM</u>
zulässige Höchstgeschwindigkeit des MIV	Datentabelle DarmstadtFährtRad	-	<u>OSM</u>
ruhender Verkehr	<u>Datentabelle DarmstadtFährtRad</u>	<u>(Sicherheitskonzept München)</u>	
Straßenbahngleise	-	-	<u>OSM</u>

Da die Attribute und Ausprägungen in den Kommunen (einschließlich Dresden) in unterschiedlichen Aggregationsebenen vorliegen, wurden diese für die vereinfachten Modelle im Sinne des „kleinsten gemeinsamen Nenners“ festgelegt. Tabelle 8 zeigt die vorliegenden Attribute und Ausprägungen der Netze. Für die Strecken und Knoten liegen jeweils die Verkehrsstärken des Kfz- sowie des Radverkehrs vor. Für die Knotenpunkte konnten neben der Verkehrsregelungsart (über OSM) keine Merkmale in den Kommunen akquiriert werden.

Für die Strecken konnte die Radverkehrsführung nach den Ausprägungen in Tabelle 8 bestimmt werden. Eine Differenzierung zwischen Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen ist hier nicht möglich, da in München nur dedizierte Radverkehrsanlagen als Flächen ausgewiesen sind und Schutzstreifen als Teil der Fahrbahn betrachtet werden.

Hinsichtlich des ruhenden Verkehrs gibt es Abschnitte ohne Informationen zu den Anlagen, sowie Abschnitte, auf denen kein ruhender Verkehr vorliegt, einseitig oder beidseitig geparkt wird. Die längenmäßige Betrachtung ist in der Aggregation nicht möglich, d.h., dass sowohl Abschnitte, über welche auf der gesamten Länge beidseitig geparkt wird, als auch Abschnitte, auf denen nur teilweise beidseitig geparkt wird, in dieser Klassifizierung eingeordnet wurden.

Informationen zu Straßenbahnschienen, zulässigen Höchstgeschwindigkeiten sowie Längen wurden aus OSM bzw. GIS übernommen.

Tabelle 8 Attribute und Ausprägungen der Netzgrundlage der vereinfachten Modelle

Attribut	Einheit/Ausprägung
Knotenpunkte	
ID	-
Stadt	-
DTV KFZ	Kfz/24h
DTV Rad	Rad/24h
Verkehrsregelungsart	LSA Verkehrszeichengeregelt
Strecken	
ID	-
Stadt	-
DTV KFZ	Kfz/24h
DTV Rad	Rad/24h
Führung Radverkehr	Mischverkehr (mit/ohne Schutzstreifen) Radfahrstreifen Radweg Gemeinsamer Geh- und Radweg Andere (unsymmetrische Führungen, Kombinationen)
ruhender Verkehr	keine Information kein einseitig beidseitig
Straßenbahnschienen	nicht vorhanden vorhanden
zulässige Höchstgeschwindigkeit	km/h
Länge	km

Exposition

Die Verkehrsstärken des Radverkehrs wurden für die vereinfachten Modelle über die drei Untersuchungskommunen mittels Daten der Erhebung im Stadtradeln und kommunalspezifischen Hochrechnungsfaktoren aus Radverkehrsduerzählstellen ermittelt.

Für die Kfz-Verkehrsstärken konnte in den Kommunen auf unterschiedliche kommunale Datenbanken zugegriffen werden:

- In Dresden konnte wie in den differenzierten Modellen die Verkehrsmengenkarte der Stadt Dresden für Verkehrsstärken des Kfz-Verkehrs an Strecken und deren halbierte Summe für Kfz-Verkehrsmengen an Knotenpunkten verwendet werden
- Für München liegen im Hauptverkehrsnetz Verkehrsmengen des Kfz-Verkehrs aus dem Verkehrsmodell 2019 vor. Diese wurden der Professur als georeferenzierte Daten zur Verfügung gestellt. Analog zu Dresden wurden die halbierten Streckensummen der Kfz-Verkehrsmengen als Knotenpunktverkehrsstärke ermittelt.
- In Darmstadt liegen keine Verkehrsmengendaten vor, jedoch kann über die Open-Data-Plattform der Stadt (<https://datenplattform.darmstadt.de/verkehr/apps/opendata/#/>) auf die Belegungen der Detektoren an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage zugegriffen werden. Hier wurden die historischen Daten im Zeitraum

01.01.2019 bis 31.12.2019 aggregiert und auf einen Tag heruntergerechnet. Da diese Methode erfordert, dass auf jedem Fahrstreifen einer Zufahrt Detektoren vorhanden sind (und diese über den Zeitraum eines Jahres unbeeinträchtigt detektieren), konnte hier nur für eine geringe Zahl an Knotenpunkten die Verkehrsstärke ermittelt werden. Zur Ermittlung der Streckenverkehrsstärken müssen wiederum an jeweils zwei Knotenpunkten (im räumlichen Zusammenhang) Detektoren über alle Fahrstreifen existieren, weshalb auch hier nur ein deutlich reduziertes Kollektiv betrachtet werden kann.

Unfalldaten

Um sowohl die Datenverfügbarkeit als auch Einheitlichkeit der Daten über die Untersuchungsstädte zu gewährleisten, wurden die Unfalldaten für die vereinfachten Modelle über den Unfallatlas des Statistischen Bundesamtes (Destatis) bezogen. Über den Service <https://unfallatlas.statistikportal.de/> konnten die Unfalldaten aller drei Kommunen für den Zeitraum 01.01.2016-31.12.2020 abgefragt werden. Gegenüber den differenzierten Modellen wurde die Länge des Betrachtungszeitraums (5 Jahre) der Unfalldaten gleich gehalten, aufgrund der späteren Bearbeitung und Datenverfügbarkeit jedoch um 1 Jahr verschoben. Abweichend zu den Unfalldaten für die differenzierten Modelle in Dresden, wurden hier nur Unfälle mit Personenschaden ausgewiesen und betrachtet.

4 METHODIK

4.1 Analyse der Verkehrssicherheit

Für die Erstellung des Unfallmodells werden multivariate Verfahren verwendet, die den Einfluss unterschiedlicher baulicher und betrieblicher Merkmale auf das Unfallgeschehen quantifizieren können. Diese basieren auf Verallgemeinerten Linearen Modellen (Generalized Linear Models, GLM) und werden häufig unter dem Begriff „Accident Prediction Models“ (APM) zusammengefasst.

Zur Schätzung der Koeffizienten wird die Negativ-Binomialverteilung verwendet (Maher und Summersgill 1996). Damit werden sowohl die Abweichungen des Auftretens von Unfällen an einer Stelle im Betrachtungszeitraum (Poisson-Verteilung) als auch die Abweichungen zwischen mehreren Stellen im Untersuchungskollektiv (Gamma-Verteilung) berücksichtigt. Die mathematische Beschreibung der Überlagerung aus Poisson- und Gamma-Verteilung (der zeitlichen und räumlichen Verteilung) ergibt die Negativ-Binomialverteilung.

Zur Beschreibung des Unfallgeschehens auf Basis des Zusammenwirkens unterschiedlicher baulicher und betrieblicher Merkmale bei gleichzeitiger Berücksichtigung der stochastischen Natur von Unfällen kommen vor allem international multivariate Verfahren zur Anwendung. Die APM besitzen folgende Grundform:

$$U = k * q_{Rad}^{\beta_{Rad}} * q_{Kfz}^{\beta_{Kfz}} * e^{\sum_{i=1}^n x_i * y_i} \quad \text{Formel 1}$$

mit

- U Anzahl der Unfälle je Infrastrukturelement (abhängige Variable)
- k Konstante zur Beschreibung der Gesamtvarianz des Unfallgeschehens
- q Verkehrsstärke (Expositionsgroße), mit $\beta = 1$ als Abbildung eines linearen, $\beta < 1$ eines degressiven und $\beta > 1$ eines progressiven Einflusses der Verkehrsstärke auf das Unfallgeschehen
- x_i weitere erklärende Variablen, welche mit den Koeffizienten y_i multipliziert werden (Berücksichtigung als Exponentialterm)

Grundsätzlich ist es zweckmäßig, Unfallprognosemodelle schrittweise aufzubauen. Aufbauend auf dem Grundmodell (sogenanntes Score-Modell), welches mindestens die Expositionsgroße (Länge bei Streckenabschnitten, Verkehrsstärke des Rad- und Kfz-Verkehrs) enthält, werden weitere Einflussgrößen schrittweise in das Modell aufgenommen, wobei nach jeder aufgenommenen Variable die folgenden Aspekte zur Beschreibung der Güte des Modells geprüft werden:

- Varianzerklärung: Ermittlung auf Basis der Log-Likelihood-Funktion. Unter der Bedingung, dass die „Wahrscheinlichkeit“ der beobachteten Daten der Stichprobe in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Verteilung maximiert wird, wird das zu beurteilende Modell mit dem „maximalen Modell“ (100 % der systematischen Streuung sind erklärt) verglichen.
- Signifikanz des Koeffizienten: Prüfung mit Hilfe des Wald-Tests. Die Koeffizienten werden auf die Verschiedenheit von Null geprüft.
- Signifikanz der Modelleffekte: Prüfung mit Hilfe des Likelihood-Ratio-Tests. Hierbei wird die Verbesserung des Modells mit der Berücksichtigung einer Variable gegenüber einem Modell ohne Berücksichtigung dieser Variable geprüft.

Die Quantifizierung der Varianzerklärung bzw. der Anpassungsgüte erfolgt anhand der Pearson- χ^2 -Teststatistik des Poisson-Modells. Dabei ist der Quotient aus der χ^2 -Abweichung und der Anzahl der Freiheitsgrade (χ^2/df) maßgebend. Ist χ^2/df gleich 1, ist die gesamte systematische Varianz erklärt. Bei $\chi^2/df > 1$ liegt Überdispersion vor (die Varianz der abhängigen Variable überschreitet die Nominalvarianz der angenommenen Poisson-Verteilung) und bei $\chi^2/df < 1$ liegt Unterdispersion vor (die Varianz der abhängigen Variable unterschreitet die Nominalvarianz der angenommenen Poisson-Verteilung). Die nicht erklärte Varianz kann damit durch die Differenz des Quotienten χ^2/df des Poisson-Modells und dem Wert 1 beschrieben werden. Der Quotient dieser Differenzen für ein Modell

mit Einflussvariablen und dem Nullmodell (Modell ohne Einflussvariablen) entspricht damit dem erklärten Anteil der systematischen Varianz.

Zeigt die Überprüfung der Varianzerklärung (Quantifizierung der Veränderung der Reststreuung im Vergleich zum Nullfall (Modell ohne Einflussvariablen)) keine Veränderung im Sinne einer reduzierten Reststreuung oder ist der Einfluss der Variable nicht signifikant, wird sie nicht in das Modell aufgenommen. Grundsätzlich gilt die Voraussetzung, dass die einzelnen Variablen nicht miteinander korrelieren.⁶ Trägt eine Variable zur Varianzerklärung bei, gilt für die Variablenauswahl grundsätzlich das Signifikanzniveau von $p < 0,05$. Diese Grenze ist historisch entstanden und muss für die Anwendung nicht immer sinnvoll sein (Field 2009). Da auch die Aufnahme der Variablen in das Modell vorrangig vor sachlogischem Hintergrund erfolgt, werden in inhaltlich bergründeten Fällen (plausible Ausprägung der Wirkungszusammenhänge) auch Variablen auf Basis eines Signifikanzniveaus von $p < 0,1$ in das Modell aufgenommen.

Zur Beurteilung der Modellgüte bzw. zur Auswahl der am besten geeigneten Modelle wird weiterhin das Informationskriterium von Akaike (AIC) berücksichtigt. Dieses bewertet (über die ausschließliche Bewertung der Likelihood hinaus) den Zusammenhang zwischen Anpassungsgüte und Komplexität des Modells, in dem die Anzahl der aufgenommenen Variablen innerhalb eines zusätzlichen Terms zur „Bestrafung“ berücksichtigt wird. Damit ist es möglich, zwischen einer guten Anpassung (Minimierung der systematischen Reststreuung) und der Einfachheit des Modells (Maximierung der Plausibilität und damit dem Erklärungsgehalt der einzelnen Variablen) abzuwählen. Dabei entspricht ein hoher AIC-Wert einer hohen Komplexität des Modells.

Der Betrachtungszeitraum des Unfallgeschehens wird als „Offset-Variable“ in das Modell aufgenommen. Damit wird der Betrachtungszeitraum als normierende Größe berücksichtigt, so dass im Ergebnis eine Unfallzahl pro Jahr ermittelt wird.

Für die vereinfachten Modellformen wird weiterhin die Modellgüte über die Berechnung des Fehlermaßes Root Mean Square Error (RMSE) & die Residuenanalyse bestimmt. Das RMSE beschreibt die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers und wird nach der folgenden Formel ermittelt:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^{t=n} (y' - y)^2} \quad \text{Formel 2}$$

mit

- n Anzahl Beobachtungen
- y' berechneter Wert
- y beobachteter Wert

Zusätzlich werden die kumulierten Response-Residuen über der Verkehrsstärke dargestellt, um 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.

Zur Darstellung der kumulierten Residuen werden Pearson-Residuen verwendet, die wie folgt berechnet werden:

$$R_{P,i} = \frac{y_i - \mu_i}{\sqrt{\text{Var}(\mu_i)}} \quad \text{Formel 3}$$

mit

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

⁶ Alle aufzunehmenden Variablen werden vor der Modellerstellung auf Korrelationen nach Spearman überprüft.

Weiterhin wird der Vertrauensbereich $\pm 2\sigma^*(n)$ dargestellt, welcher dazu dient 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:

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

Formel 4

mit

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

n Stichprobenumfang

Für die differenzierten Unfallmodelle in Dresden wurden die Datensätze aus dem System EUSKa analysiert, welche sowohl Unfälle mit Personenschaden als auch Unfälle mit Sachschaden enthalten. Außerdem wurden für die differenzierten Modelle dreistellige Unfalltypen bestimmt. Für die vereinfachten Modelle in Darmstadt, Dresden und München wurden die Unfälle aus dem Unfallatlas des Destatis betrachtet, welche nur Unfälle mit Personenschaden enthalten.

Das Unfallmodell wird grundsätzlich separat für Abschnitte der freien Strecke, Annäherungsbereiche und Knotenpunkte erstellt. Dabei werden bei der Modellerstellung neben der Verkehrsstärke des Kfz- und Radverkehrs die nach Abschnitt 3.2 erhobenen Infrastrukturdaten berücksichtigt. Die Erstellung von separaten Modellen für Anschlussknotenpunkte im Zuge von Hauptverkehrsstraßen wird überprüft. Kriterien sind das Vorhandensein von Daten zum Verkehrsaufkommen und eine ausreichend große Stichprobe der abhängigen Variable (Unfälle). Für Nebennetzknotenpunkte kann aufgrund fehlender Daten zum Verkehrsaufkommen kein separates Modell erstellt werden.

Bei ausreichend großen Unfallkollektivgrößen können für Strecken- und Knotenpunktmodelle Teilmodelle, die z. B. eine Differenzierung nach unterschiedlichen Unfallkonstellationen zulassen, erstellt werden.

4.2 Analyse der Routenwahl

4.2.1 Modellierung diskreter Entscheidungen

Viele Sachverhalte des Verkehrsverhaltens basieren auf diskreten Entscheidungen. Diskret bedeutet, dass sich Verkehrsteilnehmende für eine Möglichkeit aus einer endlichen Menge mehrerer Alternativen entscheiden. Die Wahl einer Route ist eine solch diskrete Wahlentscheidung, da Verkehrsteilnehmenden meist mehrere unterschiedliche Routen zur Auswahl stehen und sie sich für eine der Alternativen entscheiden.

Da es sich um diskrete Entscheidungen handelt, müssen zur Analyse und Abbildung der Routenwahl Modelle der diskreten Wahltheorie genutzt werden. Die diskrete Wahltheorie wurde in den 1970er und 1980er Jahren insbesondere durch McFadden (1974), Uncles et al. (1987) und anderen entwickelt – vor allem das heute sehr gebräuchliche Logit-Modell. Die Entwicklung liegt darin begründet, dass die Einflüsse auf diskrete Variablen nicht mit dem Verfahren der klassischen linearen Regressionsanalyse untersucht werden können, weil lineare Regressionsmodelle keine diskreten bzw. binären Werte (Wahl oder Nicht-Wahl einer Route) analysieren und ausgeben können. Durch den linearen Verlauf der Funktionsgeraden könnte eine lineare Regressionsfunktion für die Wahlwahrscheinlichkeit Werte kleiner 0 oder größer 1 ausgeben (siehe blaue Gerade in Abbildung 15). Durch eine geeignete Transformation der abhängigen Variablen löst die Logistische Regression dieses Problem (UZH 2018; Treiber 2018; Wittink 2011). (siehe rote Kurve in Abbildung 15).

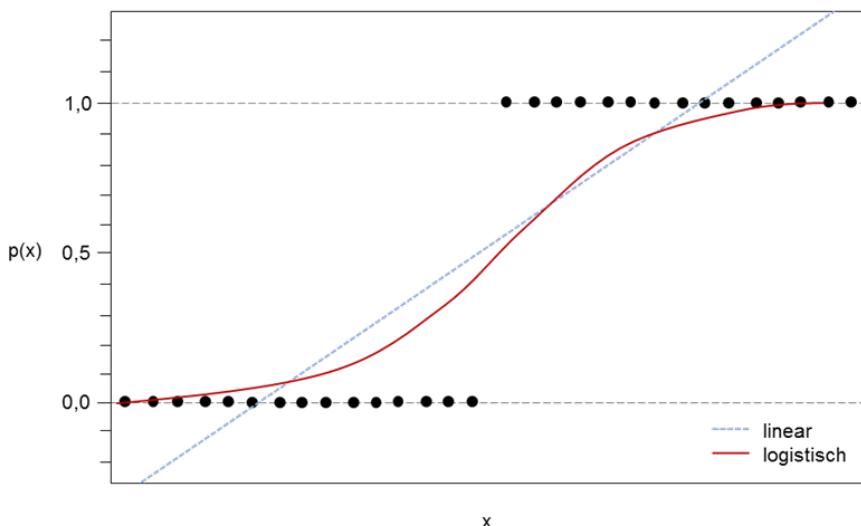


Abbildung 15 Lineare und logistische Regressionsfunktion im Vergleich.

Bei der logistischen Regression wird versucht, eine Funktion zu bestimmen, die sich möglichst gut an die vorliegenden diskreten bzw. binären Werte anpasst (siehe Abbildung 15). Die logistische Regressionsfunktion hat im Gegensatz zur linearen Regressionsfunktion einen s-förmigen Kurvenverlauf. Sie verläuft asymptotisch gegen die binären Werte ($p=0$ oder $p=1$) und bildet die Wahrscheinlichkeit ab, dass eine abhängige Variable den Wert 1 annimmt. Es werden also, anders als bei der linearen Regression, nicht konkrete Werte vorhergesagt. Die logistische Funktion gibt die Eintrittswahrscheinlichkeit an, dass die unabhängige Variable den Wert 1 annimmt. Ein Wert nahe 1 zeigt an, dass ein Eintreten (z. B. Wahl einer Route) sehr wahrscheinlich ist, während ein Wert nahe 0 anzeigt, dass ein Eintreten dieses Ereignisses eher unwahrscheinlich ist (UZH 2018).

Die Funktion, die für die logistische Regression genutzt wird, ist die logistische Regressionsfunktion. Sie lautet:

$$P(y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-u_i}} \quad \text{Formel 5}$$

mit

$P(y=1)$ Wahrscheinlichkeit, dass $y = 1$

e Basis des natürlichen Logarithmus (Eulersche Zahl)

u sog. Logit

Der Logit entspricht dem Nutzen (engl. utility u) einer Alternative i . Um diesen Nutzen in das Regressionsmodell zu integrieren, bedient man sich sogenannter Nutzenfunktionen, mit denen man den Nutzen für die zur Wahl stehenden Alternativen berechnen kann. Gemäß dem klassischen ökonomischen Modell der Nutzenmaximierung (*Homo Oeconomicus*) wird davon ausgegangen, dass die Alternative mit dem maximalen Nutzen gewählt wird (Treiber 2018). Entscheidende wählen in der Theorie stets die Alternative mit dem für sie höchsten Nutzen (Nutzenmaximierungsprinzip). Allerdings setzt diese Annahme voraus, dass die Entscheidenden über die vollständige Information verfügen (ihnen sind sämtliche Alternativen mit all ihren Eigenschaften bekannt). Dies ist eine Grundvoraussetzung des Prinzips der Nutzenmaximierung, da es mit dem Prinzip des *Homo Oeconomicus* konsistent sein muss. Diese Konsistenz ist in der Realität jedoch nicht oder nur äußerst selten gegeben (Suchanek 1994).

Der angesprochene Nutzen setzt sich daher in Modellen der diskreten Wahltheorie aus zwei unterschiedlichen Komponenten zusammen. Eine Komponente beschreibt den beobachtbaren Nutzen, der sich durch Beobachtungen und Analysen quantifizieren lässt. Diese wird deterministische Nutzenkomponente genannt. Daneben existiert noch ein sog. Zufallsnutzen, der den zufälligen bzw. nicht beobachtbaren Nutzen darstellt (Öztürk 2001).

Die Einführung dieses Zufallsnutzens hat mehrere Gründe. Er muss eingeführt werden, weil:

- meist nicht alle exogenen Variablen⁷ berücksichtigt werden (können), weil bspw. nicht alle bekannt sind
- die exogenen Variablen evtl. nicht (genau) messbar oder mit unvermeidlichen Fehlern behaftet sind
- die exogenen Variablen nicht direkt, aber indirekt (z. B. über andere Variablen), messbar sind
- bei den Entscheidenden selbst ein nichtrationales bzw. zufälliges Element existieren kann, dass die Entscheidung beeinflusst

Eine scharfe Trennung zwischen den formulierten Punkten ist allerdings nicht immer zu realisieren. Der Zufallsterm stellt eigentlich nichts Anderes dar, als das Eingeständnis vom Unwissen der Beobachtenden. Er „wird also notwendig, da ein Verzicht auf den Homo Oeconomicus in diesem Rahmen schlechterdings nicht modellierbar ist“ (Treiber 2018). Zusammen mit der deterministischen Nutzenkomponente ergibt sich nach Treiber (2018) und Wittink (2011) der Gesamtnutzen wie folgt:

$$U_i = V_i + \varepsilon_i \quad \text{Formel 6}$$

mit

- U_i Gesamtnutzen
 V_i deterministischer Nutzen
 ε_i Zufallsnutzen einer Alternative i

Über die Zufallskomponente ε_i (nicht beobachtbarer Nutzen) und deren Verteilung müssen Annahmen getroffen werden. Sie sind Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Entscheidungsmodells.

Die deterministische Nutzenkomponente kann mittels Analysen aus den Beobachtungen abgeleitet werden. Dazu werden die quantifizierbaren Eigenschaften, z. B. Aufwände wie Kosten oder Reisezeiten, in die deterministische Nutzenkomponente integriert. Damit ergibt sich eine Art erweiterter deterministischer Nutzen:

$$V_{ni} = \beta_0 + \beta_{1i} * A_{1i} + \beta_{2i} * A_{2i} + \dots + \beta_{ni} * A_{ni} \quad \text{Formel 7}$$

mit

- V_i deterministischer Nutzen
 β_0 Konstante
 A_{nj} Aufwand n einer Alternative i
 β_{ni} Gewichtungsparameter

Dieser beschreibt den Einfluss (Richtung und Stärke) des Aufwands auf den deterministischen Nutzenterm. Es ergibt sich damit aus Formel 6 und Formel 7 der Gesamtnutzen:

$$U_{ni} = \beta_0 + \beta_{1i} * A_{1i} + \beta_{2i} * A_{2i} + \dots + \beta_{ni} * A_{ni} + \varepsilon_i \quad \text{Formel 8}$$

mit

- U_{ni} Gesamtnutzen
 β_0 Konstante
 A_{nj} Aufwand n einer Alternative i
 β_{ni} Gewichtungsparameter
 ε_i Zufallsnutzen einer Alternative i

⁷ Einflussfaktoren bzw. unabhängige Variablen

Aus der Formulierung des logistischen Regressionsmodells (Formel 5) und den beschriebenen Zusammenhängen zu den Nutzenkomponenten ergibt sich nach Einsetzen des Logits für das Regressionsmodell schließlich:

$$P(y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-\beta_0 + \beta_{1i} * A_{1i} + \beta_{2i} * A_{2i} + \dots + \beta_{ni} * A_{ni} + \varepsilon_i}} \quad \text{Formel 9}$$

mit

- $P(y=1)$ Wahrscheinlichkeit, dass $y = 1$
- e Basis des natürlichen Logarithmus (Eulersche Zahl)
- β_0 Konstante
- A_{nj} Aufwand n einer Alternative i
- β_{ni} Gewichtungsparameter
- ε_i Zufallsnutzen einer Alternative i

Logit-Modelle sind die mit Abstand am häufigsten genutzten Modelle. Vor allem das Binomiale Logit (BNL) sowie das Multinomiale Logit (MNL) sind beliebte und häufig genutzte Modelle. Sie werden besonders aufgrund ihrer einfachen Handhabung in einer Vielzahl von Forschungsdisziplinen, in denen diskrete Wahlentscheidungen untersucht werden, angewendet – so auch in der Verkehrsforschung.

Stehen mehr als zwei (Routen-)Alternativen zur Verfügung, muss das MNL genutzt werden. Die Wahlwahrscheinlichkeit berechnet sich dann aus dem Quotienten des Nutzens einer Alternative i und dem Gesamtnutzen aller Alternativen. Gegenüber dem binomialen Fall ergibt sich für die Wahlwahrscheinlichkeit damit das folgende Modell:

$$P(y = 1) = \frac{e^{-\beta_0 + \beta_{1i} * A_{1i} + \beta_{2i} * A_{2i} + \dots + \beta_{ni} * A_{ni} + \varepsilon_i}}{\sum e^{-\beta_0 + \beta_{1i} * A_{1i} + \beta_{2i} * A_{2i} + \dots + \beta_{ni} * A_{ni} + \varepsilon_i}} \quad \text{Formel 10}$$

mit

- $P(y=1)$ Wahrscheinlichkeit, dass $y = 1$
- e Basis des natürlichen Logarithmus (Eulersche Zahl)
- β_0 Konstante
- A_{nj} Aufwand n einer Alternative i
- β_{ni} Gewichtungsparameter
- ε_i Zufallsnutzen einer Alternative i

Den vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und der vergleichsweise simplen mathematischen Formulierung stehen jedoch, vor allem beim MNL, einige restriktive Annahmen gegenüber, die bei der Nutzung beachtet werden müssen (z. B. Annahmen zum stochastischen Nutzen und dessen Verteilung). Ein zusätzliches Charakteristikum des Logit-Modells ist die sog. „Independence of Irrelevant Alternatives“ (IIA). Diese Annahme über die Unabhängigkeit von irrelevanten Alternativen ist Stärke und Schwäche des Modells zugleich, da die Überschätzung oder Unterschätzung von zusammenhängenden Alternativen (keine Unabhängigkeit) zu falschen Wahlwahrscheinlichkeiten führen können. Allerdings kann die Güte des Modells in Bezug auf die IIA-Eigenschaft durch Tests festgestellt werden (siehe dazu bspw. Maier und Weiss 1990).

Es sei darauf hingewiesen, dass viele unterschiedliche Modelle für die Abbildung von diskreten Entscheidungen existieren und genutzt werden können. Auf die ausführliche Vorstellung unterschiedlicher Modelle wird an dieser Stelle verzichtet (für weitere Informationen siehe Treiber 2018; Maier und Weiss 1990; Merz 2016).

Modellschätzung

Um die Parameter bzw. Regressionskoeffizienten des beschriebenen Modells zu ermitteln, wird auf die Maximum-Likelihood-Schätzung (MLE – engl.: Maximum Likelihood Estimation) zurückgegriffen. Die MLE stellt ein etabliertes Verfahren der Modellschätzung dar. Die Regressionsparameter werden bestimmt, indem für die beobachteten Werte möglichst hohe Wahrscheinlichkeiten voraussagt werden, wenn die abhängige Variable 1 ist (bzw. möglichst geringe Wahrscheinlichkeiten, wenn die abhängige Variable 0 ist). Der MLE-Algorithmus maximiert dabei eine "Likelihood-Funktion", die aussagt, wie wahrscheinlich es ist, dass der Wert einer abhängigen Variablen durch die

unabhängigen Variablen vorausgesagt werden kann. Detailliertere Informationen zur MLE können in Merz (2016) nachgeschlagen werden.

4.2.2 Erzeugung von Routenalternativen

Um die Einflussfaktoren der Routenwahl mittels logistischer Regressionsanalyse analysieren zu können, müssen Routenalternativen erzeugt werden, die den gewählten Routen als nicht gewählte Alternative gegenübergestellt werden. Alternativrouten können mit Hilfe unterschiedlicher Verfahren erzeugt werden (z.B. Best-Weg-Verfahren, deterministische oder stochastische Mehr-Weg-Verfahren). Für die vorliegende Arbeit wurde basierend auf einem Best-Weg-Verfahren ein Ansatz zur Erzeugung von Routenalternativen entwickelt. Das Verfahren basiert prinzipiell auf einem Kürzeste-Wege-Routing, bezieht jedoch die gewählte Route sowie die, wenn vorhanden, bereits erzeugten Routenalternativen bei der Erzeugung weiterer Routenalternativen ein, indem er den Aufwand auf den bereits befahrenen Netzkanten erhöht. In Ansätzen wurde das Vorgehen bei Chen et al. (2007) beschrieben und durch Bader et al. (2011) erweitert. Der sog. *Penalty Tube*-Ansatz lässt sich wie folgt beschreiben:

1. Es wird der kürzeste Weg zwischen Start- und Endpunkt einer Fahrt gesucht.
2. Um die bereits vorhandene (gewählte) Route wird ein Puffer mit dem Radius r (in Metern) erzeugt und zu einer Liste, der sogenannten *penalty tubes list*, hinzugefügt.
3. Befindet sich eine zu berücksichtigende Netzkante innerhalb des Puffers aus der *penalty tubes list*, wird der Aufwand (hier: Länge) mit dem Aufwandsfaktor pf (penalty factor) skaliert. Der Aufwand aller Netzkanten innerhalb des Puffers wird mit diesem Faktor erhöht.
4. Anschließend wird ein Best-Weg-Verfahren (hier: Dijkstra-Routing) zwischen Start- und Endpunkt des gefahrenen Wegs ausgeführt. Der Routing-Algorithmus berücksichtigt bei dem Finden einer Route den Aufwand (hier: Länge einer Kante) und sucht den „aufwandminimalsten“ Weg zwischen Quell- und Zielpunkt.
5. Die gefundene Route (Alternative) wird dem Set möglicher Alternativrouten hinzugefügt.
6. Um die erzeugte Alternative wird anschließend ein Puffer mit dem Radius r gelegt und zu der *penalty tube list* hinzugefügt.
7. Punkt drei bis fünf werden so lange wiederholt, bis k mögliche Alternativrouten erzeugt wurden.

Der Radius d der zu erzeugenden Tubes, der Aufwandsfaktor pf und die Anzahl möglicher Alternativrouten k ist bei dem Ansatz frei wählbar. Die Wahl eines Streckenabschnitts innerhalb des Routings ist, wie beschrieben, durch die vorherigen Routen (Aufwanderhöhung durch den pf) mitbestimmt. Am Start- bzw. Zielpunkt sollte der Effekt jedoch weniger stark ausgeprägt sein, damit Routenalternativen bspw. nicht entgegen der eigentlichen Fahrtrichtung starten. Daher wurde der Ansatz so angepasst, dass es möglich ist, den Puffer erst ab einer bestimmten Distanz vom Start- bzw. Zielpunkt zu erzeugen. Dazu wurde das Verfahren um die sog. Verkürzungslänge O erweitert. Anhand eines Testdatensatzes wurden die für den Ansatz optimalen Parameter bestimmt: $d = 100m$; $pf = 2$; $O = 100$ und $k = 2$.

In Abhängigkeit der Charakteristika der gewählten Route werden mit dem Ansatz Routenalternativen erzeugt, die jeweils dem nächst kürzesten Weg gleichkommen. Alle Routen des Alternativen-Sets unterscheiden sich räumlich stark von der gefahrenen Route, sodass „echte Alternativen“ zur gewählten Route erzeugt werden. Der Ansatz greift, so wie das Map Matching auch, auf Graphhopper zurück. Abbildung 16 verdeutlicht das Ergebnis des Vorgehens an einem Beispiel. Sie zeigt die gewählte Route (blau) sowie zwei mit dem beschriebenen Verfahren erzeugte Routenalternativen (grün, braun).



Abbildung 16 Gewählte Route (blau) und erzeugte Routenalternativen (grün, braun)

Der Ansatz verspricht aufgrund seiner Robustheit, relativ einfachen Umsetzbarkeit sowie seiner genauen Steuerbarkeit konsistente und aussagekräftige Ergebnisse für den benötigten Anwendungsfall.

4.2.3 Attribuierung der Routen und -alternativen

Die Attribuierung verknüpft die netzseitig vorliegenden Sekundärdaten mit den Routen und Routenalternativen. Die erhobenen Sekundärdaten wurden einheitlich im Netzmodell hinterlegt und die Routen/Alternativen mit dem Netzmodell via Map Matching verknüpft (siehe Abschnitt 3.1.3). Daher können die Eigenschaften der Routen und Alternativen problemlos berechnet werden. Um die Eigenschaften der Routen/Alternativen zu bestimmen, werden jeweils die IDs der genutzten Kanten und Knoten je Route/Alternative abgefragt.

Für die Berechnung der Routeneigenschaften wird in einem nächsten Schritt über die IDs der Kanten auf die Kanten- und Knoteneigenschaften zugegriffen. Ergebnis der Attribuierung ist, dass für alle gewählten Routen und nicht gewählten Alternativen die jeweiligen Eigenschaften bestimmt sind. Die Eigenschaften werden für den Großteil der Attribute in einem relativen Maß bestimmt, damit sie untereinander vergleichbar sind. Die relativen Angaben beziehen sich dabei jeweils auf die gesamte Route bzw. Routenalternative. Das bedeutet, dass sie den Anteil eines Attributs angeben, den es entlang der gesamten Route annimmt (z.B. 40% Asphaltoberfläche entlang einer Route). Es ergeben sich die in Tabelle 9 dargestellten Eigenschaften der Routen/Alternativen.

Tabelle 9 Attribute der Routen und Alternativen

Einflussfaktor	Variable	Einheit
Reiseweite	Distanz	[m]
Längsneigung	Maximal Längsneigung Durchschnittliche Längsneigung Längsneigung < 2% Längsneigung von 2 - 4% Längsneigung > 4% Längsneigung < 0% (Gefälle)	[%]
Radverkehrsführungsform	Mischverkehr Mischverkehr mit Schutzstreifen Radfahrstreifen Bussenkerfahrstreifen mit Freigabe für den Radverkehr Radweg Gemeinsamer Geh- und Radweg Selbstständige gemeinsame Geh- und Radwege Selbstständige getrennte Geh- und Radwege Selbstständige Gehwege (auch FGZ) keine Angabe zur Radverkehrsführungsform	[%]
Breite Radverkehrsführung	Breite der Radverkehrsführung < 1,5m Breite der Radverkehrsführung zw. 1,5 - 2,0m Breite der Radverkehrsführung > 2,0m keine Angabe zur Breite der Radverkehrsführung	[%]
Abstand Radweg – Fahrbahn/ruhender Verkehr	Abstand < 0,5m Abstand zw. 0,50 - 0,75m Abstand > 0,75m keine Angabe zum Abstand	[%]
Breite Sicherheitstrennstreifen zum ruhenden Verkehr	Kein Sicherheitstrennstreifen vorhanden Breite Sicherheitstrennstreifen < 0,5m Breite Sicherheitstrennstreifen zw. 0,50 - 0,75m Breite Sicherheitstrennstreifen > 0,75m keine Angabe zur Breite des Sicherheitstrennstreifens	[%]
Fahrbahnoberfläche	Asphalt Pflaster Kopfsteinpflaster Natur, gebunden (Schotter) Natur, ungebunden (Waldboden) keine Angabe zur Oberfläche	[%]
Ruhender Verkehr	Längs Schräg Senkrecht Kombination Keine Angabe oder nicht vorhanden	[%]
Max. Geschwindigkeit des MIV	Zulässige Geschwindigkeit des MIV $v \leq 6\text{km/h}$ $6\text{km/h} < v \leq 30\text{km/h}$ $31\text{km/h} < v \leq 50\text{km/h}$	[%]

Einflussfaktor	Variable	Einheit
	v > 50km/h keine Angabe	
DTV MIV	Durchschnittlicher DTV des MIV entlang einer Route DTV ≤ 5.000Kfz/Tag 5.000 < DTV ≤ 10.000Kfz/Tag DTV > 10.000Kfz/Tag keine Angabe zum DTV	[Kfz/Tag] [%]
Anzahl der Fahrstreifen MIV	1 Fahrstreifen 2 Fahrstreifen >2 Fahrstreifen Keine Angabe zur Anzahl der Fahrstreifen	[%]
Straßenklasse	Hauptverkehrsstraße Nebennetz	[%]
DTV Rad	Durchschnittlicher DTV des Radverkehrs entlang einer Route DTV ≤ 500Rad/Tag 500 < DTV ≤ 1.000Rad/Tag 1.000 < DTV ≤ 1.500Rad/Tag 1.500 < DTV ≤ 2.000Rad/Tag 2.000 < DTV ≤ 2.500Rad/Tag DTV > 2.500Rad/Tag Keine Angabe zum DTV	[Rad/Tag] [%]
Fußverkehrsaufkommen	Gering Mittel Hoch Keine Angabe	[%]
Knotenpunkte und Art der Regelung	Regelung „Recht-Vor-Links“ (RVL) Regelung durch Verkehrszeichen 205 Regelung durch Verkehrszeichen 206 Regelung durch Teil-LSA Regelung durch LSA keine Angabe zur Art der Regelung	[n]
Objektive Sicherheit	Unfallhäufigkeit an Strecken Unfallhäufigkeit an Knotenpunkten Unfallhäufigkeit gesamt	[n/km] [n/KP] [n]
Subjektive Sicherheit	Häufigkeit kritischer Situationen an Strecken Häufigkeit kritischer Situationen an Knotenpunkten Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	[n/km] [n/KP] [n]
Umfeldnutzung	Wohngebiete Grünflächen Gewerbegebiete Mischnutzung Industrie Sonstige oder keine Angabe	[%]

Die Reisezeit wurde aufgrund der fehlenden Vergleichbarkeit nicht aufgenommen. Die fehlende Vergleichbarkeit liegt darin begründet, dass die von den Probanden realisierten Reisezeiten nicht mit den Reisezeiten vergleichbar sind, die aus der Erzeugung der Routenalternativen resultieren, weil nicht alle in der Realität entstehenden Einflüsse bei der Berechnung der Reisezeiten entlang der Alternativen algorithmisch abgebildet werden können (z. B. physische Fitness der Radfahrer*innen, Wartezeiten an Knotenpunkte usw.).

Neben den aufgeführten Attributen wurden weitere Eigenschaften der Routen und Alternativen bestimmt, die für die Analyse der Routenwahl von Interesse sind. Sie sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10 Ergänzende Attribute der Routen und Alternativen

Eigenschaft	Variable	Bezeichnung
Kürzeste Route	Best-Weg [ja, nein]	Information, ob es sich bei der Route um den kürzesten Weg auf der Quelle-Ziel-Relation handelt
Wochentag der Fahrt	Weekend [ja, nein]	Information, ob die Fahrt an einem Werktag oder am Wochenende durchgeführt wurde.
Identifikator der Routen und Alternativen	Alternative [0, 1, 2]	Information, ob es sich bei der Route um eine gewählte Route (0) oder eine erzeugte Alternative (1 oder 2) handelt.
Gemeinsame Routenanteile	Share_x	Anteil gemeinsam genutzter Streckenabschnitte entlang der Routen/Alternativen (Überlappung)

Neben den Eigenschaften der Routen können personenbezogene Eigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf die Routenwahl ausüben, weil die persönlichen Präferenzen zu einer anderen Wahrnehmung der Eigenschaften einer Route führen. Dementsprechend kann die Wahl einer Route bspw. von Alter, Geschlecht oder vom Radfahrer-Typ (z.B. Gelegenheitsradler*in vs. Erfahrene Radfahrer*in) beeinflusst sein. Aus diesem Grund wurden personenbezogene Attribute mit den Routen verknüpft, sodass auch Aussagen zum Einfluss dieser Eigenschaften untersucht werden können. Die Informationen stammen, ebenso wie die Routendaten, aus dem NRVP-geförderten Forschungsprojekt „RadVerS“. Weiterführende Informationen dazu können dem Abschlussbericht (siehe Francke et al. (2020)) entnommen werden. Tabelle 11 fasst die genutzten Eigenschaften zusammen.

Tabelle 11 Personenbezogene Charakteristika

Einflussfaktor	Variable	Einheit
Alter	< 24 Jahre 25-65 Jahre > 65 Jahre	[1, 2, 3]
Geschlecht	Männlich Weiblich	[1, 2]
Radfahr-Typ	Passionierter Typ Pragmatischer Typ Funktioneller Typ Ambitionierter Typ	[1, 2, 3, 4]

Die in den obigen Tabellen beschriebenen Attribute wurden für alle Routen und Alternativen berechnet und in einer Output-Tabelle abgespeichert. Sie stellt den wesentlichen Input für die folgenden deskriptiven Auswertungen und multivariaten Analysen dar.

4.2.4 Voraussetzungen der Modellschätzung

Nachdem die Routen und Alternativen attribuiert wurden und so die Eigenschaften einer jeden Route/Alternative bekannt sind, kann im Anschluss die Analyse mittels logistischer Regressionsanalyse vorgenommen werden. Die logistische Regression gehört zu den strukturprüfenden Verfahren und analysiert die Zusammenhänge zwischen

einer abhängigen Variable und mehreren unabhängigen Variablen (Backhaus, et al., 2016). Die Modellform folgt dem in 4.2.1 beschriebenen Ansatz und ergibt nach der Modellschätzung mittels Maximum-Likelihood-Schätzung schließlich das Regressionsmodell. Es existieren jedoch Voraussetzungen, die erfüllt sein müssen um eine logistische Regressionsanalyse durchführen zu können. Diese Voraussetzungen lauten wie folgt:

1. Die unabhängige Variable muss kategorial sein.
2. Die abhängigen Variablen sind metrisch (oder im Falle kategorialer Variablen als Dummy-Variablen codiert).
3. Die Stichprobe muss genügend groß sein.
4. Für jede Gruppe, die durch kategoriale Prädiktoren gebildet wird, sollte $n \geq 25$ sein.
5. Es sollten möglichst wenige/keine Ausreißer im Datensatz vorhanden sein.
6. Es darf keine Multikollinearität (Korrelationen der Prädiktor-Variablen) bestehen.

Die Prüfung der genannten Voraussetzung ergibt folgendes:

1. Bei der abhängigen Variable handelt es sich um eine kategoriale Variable, weil sie einerseits binär codiert ist (Wahl vs. Nichtwahl) und die Wahlmöglichkeiten (Alternativen) kategorial, sowie für jede Fahrt im Datensatz einzeln gekennzeichnet sind.
2. Die meisten unabhängigen Variablen weisen ein metrisches Skalenniveau auf. Lediglich die ergänzenden Attribute (siehe Tabelle 10) sowie die personenbezogenen Eigenschaften (siehe Tabelle 11) weisen ein kategoriales Skalenniveau auf. Diese Variablen wurden als Dummy-Variablen codiert und können so in die Analyse einfließen.
3. Um die Qualität der Schätzergebnisse zu erhöhen (sie steigt mit zunehmender Fallzahl) sollte die Stichprobe (STP) möglichst groß sein. Die Einschätzung, wann eine STP ausreichend groß ist, ist nur schwer zu ermitteln. Nach Ullmann und Mehlhorn (2012) sollten pro Ausprägung der abhängigen Variable mindestens 25 Beobachtungen existieren. Aussagekräftige Schätzungen kann ein Modell erst ab ca. 100 Beobachtungen pro Variable liefern. Insgesamt liegt mit rund 4.000 Routen und den entsprechenden Alternativen (ca. 8.000) eine genügend große Fallzahl vor.
4. Da alle unabhängigen Variablen (Prädiktoren) metrisch skaliert sind und somit keine Gruppe durch kategoriale Prädiktoren gebildet wird, ist Voraussetzung 4 ebenfalls erfüllt.
5. Voraussetzung 5 gibt an, dass die Daten möglichst keine Beobachtungen enthalten sollten, die keinen Beitrag zur Erklärung der Zusammenhänge leisten bzw. diese verzerrten würden (Ausreißer). Mittel der Wahl ist es, Daten mit starken Ausreißern zu löschen. Das Beseitigen der einzelnen Ausreißer-Daten (Routen und Alternativen) ist jedoch sehr aufwendig und eine starke Reduktion der Datengrundlage wäre die Folge. Wenn alle Routen/Alternativen mit Ausreißern entfernt würden, so würden bspw. bei 73 Varianten mit jeweils nur 50 Ausreißern pro Variable, die sich nicht mit anderen Ausreißern decken, im Datensatz 3.650 Routen verloren gehen. Um den Datenverlust möglichst gering zu halten, wurden daher Verteilung, Streuung und Ausreißer der einzelnen Varianten innerhalb der Varianten-Kategorien genauer betrachtet.

Die Analyse zeigte sehr unterschiedliche Verteilungen der Varianten (siehe Anlage 8). Bei zahlreichen Varianten existiert eine Vielzahl von Beobachtungen, mit einer breiten Streuung und nur wenigen Ausreißern. Andere Varianten offenbaren wiederum nur wenige Beobachtungen oder eine sehr geringe Streuung der Werte bei gleichzeitig vielen und starken Ausreißern. Varianten mit vielen und starken Ausreißern wurden für die weiteren Analysen der Routenwahl nicht berücksichtigt. Dies ist nicht weiter problematisch, solang aus jeder Varianten-Kategorie mindestens eine sog. „Stellvertreter-Variable“ erhalten bleibt, um den Einfluss auf die Routenwahl zu analysieren. Ein oder zwei unterschiedliche Varianten, wie z.B. Asphalt oder

Kopfsteinpflaster, der Kategorie Oberflächenqualität sind bspw. ausreichend, um den Einfluss glatter Oberfläche auf die Routenwahl zu analysieren.

Darüber hinaus war es notwendig, einige Variablen zu neuen Variablen innerhalb der Variablen-Kategorie zu aggregieren, weil die zuvor gewählte Unterscheidung (Variablen) eines Merkmals (Variablen-Kategorie) zu feingliedrig war und für die Variablen nur wenige Werte und starke Ausreißer vorhanden waren. So wurden die ursprünglich für den DTV_{Rad} vorgesehenen sieben Variablen in zwei Variablen „ $DTV_{Rad} < 500$ “ und „ $DTV_{Rad} > 500$ “ zusammengefasst. Die ursprünglich neun Variablen der Kategorie „Radverkehrsführungsform“ mussten ebenfalls in 2 Variablen („Radverkehrsinfrastruktur vorhanden“ und „keine Radverkehrsinfrastruktur vorhanden“) zusammengefasst werden, um dem Kriterium einer möglichst großen Fallzahl und wenigen Ausreißern gerecht zu werden. Gleches trifft auf die Variablen-Kategorie „Breite der Radverkehrsführung“ zu, in der die Variablen zu „ $Breite < 1,5 \text{ m}$ “, „ $Breite > 1,5 \text{ m}$ “ und „keine Breite“ aggregiert wurden. Eine weitere Aggregation war innerhalb der Variablen-Kategorie „Zulässige Höchstgeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs“ notwendig. Das Ergebnis der Aggregation waren die Variablen „Max. zul. Geschwindigkeit des Kfz-Verkehrs $< 30 \text{ km/h}$ “ und „Max. zul. Geschwindigkeit des Kfz-Verkehrs $> 30 \text{ km/h}$ “. Die Aggregation der einzelnen Variablen ist im Aggregationsschlüssel in Anlage 9 nachzuvollziehen.

Um darüber hinaus eine Verzerrung der Analyseergebnisse durch einen geringen Informationsgehalt der Variablen zu verhindern, wurden jene Attribute aus der Analyse ausgeschlossen, zu denen im Netzmodell, und dementsprechend entlang der Routen und Alternativen, nur sehr wenig Informationen vorlagen. Dies betrifft vor allem das Attribut „Sicherheitsraum“, für das im Mittel zu rund 96 % keine Informationen entlang der Routen/Alternativen vorliegen. Daneben existieren noch weitere Variablen aus unterschiedlichen Kategorien, für die nur sehr wenige Informationen entlang der Routen/Alternativen vorliegen (bspw. gebundene und ungebundene Oberflächen, die Radverkehrsführung auf Bussonderfahrstreifen, Regelung an Knotenpunkten). Diese Variablen wurden in der weiteren Analyse nicht berücksichtigt. Es wurden zudem die Variablen „k. A.“ (keine Angabe) aus dem Datensatz entfernt, weil sie keine zusätzlichen Informationen bieten, die für die Analyse zuträglich wären. Ausnahmen bildet lediglich die Variable „k. A.“ der Kategorie „Ruhender Verkehr“. Sie wurde für weiteren Betrachtungen zunächst im Datensatz belassen, weil ihr im Gegensatz zu den anderen „k. A.“-Variablen ein nicht unerheblicher Informationsgehalt unterstellt werden kann.⁸

Ergebnis der Datenbereinigung ist, dass insgesamt 36 Variablen für 17 Variablen-Kategorien im Datensatz verbleiben (die Kategorie „Sicherheitsraum“ konnte aufgrund mangelnder Daten und wegen zu starken Ausreißern nicht berücksichtigt werden). Eine Übersicht der final in die Analyse aufgenommenen Variablen wird am Ende des Abschnitts gegeben.

6. Die letzte und eine der wesentlichsten Voraussetzungen ist, dass keine Multikollinearität besteht (Voraussetzung 6). Ein ideales Modell erhält man, wenn zwischen den Response-Variablen und den Prädiktor-Variablen eine möglichst hohe Korrelation besteht – zwischen den Prädiktor-Variablen aber möglichst keine. Multikollinearität besteht dann, wenn mehr als zwei Prädiktor-Variablen so stark miteinander korrelieren, dass sie einen hohen Korrelationskoeffizienten (z.B. $r = 0,8$) aufweisen. Sie ist für die logistische Regressionsanalyse problematisch, weil die Regressionskoeffizienten verzerrt werden können, wenn die Prädiktor-Variablen stark korrelieren. Das sich ergebende Modell bzw. die geschätzten Koeffizienten, die den Einfluss einer Variablen auf die Wahl einer Route bestimmen, würden damit nicht der Realität entsprechen.

⁸ Im Nebennetz lagen häufig weniger Informationen zum ruhender Verkehr vor als im Hauptverkehrsnetz. Daher röhren meist die Werte der Variable „k. A.“, wenn Fahrten im Nebennetz durchgeführt wurden. Eine visuelle Überprüfung zeigte jedoch, dass im Nebennetz stadtweit ruhender Verkehr vorhanden ist. Daher kann angenommen werden, dass die Variable „k. A.“ einen Beitrag zur Erklärung leisten kann und als eine Art Indikator für die Existenz von ruhendem Verkehr im Nebennetz dienlich sein könnte.

Um die Einhaltung der Voraussetzung zu prüfen und Multikollinearität festzustellen, wurde eine Korrelationsanalyse in SPSS durchgeführt. Dazu wurde für alle unabhängigen Variablen der Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson bestimmt. Er berechnet sich nach

$$r_{BP} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)} \sqrt{(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)}} \quad \begin{matrix} \text{Formel} \\ 11 \end{matrix}$$

mit r_{BP} als Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson, x_i und y_i als Werte der beiden auf Korrelation zu prüfenden Variablen, \bar{x} und \bar{y} als Mittelwerte der Variablen und n als Stichprobengröße.

Der Korrelationskoeffizient nimmt Werte zwischen -1 und +1 an und zeigt damit sowohl negative ($r < 0$) als auch positive ($r > 0$) Zusammenhänge auf. Demnach besteht kein Zusammenhang zwischen den Variablen, wenn $r = 0$ ist. Der Korrelationskoeffizient r_{PB} kann zudem genutzt werden, um die Stärke der Zusammenhänge zu beurteilen, weil er selbst ein Maß für die Effektstärke darstellt. Es lassen sich jedoch keine allgemein gültigen Aussagen zum Wert tätigen. Ab welchem Wert ein starker Zusammenhang besteht, hängt auch immer von der Problemstellung ab (Backhaus et al. 2016). Als Orientierung wird in der Literatur häufig auf die Einteilung von Cohen 1988 verwiesen, nach der bspw. bis zu einem $r < 0,5$ von einem mittleren Zusammenhang gesprochen wird. Werte von $r > 0,7$ deuten auf einen starken Zusammenhang hin.

Das Ergebnis der Korrelationsanalyse ist, dass unterschiedlich starke Korrelationen zwischen den verbliebenen Prädiktor-Variablen bestehen (Die vollständige Korrelationsmatrix inkl. Der Werte für r und den Signifikanzen ist aus Gründen des Umfangs in Anlage 10 dargestellt.). Bei den deutlich hervortretenden Korrelationen handelt es sich meist um Zusammenhänge innerhalb der Variablen-Kategorien. Eine Zu- oder Abnahme der Ausprägung einer Variablen innerhalb einer Kategorie führt zwangsläufig zu einer Zu- oder Abnahme der Ausprägung einer anderen Variablen der gleichen Kategorie.

Da aufgrund der Gefahr von Multikollinearität vor allem solche Variablen nicht in die Analyse aufgenommen werden sollten, die starke und signifikante Korrelationen aufweisen, wurden zunächst die Variablen mit starken Korrelationen ($r > 0,7$) betrachtet. Darüber hinaus wurde geprüft, ob r signifikant ist – also ein signifikanter Unterschied von Null besteht. Dies ist notwendig, um zu bestimmen, ob ein gefundener Zusammenhang auch signifikant ist – unabhängig davon, wie stark er ist. Die Signifikanz wurde im Rahmen der Korrelationsanalyse mit SPSS bestimmt (2-seitiger Test; Signifikanz-niveau = 0,01).

Anschließend wurden die signifikant starken Zusammenhänge zwischen den Variablen genauer betrachtet. Insgesamt konnte für die folgenden Kombinationen, eine signifikante und starke Korrelation festgestellt werden:

- Maximal Längsneigung und Durchschnittliche Längsneigung ($r=0,71$)
- Längsneigung $<2\%$ und Längsneigung $>2\%$ ($r=-0,87$)
- Radverkehrsinfrastruktur vorhanden und keine Radverkehrsinfrastruktur vorhanden ($r=-1$)
- Radverkehrsinfrastruktur und Breite der Radverkehrsführung ($r=0,83$ bzw. $r=-0,83$)
- Geringe Breite der Radverkehrsführung und hohe Breite der Radverkehrsführung ($r=-1$)
- Sicherheitstreppen vorhanden und kein Sicherheitstreppen vorhanden ($r=-1$)
- (kein) sicherheitstreppen vorhanden und Asphaltoberfläche ($r=-0,82$)
- Durchschnittlicher DTV_{Kfz} und DTV_{Kfz} < 10.000 und DTV_{Kfz} > 10.000 ($r=-0,83$ bzw. $r=0,83$)
- Durchschnittlicher DTV_{Rad} und DTV_{Rad} < 500 und DTV_{Rad} > 500 ($r=-0,85$ bzw. $r=0,85$)

Ein probates Mittel zum Umgang mit Multikollinearität der Prädiktor-Variablen ist es die stark untereinander korrelieren Variablen nicht in die Analyse einfließen zu lassen (siehe Khatri et al. (2016)). Kritisch ist dieses Vorgehen nur dann, wenn dadurch wichtige Informationen nicht berücksichtigt werden können. Das Reduzieren des Variablen-Sets muss daher gut begründet sein. Für die Analyse wurden jene Variablen aus dem Variablen-Set entfernt, die stark korrelieren und deren Entfernen zu keinem oder nur einem sehr geringen Informationsverlust führen. Dies ist immer dann der Fall, wenn aus jeder Prädiktoren-Kategorie mindestens eine Variable oder eine Auswahl an Variablen im gesamten Variablen-Set enthalten bleiben. Dadurch bleiben die relevanten Informationen durch sog. „Stellvertreter-Variablen“ einer Prädiktoren-Kategorie erhalten.

Das Variablen-Set wurde entsprechend den beschriebenen Prämissen reduziert. Es wurden alle Variablen a) mit ungenügendem Informationsgehalt (wenige Datenpunkte), b) vielen und starken Ausreißern und c) starker Korrelation entfernt. Eine Übersicht zur Auswahl, Ausschluss und Aggregation der Variablen ist in Anlage 9 beigefügt. Die Variablen, die für die Analyse im Variablen-Set verbleiben und in die logistische Regressionsanalyse eingeschlossen wurden, sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12 In die Analyse aufgenommene Prädiktor-Variablen

Prädiktor-Variable	Variable im Modell
Fahrtweite [km]	<i>dist</i>
Maximal Längsneigung [%]	<i>LNmax</i>
Längsneigung < 2% [%]	<i>LN < 2%</i>
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	<i>RVI</i>
Asphaltoberfläche [%]	<i>AS</i>
Ruhender Verkehr – Längsaufstellung [%]	<i>RV</i>
$v_{zul} \leq 30\text{km/h}$ [%]	$v < 30$
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route [Kfz/Tag]	<i>DTVKfz</i>
1 Fahrstreifen [%]	<i>FS1</i>
DTV > 500 Rad/Tag [%]	<i>DTVRAD</i>
Geringe Fußverkehrsdichte [%]	<i>FVD</i>
KP-Regelung RVL [n/km]	<i>KPrvl</i>
KP-Regelung durch LSA [n/km]	<i>KPLSA</i>
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	<i>UH</i>
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	<i>HKS</i>
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	<i>WGA</i>
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	<i>GFA</i>

4.2.5 Routenwahlmodell

Die Modellformulierung folgt im Wesentlichen dem in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Ansatz der multiplen logistischen Regressionsanalyse. Für die Modellschätzung wird das Programm Bison Biogeme genutzt – einer im Verkehrsbereich etablierten Software für die Analyse diskreter Entscheidungen. Die Regressionskoeffizienten des Modells werden bestimmt, indem für die beobachteten Werte möglichst hohe Wahrscheinlichkeiten vorausgesagt werden, wenn die Response-Variable = 1 ist (bzw. möglichst geringe Wahrscheinlichkeiten, wenn die Response-Variable = 0 ist). Der von Biogeme genutzte Algorithmus maximiert dabei eine Log-Likelihood Funktion (Maximum Likelihood Estimation), die aussagt, wie wahrscheinlich es ist, dass der Wert einer Response-Variable durch die Prädiktor-Variablen vorausgesagt werden kann.

Aus den Beschreibungen in Abschnitt 4.2.1 und den in Abschnitt 4.2.4 formulierten Inhalten und Anpassungen ergibt sich für den deterministischen Nutzen des Analysemodells die folgende Linearkombination:

$$z(x) = \beta_0 + \beta_{dist} * dist_i + \beta_{LNmax} * LNmax_i + \beta_{LN<2\%} * LN < 2\%_i + \beta_{RVI} * RVI_i \quad \text{Formel 12}$$

$$+ \beta_{AS} * AS_i + \beta_{RV} * RV_i + \beta_{v<30} * v < 30_i + \beta_{DTVKfz} * DTVKfz_i$$

$$+ \beta_{FS1} * FS1_i + \beta_{DTVRAD} * DTVRAD_i + \beta_{FVD} * FVD_i$$

$$+ \beta_{KPrvl} * KPrvl_i + \beta_{KPLSA} * KPLSA_i + \beta_{UH} * UH_i + \beta_{HKS} * HKS_i$$

$$+ \beta_{WG} * WGA_i + \beta_{GFA} * GFA_i$$

mit β_0 als alternativenspezifische Konstante (kürzester Weg als Referenz zur Bestimmung einer globalen Präferenz), β_x als Regressionskoeffizienten der unabhängigen Variablen X sowie den jeweiligen Ausprägungen der unabhängigen Variablen X einer Alternative i. Die Zuordnung der Variablen zu den Routeneigenschaften ist in Tabelle 12 dargestellt.

Um den Einfluss personenspezifischer oder wegespezifischer Merkmale auf die Routenwahl zu prüfen, werden eigene Modelle für Männer und Frauen, nach Wegezwecken und für die unterschiedlichen Radfahrtypen gebildet. Die Modellformulierung unterscheidet sich dabei jedoch nicht.

4.2.6 Bestimmung der Modellgüte

Für logistische Regressionsmodelle kann, gleich welcher Art das Modell ist, dessen Güte bestimmt werden. Dazu werden üblicherweise Gütemaße zur Beurteilung der einzelnen Regressionskoeffizienten sowie zur Beurteilung der Güte des Gesamtmodells berechnet. Die Maße werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Die Erläuterung folgt im Wesentlichen (Backhaus, et al., 2016).

Signifikanz der Regressionskoeffizienten

Mit einem ersten Testverfahren wird zunächst geprüft, ob die Regressionskoeffizienten des Modells signifikant sind. Dazu wird für jeden Regressionskoeffizienten des Modells der sog. Wald-Test durchgeführt. Die Ergebnisse des Wald-Tests zeigen, ob die Regressionskoeffizienten des Modells signifikant sind. Sind die Koeffizienten der unabhängigen Variablen signifikant (sign. < 0,05), so haben sie einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable. Die Teststatistik berechnet sich nach:

$$w = \frac{\beta_j}{SE_{\beta_j}} \quad \text{Formel 13}$$

mit β_j als Regressionskoeffizient einer Variable j und SE als dem Standardfehler von β_j .

Odds Ratio

Der Einfluss einer unabhängigen Variable wird über die Odds Ratio interpretiert. Sie ist ein gebräuchliches Maß, um die Stärke von Zusammenhängen zu quantifizieren und ist relativ einfach zu interpretieren. Sie wird für jede einzelne Variable aus dem Regressionskoeffizienten der unabhängigen Variable und der e-Funktion berechnet. Die Berechnung erfolgt nach

$$OR_{\beta_j} = e^{\beta_j} \quad \text{Formel 14}$$

Nimmt die Odds Ratio einen Wert ungleich 1 an, so wird von einem signifikanten Einfluss der unabhängigen Variable auf die abhängige Variable ausgegangen. Ist die Odds Ratio > 1, so ist von einem positiven Zusammenhang auszugehen (positiver Einfluss der unabhängigen Variable). Ist die Odds Ratio < 1, so hat die unabhängigen Variable einen negativen Einfluss. Je größer der Abstand der Odds Ratio von 1, desto stärker ist der Zusammenhang.

Log-Likelihood

Für die Schätzung von Logit-Modellen wird die MLE verwendet. Daher kann der Wert der maximierten Log-Likelihood (LL) zur Beurteilung der Güte des Gesamtmodells herangezogen werden (Backhaus, et al., 2016). Statt der LL wird meist der Wert -2LL (= -2 * LL) genutzt. Da der Wert -2LL allein wenig aussagt, wird die -2LL des

Modells üblicherweise der $-2LL$ eines sog. Basis-Modells gegenübergestellt. Das Basis-Modell beinhaltet dabei keine der unabhängigen Variablen, sondern lediglich die Konstante. Ist $-2LL_{\text{Basis}} > -2LL_{\text{Modell}}$, so führt der Einbezug der unabhängigen Variablen zu einer höheren Modellgüte. Die Werte werden im Rahmen der Modellschätzung von der genutzten Software ausgegeben und können anschließend verglichen werden.

Likelihood-Ratio-Test

Ein wichtiger Test für die Überprüfung der Modellgüte ist der Likelihood-Ratio-Test bzw. Likelihood-Quotienten-Test. Die Likelihood Ratio (LLR) berechnet sich nach

$$LLR = -2 * \ln\left(\frac{L_0}{L_{\text{Mod}}}\right) = -2 * (LL_0 - LL_{\text{Mod}})$$

Formel 15

LL_0 bezeichnet dabei die maximierte Log-Likelihood (LL) für das Basis-Modell (auch Null-Modell genannt). LL_{Mod} beziffert die maximierte LL für das geschätzte Modell. Je größer die Differenz zwischen den beiden Modellen, desto besser ist das geschätzte Modell. Die LLR kann zudem genutzt werden, um die Signifikanz des Gesamtmodells zu testen. Unter der Annahme, dass die Korrelationskoeffizienten der Variablen keinen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Zusammenhänge liefern – also mit der Nullhypothese $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0$ – ist die LLR mit n Freiheitsgraden annähernd χ^2 -verteilt. Daher kann die LLR mit den n Freiheitsgraden der χ^2 -Verteilung gegenübergestellt und die Signifikanz ermittelt werden. Ist die LLR größer als der tabellierte χ^2 -Wert, kann die Nullhypothese abgelehnt und das Modell als signifikant angesehen werden. Ist der Wert größer, ist die Nullhypothese anzunehmen und das Modell verfügt über keinen signifikanten Erklärungsgehalt.

Pseudo-R²-Statistiken

In Analogie zum R² bei der linearen Regression können bei der logistischen Regression sog. Pseudo-R²-Statistiken herangezogen werden, um die Modellgüte zu bestimmen. Übliche Maße sind vor allem das McFadden-R², das Cox&Snell-R² sowie das Nagelkerke's-R². Sie werden ähnlich wie das R² bei der linearen Regression interpretiert, ähneln dem R² der linearen Regression jedoch nur insofern, als dass ihr Wertebereich zwischen 0 und 1 liegt (Backhaus, et al., 2016). Ein höheres R² kommt, ähnlich der linearen Regression, einer besseren Anpassung gleich.

Ein wichtiges Gütemaß ist das **McFadden-R²**. Es wird durch den Quotienten der LL des Null-Modells und des Gesamt-Modells gebildet und berechnet sich nach:

$$R_{\text{McF}}^2 = 1 - \left(\frac{LL_{\text{Mod}}}{LL_0} \right)$$

Formel 16

Bei geringen Unterschieden der LL beider Modelle ist der Quotient nahe 1 und das McF-R² nahe 0. Das Erreichen eines McF-R² = 1 gilt bei realen Daten allgemeinhin als nahezu unmöglich und entspräche einer perfekten Anpassung. In der Praxis liegen die Werte des McF-R² deutlich niedriger als beim R² von Modellen der linearen Regression. So deuten bereits Werte zwischen 0,2 und 0,4 auf eine gute Modellanpassung hin (Backhaus, et al., 2016).

Ein weiteres Gütemaß ist das **Cox&Snell-R²**. Es berechnet sich nach:

$$R_{\text{CS}}^2 = 1 - e^{\left(\frac{-2}{n} [LL_{\text{Mod}} - LL_0] \right)}$$

Formel 17

mit LL als Log-Likelihood der beiden Modelle und n als Fallzahl (UZH, 2020). Das Cox&Snell-R² kann nur Werte kleiner 1 annehmen, weil L_0 stets größer 0 ist. Das bedeutet, dass es selbst bei einer perfekten Anpassung Werte liefern wird, die kleiner als 1 sind. Der resultierende Wert ist zwar schwer zu interpretieren – er kann jedoch Hinweise auf die Modell-Güte geben. So entsprechen Werte nahe 0 eher einer geringen Modellgüte (Backhaus, et al., 2016).

Das **Nagelkerke's-R²** ist ein weiteres Maß, das zur Bestimmung der Modellgüte herangezogen werden kann. Es berechnet sich nach

$$R_N^2 = \frac{R_{CS}^2}{1 - e^{(\frac{2}{n}LL_0)}} \quad \text{Formel 18}$$

(UZH, 2020). Es basiert im Wesentlichen auf dem Wert des Cox&Snell-R² und modifiziert so, dass auch der Wert 1 erreicht werden kann. Damit lassen sich die Werte des Cox&Snell-R² ähnlich den Werten des R² bei der linearen Regressionsanalyse interpretieren. Werte nahe 1 zeigen eine hohe Modellgüte an; Werte nahe 0 eine sehr geringe (Backhaus, et al., 2016).

Klassifikationsstatistik

Als ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Modellgüte wird die Klassifikationsstatistik des Modells herangezogen. Sie gibt Auskunft darüber, wie gut das Modell die Wahl einer Route voraussagt (Backhaus, et al., 2016). Die Klassifikationsstatistik ist beispielhaft in Tabelle 13 dargestellt. Sie stellt die Beobachtungen in den Daten den Vorhersagen des Modells gegenüber und zeigt damit an, wie exakt das geschätzte Modell die Wahl für die vorliegenden Fälle (z.B. Wahl und Ablehnung von Routen) prognostiziert. Nach (Powers, 2007) können in der Klassifikationsstatistik die folgenden Fälle auftreten:

- a) **Richtig Positive:** wird für einen Fall im Datensatz y=1 beobachtet (Route gewählt = positiv) und dieser auch durch das Modell positiv prognostiziert (y=1), dann wird der Fall als *richtig positiv* bezeichnet.
- b) **Richtig Negative:** wird für einen Fall im Datensatz y=0 beobachtet (Route abgelehnt = negativ) und dieser durch das Modell als negativ prognostiziert (y=0), dann wird der Fall als *richtig negativ* bezeichnet.
- c) **Falsch Positive:** wird für einen Fall im Datensatz y=0 beobachtet (Route abgelehnt = negativ), dieser aber durch das Modell als positiv erkannt (y=1), dann wird der Fall als *falsch positiv* bezeichnet.
- d) **Falsch Negative:** wird für einen Fall im Datensatz y=1 beobachtet (Route gewählt = positiv), dieser jedoch durch das Modell als negativ prognostiziert (y=0), dann wird der Fall als *falsch negativ* bezeichnet.

Die Bestimmung der Werte der Klassifikationsstatistik erfolgt über den Einbezug der Routeneigenschaften sowie der geschätzten Modellparameter, aus denen die Wahrscheinlichkeiten für die Wahl/Ablehnung einer Route berechnet wird. Dazu wird ein festzulegender Trennwert (meist 0,5 bzw. 50%) definiert. Liegt die Wahrscheinlichkeit über dem Trennwert, so ist y = 1 (Wahl), andernfalls y = 0 (Ablehnung).

Tabelle 13 Klassifikationsstatistik – Gegenüberstellung der beobachteten und der vorhergesagten Werte.

		Vorhergesagt	
		Ja (y=1)	Nein (y=0)
Beobachtet	Ja (y=1)	richtig positive	falsch negative
	Nein (y=0)	falsch positive	richtig negative

Über das beschriebene Verfahren können Prozentsätze zu den richtigen/falschen Vorhersagen berechnet werden. Aus den einzelnen Werten der richtigen (positiven und negativen) Vorhersagen wird schließlich ein Gesamtprozentsatz der richtigen Vorhersagen berechnet (Backhaus, et al., 2016).

5 ANALYSE DER VERKEHRSSICHERHEIT

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse der Verkehrssicherheit mit unterschiedlichen räumlichen Bezügen und Detailgrad dargestellt. Abschnitt 5.1 enthält die Ergebnisse der differenzierten Unfallmodelle für Dresden für Strecken, Annäherungsbereiche, Knotenpunkte und Knotenpunktzufahrten, sowie eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Die Resultate der vereinfachten Unfallmodelle sind in Abschnitt 5.2 enthalten und werden in Abschnitt 5.3 mit den Ergebnissen der differenzierten Modelle verglichen. In Abschnitt 5.4 werden die Ergebnisse der Analyse der kritischen Situationen als Indikator der subjektiven Verkehrssicherheit erläutert. Abschließend werden die Erkenntnisse in Abschnitt 5.5 zusammengefasst.

5.1 Differenzierte Unfallmodelle für Dresden

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Unfallanalysen der differenzierten Modelle für die Untersuchungsstadt Dresden beschrieben. In der Betrachtung wird in die Untersuchungsgegenstände Strecken, Annäherungsbereiche und Knotenpunkte unterschieden. Ergänzend zu der in Abschnitt 3.2.1 definierten Abgrenzung für Knotenpunkte wird zusätzlich die Betrachtung der einzelnen Knotenpunktzufahrten durchgeführt, um einerseits allgemeine Empfehlungen zur Gestaltung von Knotenpunkten treffen zu können und andererseits möglichst dedizierte Aussagen zur Sicherheitswirkung der Gestaltung einzelner Infrastrukturelemente treffen zu können. Außerdem werden für die Strecken noch Untersuchungen zu selbstständigen Wegen vorgenommen.

Die Abschnitte 5.1.1 bis 5.1.4 enthalten jeweils Inhalte zur deskriptiven Statistik mit:

- einem Überblick über die Kollektivgrößen und Eigenschaften der untersuchten Infrastrukturen sowie
- Strukturanalysen der an diesen Infrastrukturen aufgetretenen Unfällen und
- im Ergebnis die Auswahl der Unfallkollektive, welche in der multikriteriellen Betrachtung untersucht werden.

Die Abschnitte zur multikriteriellen Statistik enthalten:

- die Ergebnisse der Unfallmodelle (Methodik siehe Abschnitt 4.1) und
- daraus abgeleitete Aussagen und Interpretationen zum Einfluss von signifikant auf die Unfallanzahl wirkender gestalterischer, betrieblicher und verkehrlicher Eigenschaften der verschiedenen Infrastrukturelemente. Zusätzlich werden die Eigenschaften diskutiert, für welche kein signifikanter Einfluss auf die Unfallanzahl nachgewiesen werden konnte.
- Es werden sowohl Ergebnisse aus dem Modell mit der besten Anpassung (= Endmodell) als auch aus alternativen Modellen zum Einfluss von signifikant auf die Unfallanzahl wirkenden Eigenschaften (= Alternativmodell) diskutiert. Eine Lesehilfe für die Ergebnisse die Modelle befindet sich in Anlage 1.

5.1.1 Strecken

Deskriptive Statistik – straßenbegleitende Strecken

Das zu untersuchende Streckennetz umfasst insgesamt ca. 250 km Strecke mit Radverkehrsführung auf der Fahrbahn oder straßenbegleitenden Radverkehrsanlagen, für welche sowohl Kfz- als auch Radverkehrsstärken vorliegen. Alle Streckenabschnitte weisen eine Länge von mindestens 100 m auf.

In Tabelle 14 sind die Eigenschaften der Strecken mit Radverkehrsführung auf der Fahrbahn oder straßenbegleitenden Radverkehrsanlagen festgehalten. Neben den Merkmalsausprägungen enthält die Tabelle die gemittelten Unfalldichten. Informationen zu den über die Merkmalsausprägungen gemittelten Unfallraten sind in Anlage 3 dargestellt. Alle Angaben sind querschnittbezogen, sodass z. B. die Radverkehrsführungsform nur eindeutig zugewiesen werden kann, wenn diese in beiden Fahrtrichtungen gleich ist. Bei unterschiedlichen Ausprägungen je Richtung werden die Gruppen zu den aggregierten Variablen „Mischverkehrskombination“ bzw. „Radverkehrsanlagenkombination“ bzw. „Sonstige Kombination“ zusammengefasst.

Eine querschnittsfeine Analyse der Verkehrssicherheit ist zwar technisch möglich (Verkehrsstärken, Infrastruktur- und Betriebsdaten liegen roh richtungsfein vor bzw. können so erhoben werden), bei einer richtungsfeinen Betrachtung verdoppelt sich jedoch die Anzahl der Infrastrukturelemente bei gleichbleibender (bzw. ggf. durch fehlende Möglichkeit der Zuordnung zu einer Fahrtrichtung reduzierte) Unfallanzahl. Aufgrund des hohen Aufbereitungsaufwands bei möglicherweise zu kleinem Besetzungsgrad für die multivariate Analyse wurden die Streckenabschnitte nur querschnittsfein analysiert. Die fahrtrichtungsfeinen Merkmale werden somit nur in der Routenwahl betrachtet.

Die Streckenabschnitte liegen überwiegend (79 %) auf Hauptverkehrsstraßen, was mit der Datengrundlage zu begründen ist, da an Hauptverkehrsstraßen deutlich häufiger Verkehrsstärkeerhebungen durchgeführt werden und das Kollektiv nicht auf Basis von Repräsentativität, sondern Datenverfügbarkeit ausgewählt wurde.

Die nutzbare Fahrbahnbreite ist mit 7,7 m im Durchschnitt etwas breiter als zweistreifige Fahrbahnen mit Radverkehr im Mischverkehr in den typischen Entwurfssituationen (5,50 m bis 7,50 m) laut FGSV (2006). Dabei liegen vorwiegend zweistreifige Querschnitte (84 %) vor und weniger einstreifige Querschnitte als Strecken mit drei und mehr Fahrstreifen. Eine bauliche Mitteltrennung liegt in 13 % der Fälle vor, an den übrigen Strecken sind markierte Mitteltrennungen etwa so häufig wie keine Mitteltrennung.

Die Verteilung der Radverkehrsführungsform im Kollektiv zeigt, dass der Radverkehr an über der Hälfte der Strecken im Mischverkehr geführt wird. Bei Mischverkehrsführungen mit zusätzlichen Angeboten liegen etwa dreimal so viele Mischverkehrsstrecken mit Gehwegfreigabe für den Radverkehr vor, wie Mischverkehr mit Schutzstreifen. Wenn ein Schutzstreifen oder eine Radverkehrsanlage vorliegt, ist diese im Durchschnitt 2,18 m breit, was ca. dem Regelmaß für Radwege entspricht. Größere Breiten liegen an gemeinsamen Geh- und Radwegen vor.

Die Merkmale Abstand Radweg – Fahrbahn/ruhender Verkehr und Sicherheitstrennstreifen zu ruhendem Verkehr sind im Kollektiv so selten besetzt, dass eine quantifizierte Überprüfung des Einflusses dieser Größen auf die Unfallanzahl nicht möglich ist.

Tabelle 14 Verteilung der Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Strecken

Merkmal	Ausprägung	Anzahl [-]	Länge [km]	Anteil Anzahl	Anteil Länge	Unfalldichte [U(P,S) _{Rif} /(km*Jahr)]
	gesamt	784	255,5	-	-	1,19
Netzfunktion	Hauptverkehrsstr.	580	201,9	74%	79%	1,25
	Nebennetzstr.	204	53,5	26%	21%	1,00
nutzbare Fahrbahnbreite	[m]	784	255,5	Minimum:3,0	Mittelwert (gew.):7,7	Maximum:16,5
Anzahl Fahrstreifen	1	21	5,3	3%	2%	1,17
	2	639	214,2	82%	84%	1,09
	3	24	5,7	3%	2%	1,35
	4	97	30,0	12%	12%	1,84
	5	3	0,4	0%	0%	0,40
Mitteltrennung	Keine	353	111,5	45%	44%	0,84
	Markiert	326	113,0	42%	44%	1,39
	Baulich	105	31,0	13%	12%	1,74
Radverkehrsführungsform beidseitig	Mischverkehr	468	152,4	60%	60%	0,80
	Mischverkehr mit Schutzstreifen	32	8,4	4%	3%	1,53
	Mischverkehr; Gehweg "Radfahrende frei"	69	23,5	9%	9%	1,81
	Mischverkehr mit Schutzstreifen; Gehweg "Radfahrende frei"	1	0,3	0%	0%	0,00
	Radfahrstreifen	43	12,6	5%	5%	2,74

Merkmal	Ausprägung	Anzahl [-]	Länge [km]	Anteil Anzahl	Anteil Länge	Unfalldichte [$U(P,S)_{RII}/(\text{km}^*\text{Jahr})$]
	Radweg	65	19,2	8%	8%	1,78
	Gemeinsamer Geh- und Radweg	42	20,1	5%	8%	1,25
	Sonstige Kombination	64	19,0	8%	7%	0,80
	Mischverkehrskombination	595	191,8	76%	75%	0,99
	Radverkehrsanlagen-kombination	165	57,6	21%	23%	1,80
Breite Radverkehrsanlage	[m]	195	63,1	Minimum:1,25 (gew.):2,18		Mittelwert Maximum:5,5
Abstand Radweg – Fahrbahn/ruhender Verkehr	nicht vorhanden	714	231,6	91%	91%	1,19
	vorhanden	70	23,9	9%	9%	1,13
Sicherheits-Trennstreifen zum ruhenden Verkehr	nicht vorhanden	774	251,8	99%	99%	1,17
	vorhanden	10	3,7	1%	1%	2,28
Oberfläche beidseitig	Asphalt	626	206,1	80%	81%	1,18
	Pflaster	66	21,3	8%	8%	1,42
	Kopfsteinpflaster	26	8,1	3%	3%	1,11
	Natur, gebunden (Schotter)	1	0,4	0%	0%	0,45
	Unterschiedlich je Seite	65	19,6	8%	8%	1,25
Gleise im Mischverkehr	nicht vorhanden	732	239,7	93%	94%	1,10
	vorhanden	52	15,7	7%	6%	2,44
Ruhender Verkehr	nicht vorhanden	412	145,0	53%	57%	1,20
	einseitig	161	44,7	21%	18%	1,04
	beidseitig	209	65,1	27%	25%	1,29
	beidseitig alternierend	2	0,6	0%	0%	0,00
Art des ruhenden Verkehrs	Längs	331	100,1	89%	91%	1,14
	Schräg	4	0,8	1%	1%	2,36
	Senkrecht	13	3,1	3%	3%	0,93
	Kombination	24	6,5	6%	6%	1,48
Lage des ruhenden Verkehrs	Fahrbahn	212	66,7	57%	60%	0,86
	Fahrbahn markiert	15	4,5	4%	4%	1,98
	Fahrbahn baulich	64	16,5	17%	15%	2,00
	Seitenraum	51	15,7	14%	14%	1,10
	Kombination	30	7,1	8%	6%	1,36
Anteil Länge ruhender Verkehr	[%]	370	110,2	Minimum:0,05 (gew.):0,61		Mittelwert Maximum:1,13
Dichte Querungsanlagen	[Anzahl/km]	784	255,5	Minimum:0 (gew.):0,97		Mittelwert Maximum:19,26
Dichte Haltestellen	[Anzahl/km]	784	255,5	Minimum:0 Mittelwert (gew.):2,8 Maximum:35,37		
Dichte Grundstückzufahrten	[Anzahl/km]	784	255,5	Minimum:0 (gew.):22,35		Mittelwert Maximum:101,49
Zulässige Geschwindigkeit	30 km/h	152	38,8	19%	15%	1,13
	50 km/h	600	192,8	77%	75%	1,24
	60 km/h	19	9,9	2%	4%	0,75
	80 km/h	5	7,8	1%	3%	0,19
	100 km/h	8	6,2	1%	2%	0,02
	größer als 30 km/h	632	216,7	81%	85%	1,20

Die Oberfläche der Radverkehrsanlagen oder Fahrbahn (im Mischverkehr) ist am häufigsten (80 %) Asphalt. Gleise wurden nur erfasst, wenn der Radverkehr auf der Strecke im Mischverkehr geführt wird, was in 6 % der Streckenlänge zutrifft (und somit auf ca. 8 % der Mischverkehrsstrecken).

Ruhender Verkehr ist an 43 % der Strecken angeordnet, wobei überwiegend beidseitig geparkt werden kann. An Strecken mit ruhendem Verkehr ist dieser zu 90 % in Längsaufstellung angeordnet und zu 80 % auf der Fahrbahn (mit oder ohne Markierung oder bauliche Begrenzung). Im Durchschnitt ist in 60 % der Streckenlänge ruhender Verkehr erlaubt bzw. vorhanden. Die maximale Parkflächenauslastung von 113 % entsteht hier durch die Methode, nach welcher die Längen abzüglich der Knotenpunktinnbereiche ermittelt wurden (siehe Abbildung 7), sodass z. B. das Parken über die durchgehende Strecke einer Einmündung einen Anteil von mehr als 100 % Länge mit ruhendem Verkehr erzeugt.

Die Querungsstellendichte liegt im Durchschnitt bei einer Querungsstelle je Kilometer Strecke. Von den insgesamt ca. 250 Querungsstellen ist etwa die Hälfte signalisiert (Zufußgehenden-LSA).

Die Haltestellendichte beträgt im Durchschnitt zwei bis drei Haltestellen je Kilometer Strecke, wobei hier jede Teilhaltestelle als Referenz dient. Dabei sind etwa zwei Drittel der insgesamt 715 Haltestellen Bushaltestellen und ein Drittel Straßenbahnhaltestellen (tlw. auch für den Busverkehr).

Im Durchschnitt liegen 22 Grundstückszufahrten auf einem Kilometer Strecke vor (auf die Straßenseiten bezogen somit im Mittel eine Grundstückszufahrt pro 90 m) und maximal etwa 100 Zufahrten. Etwa zwei Drittel der Zufahrten sind privat (Zufahrtstyp Wohnen), die anderen Zufahrten führen zu gewerblich genutzten Flächen.

In 75 % der Strecken liegt die zulässige Höchstgeschwindigkeit bei 50 km/h, nur an 15 % der Strecken bei 30 km/h.

In der Betrachtung der Korrelationsmatrix (Abbildung 17) zeigen sich starke Zusammenhänge (Koeffizient $\geq 0,5$) insbesondere zwischen den Entwurfsmerkmalen und den Verkehrsstärken.⁹ Den stärksten positiven Zusammenhang haben hier die Verkehrsstärke des motorisierten Verkehrs (DTV Kfz) mit der Breite der Fahrbahn und dem Vorhandensein einer Mitteltrennung. Beide Zusammenhänge sind sachlogisch, da i. d. R. für Strecken mit höheren Verkehrsstärken ein höherer Ausbaustandard vorliegt. Die Breite der Fahrbahn ist wiederum auch mit der Mitteltrennung und Fahrstreifenanzahl verbunden.

Ein negativer Zusammenhang besteht zwischen der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr und der Verkehrsstärke des motorisierten Verkehrs (DTV Kfz), was durch die Einsatzgrenzen für Radverkehrsanlagen inhaltlich zu begründen ist, ebenso wie die Zusammenhänge zwischen Radverkehrsführungsformen, Fahrstreifenanzahl und der Mitteltrennung, da diese mit der Verkehrsstärke des motorisierten Verkehrs korrelieren.

Zuletzt ist noch der Zusammenhang zwischen Netzfunktion und Verkehrsstärke des motorisierten Verkehrs (DTV Kfz) zu nennen, nach dem an Hauptverkehrsstraßen tendenziell höhere Verkehrsstärken vorliegen.

⁹ Zusammenhänge zwischen verschiedenen Aggregationen eines Merkmals werden hier nicht interpretiert.

DTV Rad [Rf/24h]	
Schwerverkehrsanteil [%]	
DTV Kfz [Kfz/24h]	
Zulässige Geschwindigkeit größer 30 km/h [-]	
Zulässige Geschwindigkeit [km/h]	
Dichte Grundstückzufahrten [Anzahl/km]	
Dichte Haltestellen [Anzahl/km]	
Dichte Querungsanlagen [Anzahl/km]	
Anteil Länge ruhender Verkehr [%]	
Lage des ruhenden Verkehrs [-]	
Art des ruhenden Verkehrs [-]	
Ruhender Verkehr [-]	
Gleise im Mischverkehr [-]	
Oberfläche = Asphalt	
Abstand Radweg – Fahrbahn/ruhender Verkehr [-]	
Breite Radverkehrsanlage [-]	
Radverkehrsanlagenkombination [-]	
Mischverkehrskombination [-]	
Mischverkehr [-]	
Radverkehrsführungsform [-]	
Mitteltrennung [-]	
Radverkehrsführungsform [-]	
Mischverkehr [-]	
Mischverkehrskombination [-]	
Radverkehrsanlagenkombination [-]	
Breite Radverkehrsanlage [-]	
Abstand Radweg – Fahrbahn/ruhender Verkehr [-]	
Oberfläche = Asphalt	
Gleise im Mischverkehr [-]	
Ruhender Verkehr [-]	
Art des ruhenden Verkehrs [-]	
Lage des ruhenden Verkehrs [-]	
Anteil Länge ruhender Verkehr [%]	
Dichte Querungsanlagen [Anzahl/km]	
Dichte Haltestellen [Anzahl/km]	
Dichte Grundstückzufahrten [Anzahl/km]	
Zulässige Geschwindigkeit [km/h]	
Zulässige Geschwindigkeit größer 30 km/h [-]	
DTV Kfz [Kfz/24h]	
Schwerverkehrsanteil [%]	
DTV Rad [Rf/24h]	

Abbildung 17 Korrelationsmaße (Spearman) der verkehrlichen, betrieblichen und infrastrukturellen Merkmale an Strecken

Die Verteilung der Unfalltypen im Streckenkollektiv zeigt Abbildung 18, wobei die Darstellung zwischen der Betrachtung aller Unfallkategorien und Unfällen mit Personenschäden differenziert. Fahrunfälle und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle haben in beiden Betrachtungen die höchsten Anteile, wobei Fahrunfälle in den Unfällen mit Personenschäden häufiger auftreten. Das ist u. a. damit zu erklären, dass Fahrunfälle (und damit häufig Alleinunfälle) i. d. R. nicht gemeldet werden, wenn durch diese kein schwererer (Sach- oder) Personenschaden entsteht. Dies führt zum einen zu einer hohen Dunkelziffer für Fahrunfälle (vor allem bei Sachschadensunfällen) und zum anderen zu einer größeren Repräsentation der Fahrunfälle in den Unfällen mit Personenschäden. Da hinter diesem Zusammenhang jedoch keine infrastrukturelle Kausalität steht und sich zudem die restlichen Unfalltypen gleichmäßig verteilen, werden für die multikriterielle Betrachtung alle Unfallkategorien einbezogen, um mit einem größeren Kollektiv die Aussagekraft der Modelle zu erhöhen.

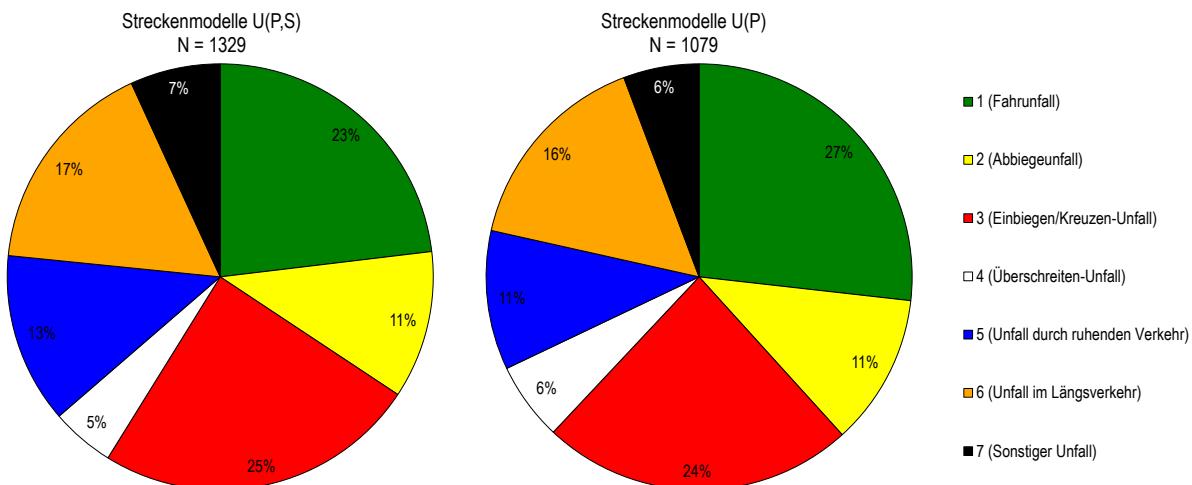


Abbildung 18 Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeteiligung) an Strecken für alle Unfallkategorien (links) und Unfälle mit Personenschäden (rechts)

Für die Definition der Teilkollektive für die multivariate Betrachtung werden hier die häufigsten Unfalltypen kurz diskutiert. Aufgrund der geringen Besetzung der dreistelligen Unfalltypen und damit fehlenden Analysemöglichkeit in den multivariaten Modellen wurden diese auf zweistellige Unfalltypen aggregiert:

- Für Fahrunfälle kann durch die Betrachtungen zweistelliger Unfalltypen kein Aufschluss zum Einfluss infrastruktureller Merkmale erzeugt werden (die häufigsten zweistelligen Unfalltypen sind hier 14: Fahrunfall auf der Geraden, 19: sonstige Fahrunfälle).
- Abbiegeunfälle treten im Kollektiv zwar verhältnismäßig selten auf, sollen jedoch trotzdem analysiert werden. Eine Differenzierung in zweistellige Unfalltypen ist aufgrund der geringen absoluten Häufigkeit des Typs nicht möglich.
- Einbiegen/Kreuzen-Unfälle treten an Grundstückzufahrten auf der Strecke auf (da das Unfallgeschehen an Anschlussknotenpunkten aus dieser Betrachtung ausgeschlossen wird). Hier geben die zweistelligen Unfalltypen insbesondere Informationen zur Fahrtrichtung der Beteiligten – richtungsfeine Verkehrsstärken und insbesondere Informationen zu entgegen der Fahrtrichtungen fahrenden Radfahrenden liegen für die Strecken jedoch nicht vor.
- Unfälle durch den ruhenden Verkehr sind zu etwa der Hälfte Unfälle durch Türen/Ein- & Aussteigen/Be- & Entladen (Unfalltyp 58; Dooring-Unfälle). Die restlichen Unfälle sind über die zweistelligen Unfalltypen unsystematisch verteilt. Für eine gesonderte Betrachtung nur der Dooring-Unfälle ist der Besetzungsgrad der Unfälle je Strecke jedoch zu gering.
- Unfälle im Längsverkehr sind überwiegend Unfälle zwischen Nebeneinanderfahrenden (z. B. durch zu dichtes Überholen) und sich Begegnende (z. B. zwei Radfahrende im Seitenraum, wobei einer der Radfahrenden entgegen der Fahrtrichtung fährt, siehe Abbildung 19). Für Längsverkehrsunfälle wird

vermutet, dass sich die infrastrukturellen Einflüsse insbesondere durch die Beteiligtenkonstellationen unterscheiden, da Unfälle zwischen Radfahrenden und Kfz eher auf der Fahrbahn und Unfälle zwischen Radfahrenden eher im Seitenraum erwartet werden. Die Betrachtung der Beteiligtenkonstellation über alle Unfalltypen und Längsverkehrsunfälle (Abbildung 20) zeigt auch, dass diese für Längsverkehrsunfälle deutlich mehr Unfälle zwischen Radfahrenden aufweist als alle anderen Unfalltypen. Die Betrachtung gesonderter Modelle für Längsverkehrsunfälle zwischen Radfahrenden und Kfz und zwischen Radfahrenden und Radfahrenden ist jedoch aufgrund der geringen Fallzahl nicht möglich.

Aufgrund der geringen Fallzahl, bzw. und großen Heterogenität werden Überschreiten-Unfälle und Sonstige Unfälle im Weiteren nicht betrachtet.

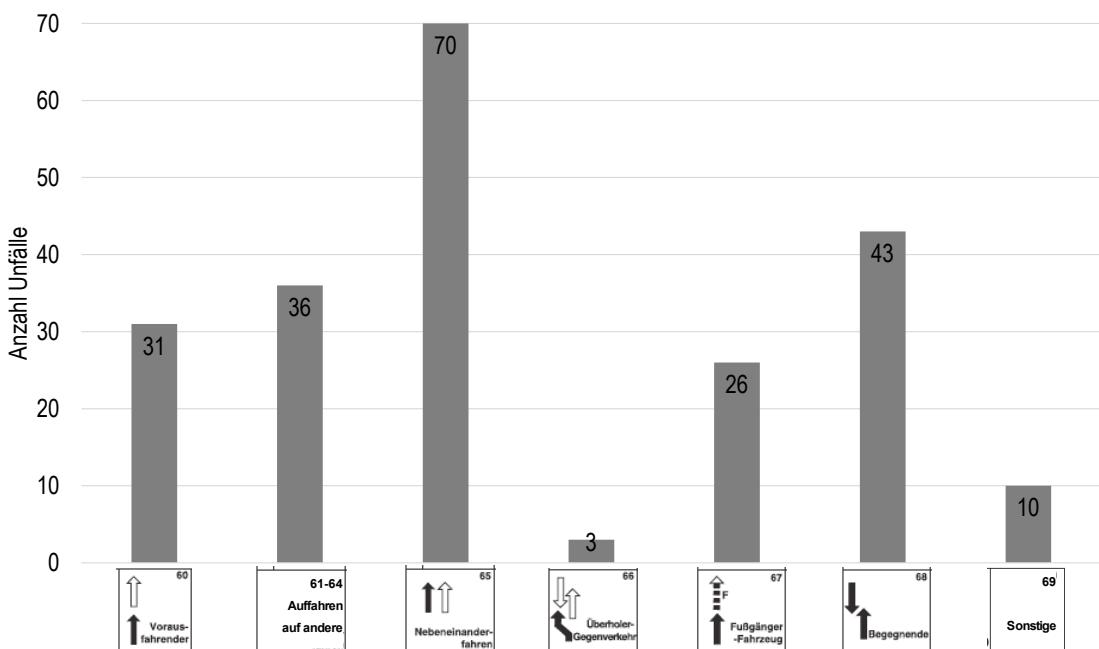


Abbildung 19 Absolute Häufigkeit der zweistelligen Unfalltypen für Längsverkehrsunfälle an Strecken

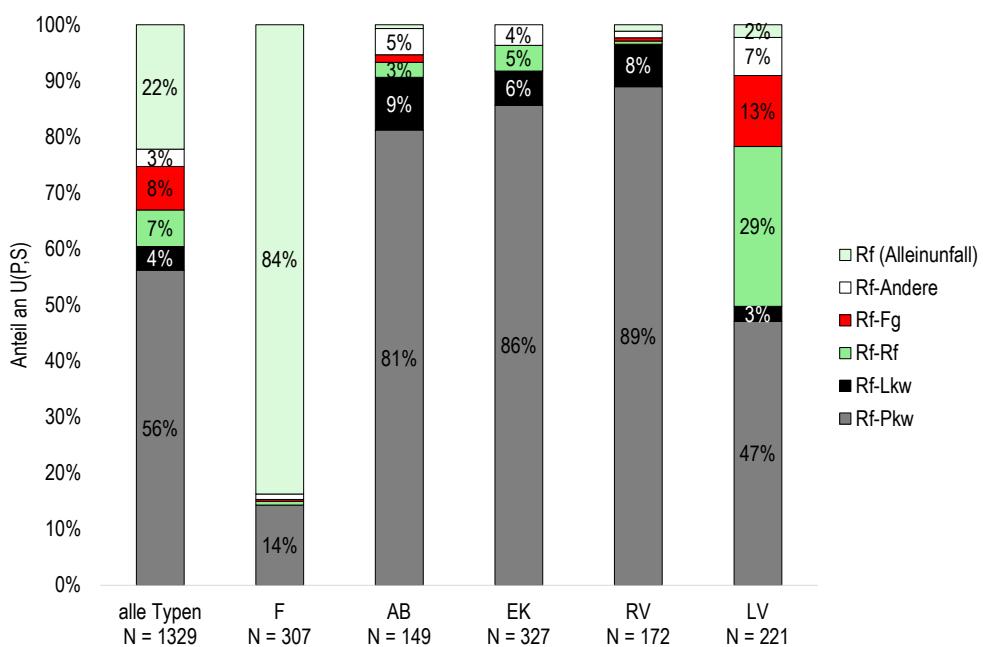


Abbildung 20 Verteilung der Beteiligtenkonstellation für Unfälle an Strecken

Die Betrachtung der Unfallumstände zeigt, dass die Unfälle überwiegend (80 %) bei Helligkeit und trockener Fahrbahn (83 %) stattfinden. Damit ergeben sich keine weiteren dedizierten Modelle z. B. für Unfälle bei Nässe um Zusammenhänge mit der Oberfläche festzustellen.

Zusammenfassend werden für die multivariate Betrachtung folgende Kollektive für die Strecken einbezogen:

- U(P,S) für Aussagen zum Gesamtunfallgeschehen
- U(P,S)-Typ 1 für Aussagen zu Fahrunfällen
- U(P,S)-Typ 2 für Aussagen zu Abbiegeunfällen
- U(P,S)-Typ 3 für Aussagen zu Einbiegen/Kreuzen-Unfällen (an Grundstückzufahrten)
- U(P,S)-Typ 5 für Aussagen zu Unfällen durch den ruhenden Verkehr
- U(P,S)-Typ 6 für Aussagen zu Unfällen im Längsverkehr

Multivariate Statistik – straßenbegleitende Strecken

In der multivariaten Statistik werden die in der deskriptiven Statistik beschriebenen Merkmale auf ihren Einfluss auf die Unfallanzahl an Strecken geprüft. Dabei zeigen folgende Einflussgrößen einen Zusammenhang mit der Unfallanzahl (mind. eines Teilkollektivs), wobei die konkreten Zusammenhänge nachfolgend beschrieben werden:

- Verkehrsstärke insbesondere des Radverkehrs, teilweise des Kfz-Verkehrs
- Zulässige Höchstgeschwindigkeiten für den motorisierten Verkehr
- Fahrbahnbreite
- Radverkehrsführungsform
- Dichte der Grundstückszufahrten
- Dichte der Haltestellen
- Gleise im Mischverkehr
- Anteil der Länge des ruhenden Verkehrs

Merkmale, für die in den Modellen kein signifikanter Einfluss auf die Unfallanzahl nachgewiesen werden konnte, werden im Folgenden textlich interpretiert:

- Die Verkehrsstärke des Schwerverkehrs bzw. der Schwerverkehrsanteil zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Unfallanzahl. Es wird vermutet, dass hohe Schwerverkehrsanteile eher einen Einfluss auf die Unfallschwere zeigen, welche nicht Bestandteil der Untersuchung ist.
- Sowohl die Netzfunktion als auch Fahrstreifenanzahl und Mitteltrennung korrelieren stark mit der Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs. Diese Variablen liefern daher inhaltlich keine ergänzenden Erklärungsansätze für das Unfallgeschehen. Zudem kann deren Einfluss auf die Unfallanzahl aufgrund der Korrelationen auch statistisch nicht bestimmt werden. In der Interpretation der Modelle sind diese Korrelationen zu berücksichtigen, die Kfz-Verkehrsstärken stehen hier immer auch stellvertretend für Netzfunktion, Fahrstreifenanzahl und Mitteltrennung.
- Breiten von Radverkehrsanlagen und Sicherheitsräumen können nur für Strecken mit Radverkehrsanlagen bewertet werden. Da die Anzahl der Strecken mit Radverkehrsanlagen im Kollektiv sehr klein ist, kann keine Bewertung des Einflusses dieser Breiten getroffen werden.
- Die Oberfläche der Radverkehrsanlagen (bzw. vom Radverkehr genutzter Anlagen) wurde aufgrund der Umsetzbarkeit der Erhebung nur in der Materialeigenschaft und nicht in der Qualität erfasst. Ein Zusammenhang (z. B. zu Fahrunfällen bei unebenen Oberflächen) kann durch diese Abgrenzung nicht ermittelt werden.
- Zusammenhänge zur Dichte der Querungsanlagen werden insbesondere für Überschreiten-Unfälle erwartet. Da für diese keine gesonderten Modelle gerechnet werden und der Anteil der Überschreiten-Unfälle in der Betrachtung aller Unfalltypen sehr klein ist, zeigt die Querungsanlagendichte keinen Einfluss auf das Unfallgeschehen.

- Weder die Aufstellungsart noch die Lage des ruhenden Verkehrs zeigen einen Zusammenhang zum Unfallgeschehen zwischen Radfahrenden und Unfällen des ruhenden Verkehrs. Nicht abschließend geklärt werden kann auf Basis des vorhandenen Kollektivs, ob dieser Zusammenhang nicht existiert (da er auch in der Literatur nicht nachgewiesen wird) oder ob durch die ungleiche Verteilung im Kollektiv (überwiegend Längsaufstellung auf der Fahrbahn) kein Einfluss der Eigenschaften nachgewiesen werden kann.

Für die Betrachtung aller Unfalltypen ($U(P,S)$) zeigt das Endmodell einen positiven Zusammenhang der Verkehrsstärke des Radverkehrs mit der Unfallanzahl, wobei der Koeffizient mit 0,547 mit den Ergebnissen aus der Literatur übereinstimmt. Die Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs zeigt hier keinen Zusammenhang zum Unfallgeschehen.

Neben dem verkehrlichen Einfluss hat u. A. die Dichte der Grundstückzufahrten einen positiven Zusammenhang mit der Unfallanzahl. Dabei wirkt der Faktor von 1,012 bzw. 1,024 ($= e^{0,012}$ bzw. $e^{0,024}$) nicht besonders hoch, bei im Durchschnitt etwa 7 Grundstückzufahrten je km zeigt damit aber eine Strecke mit durchschnittlicher Zufahrtendichte (bei gleichbleibenden anderen Parametern) eine um ca. 10-20 % höhere prognostizierte Unfallanzahl als Strecken ohne Grundstückszufahrten.

Ein weiterer positiver Zusammenhang besteht zwischen Fahrbahnbreite und Unfallanzahl, was mit den Ergebnissen aus der Literatur übereinstimmt und u. a. durch höhere gefahrene Geschwindigkeiten bei breiteren Fahrbahnen interpretiert wird.

Wenn der Radverkehr im Mischverkehr geführt wird und auf der Fahrbahn Gleise vorhanden sind, zeigt sich ein positiver Zusammenhang zur Unfallanzahl, was insbesondere durch den Einfluss auf Fahrunfälle und den Kontrollverlust in Folge des in die Schienenrillen Kommens erklärt wird. Eine ähnliche Aussage trifft das Alternativmodell (siehe Anlage 3), nach dem auch statt der Gleise im Mischverkehr die Haltestellendichte einen positiven Zusammenhang zur Unfallanzahl hat. Beide Zusammenhänge werden auch in der Literatur belegt.

Etwas kontraintuitiv ist das Ergebnis des negativen Zusammenhangs zwischen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten über 30 km/h und der Unfallanzahl, da erwartet wird, dass geringere zulässige Geschwindigkeiten eher die Verkehrssicherheit erhöhen als mindern. Zu beachten ist hier, dass die Radverkehrsführungsform keinen Einfluss in diesem Modell zeigt, sodass die zulässige Geschwindigkeit hier eher als Stellvertretergröße für die Straßencharakteristik vermutet wird, da an Strecken mit höheren zulässigen Geschwindigkeiten häufiger Radverkehrsanlagen vorhanden sind – diese Vermutung soll in den weiteren Modellen jedoch geprüft werden. Für die Radverkehrsführung selbst kann jedoch kein signifikanter Zusammenhang mit der Unfallanzahl aller Unfalltypen nachgewiesen werden, wobei vermutet wird, dass diese nur in Kombination mit anderen Eigenschaften (z. B. Anlagen des ruhenden Verkehrs) einen Einfluss hat, welche im Kollektiv nicht ausreichend besetzt sind.

Tabelle 15 Endmodell Strecken alle Unfalltypen $U(P,S)$

Parameter	Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)	-3,791	0,000	0,287
In(DTV_Rad)	0,540	0,000	0,044
Dichte Grundstückzufahrten [Zufahrten/km]	0,012	0,000	0,002
Breite Fahrbahn [m]	0,060	0,000	0,016
Gleise im Mischverkehr	Ja	0,696	0,162
	Nein	-	
zulässige Höchstgeschwindigkeit > 30km/h	-0,359	0,002	0,114
zulässige Höchstgeschwindigkeit ≤ 30km/h	-		

Auch in der Betrachtung der Fahrunfälle zeigt sich ein positiver Zusammenhang zwischen Unfallanzahl und Verkehrsstärke des Radverkehrs (Tabelle 16). Hier ist der degressive Charakter des Einflusses der Radverkehrsstärke besonders hervorzuheben, da Alleinunfälle tendenziell seltener auftreten, wenn sich mehr

Radfahrende auf einem Streckensegment bewegen. Da Fahrunfälle häufig Alleinunfälle, also eine Interaktion mit dem Fahrzeug oder der Infrastruktur sind, treten diese bei höheren Verkehrsstärken seltener auf. Ebenso sachlogisch ist, dass sich kein Zusammenhang mit der Verkehrsstärke des motorisierten Verkehrs zeigt.

Neben der Exposition zeigt einzig das Vorhandensein von Gleisen auf der Fahrbahn, wenn der Radverkehr im Mischverkehr geführt wird, einen positiven Zusammenhang zur Unfallanzahl.

Weitere Alternativmodelle entstehen für die Fahrunfälle nicht und die Reststreuung ist auch im Endmodell sehr hoch, was vermuten lässt, dass Fahrunfälle entweder unsystematisch im Netz auftreten (und somit nur sehr eingeschränkt mit infrastrukturellen und betrieblichen Eigenschaften zu erklären sind) oder die erklärenden Merkmale (z. B. Unebenheiten) nicht in den untersuchten Merkmalen enthalten sind.

Tabelle 16 Endmodell Strecken Fahrunfälle U(P,S)_Typ1

Parameter		Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)		-4,247	0,000	0,458
In(DTV_Rad)		0,448	0,000	0,072
Gleise im Mischverkehr	Ja	1,209	0,001	0,357
	Nein	-		

Für die Abbiegeunfälle zeigt das Modell (Tabelle 17) den Einfluss der Radverkehrsstärke sowie der Dichte der Grundstückszufahrten. Beide Größen können als Expositionsgrößen interpretiert werden. Variablen aus Infrastruktur oder Betrieb zeigen keinen Einfluss. Ebenso wirkt die Kfz-Verkehrsstärke (im Längsverkehr) im Modell nicht auf die Unfallanzahl, obwohl 90 % der Abbiegeunfälle mit motorisiertem Verkehr auftreten (siehe Abbildung 20) – dies ist darauf zurückzuführen, dass die Zahl der Abbiegevorgänge nicht proportional zu der Verkehrsstärke im Querschnitt sein muss. Es entstehen keine Alternativmodelle.

Tabelle 17 Endmodell Strecken Abbiegeunfälle U(P,S)_Typ2

Parameter	Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)	-7,459	0,000	0,725
In(DTV_Rad)	0,741	0,000	0,100
Dichte Grundstückszufahrten [Zufahrten/km]	0,026	0,000	0,004

Das Modell der Einbiegen/Kreuzen-Unfälle zeigt für die Exposition sowohl einen Einfluss der Rad- als auch der Kfz-Verkehrsstärke (Tabelle 18). Beide Einflüsse sind positiv degressiv, besitzen jedoch sehr niedrige Koeffizienten. Hier beschreibt die Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs im Längsverkehr nicht die Verkehrsstärke der konfliktauslösenden Ströme (Ein- und Ausfahrende Kfz in Grundstückszufahrten), was zu einer schlechteren Schätzung des Einflusses führen kann. Dennoch wird vermutet, dass der inhaltliche Zusammenhang hier gegeben ist, da mit zunehmender Verkehrsstärke auf der Strecke auch mehr Ein- und Ausfahrten stattfinden können.

Weiterhin zeigt die Dichte der Grundstückszufahrten auch hier einen positiven Zusammenhang zur Unfallanzahl und zeigt auch in diesem Zusammenhang noch einmal die Bedeutung der Ein- und Ausfahrvorgänge. Wie im Modell über alle Unfalltypen ist auch hier der Koeffizient klein, aber hinsichtlich der Modelleffekte signifikant.

Der Einfluss der Breite der Fahrbahn ist ebenso durch potenziell höhere gefahrene Geschwindigkeiten zu erklären. Diese Vermutung wird durch das Alternativmodell 1 (Anlage 3) gestützt, nach welchem zulässige Höchstgeschwindigkeiten über 30 km/h einen positiven Zusammenhang zur Unfallanzahl aufweisen. Dieser Einfluss wirkt entgegengesetzt zu den Erkenntnissen über alle Unfalltypen. Es wird vermutet, dass der Einfluss auf Einbiegen/Kreuzen-Unfälle hier so stark ist, dass er signifikant wird trotz der Zusammenhänge im Modell über alle Unfalltypen.

Weiterhin zeigt das Alternativmodell 2 einen negativen Zusammenhang zwischen der Unfallanzahl und der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr, was auf bessere Sichtbeziehungen als bei Führungen im Seitenraum schließen lässt.

Zusammenfassend lassen sich die Effekte auch so interpretieren, dass Einbiegen/Kreuzen-Unfälle an Strecken, also an Grundstückzufahrten, mit hohen Kfz-Verkehrsstärken sowie Geschwindigkeiten zusammenhängen und insbesondere bei Führungen auf Radverkehrsanlagen auftreten. Es wird vermutet, dass an Strecken mit diesen Charakteristika durch die Kfz-Führenden häufiger kleinere Zeitlücken zum Einbiegen/Kreuzen gewählt werden und dabei Radfahrende übersehen werden.

Tabelle 18 Endmodell Strecken Einbiegen/Kreuzen-Unfälle U(P,S)_Typ3

Parameter	Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)	-8,993	0,000	1,054
In(DTV_Rad)	0,226	0,001	0,066
In(DTV_Kfz)	0,510	0,000	0,134
Dichte Grundstückzufahrten [Zufahrten/km]	0,020	0,000	0,004
Breite Fahrbahn [m]	0,126	0,000	0,035

Unfälle durch den ruhenden Verkehr werden bei der Betrachtung über alle Streckenabschnitte maßgeblich durch den Anteil der Länge des ruhenden Verkehrs an der Gesamtlänge bestimmt. Das bedeutet in erster Linie, dass die Abwesenheit von Anlagen des ruhenden Verkehrs Unfälle durch diesen verhindert (Anlage 3). Da in dieser Betrachtung keine weiteren Einflussgrößen wirken und somit keine Aussagen zur Infrastruktur getroffen werden können, wird die Betrachtung nur für jene Strecken, an denen Anlagen des ruhenden Verkehrs vorhanden sind, durchgeführt (Anzahl Strecken = 372). Jedoch zeigt sich (wie auch in der Literatur) kein Einfluss z. B. der Aufstellungsart des ruhenden Verkehrs oder der Radverkehrsführungsform auf die Unfallanzahl.

Für Unfälle im Längsverkehr entsteht zwar ein Nullmodell mit ausreichend hoher Reststreuung (keine Überdispersion), es kann jedoch kein Modell mit verkehrlichen oder betrieblichen/infrastrukturellen Einflüssen erstellt werden. Dafür gibt es verschiedene Erklärungsansätze: Zum ersten wurden relevante, die Unfallanzahl beeinflussenden, Größen möglicherweise nicht erhoben und können somit nicht bewertet werden. Dies wird jedoch auf Basis der Literaturanalyse nicht vermutet – zu erwarten wäre zumindest ein Einfluss der Exposition. Zum zweiten könnten die verschiedenen Unfallkonstellationen (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20) durch so unterschiedliche Einflussgrößen bestimmt werden, dass diese in einem Gesamtmodell über die Unfallkonstellationen nicht signifikant werden. Da die Anzahl der Längsverkehrsunfälle jedoch insgesamt nicht so hoch ist, dass z. B. eine weitere Differenzierung in Unfälle zwischen Radfahrenden und Radfahrenden bzw. Unfälle zwischen Radfahrenden und Kfz möglich ist, können keine differenzierten Aussagen zu den verschiedenen Einflussgrößen getroffen werden.

Deskriptive & Multivariate Statistik - selbstständige Wege

Da selbstständige Wege insgesamt ein kleineres Kollektiv ausweisen und weniger Attribute vorliegen, werden diese hier separat betrachtet. Auf den selbstständigen Wegen wird die Kfz-Verkehrsstärke global mit „Null“ betrachtet, auch wenn ggf. vereinzelt Fahrzeuge (z. B. Betriebsdienst) dort fahren, was jedoch vernachlässigt wird. Insgesamt wird ein Netz selbstständiger Wege über 80 km (167 Abschnitte, mit einer Mindestlänge der Segmente von 100 m) betrachtet. Die Eigenschaften der selbstständigen Wege werden nachfolgend kurz verbal erläutert. Anteile werden dabei immer bezogen auf die Länge angegeben.

Fast das gesamte Netz (95%) besteht aus gemeinsamen Geh- und Radwegen, 1 % des Netzes sind getrennte Geh- und Radwege und 4 % der Wege sind Gehwege, die nicht für den Radverkehr freigegeben, aber durch diesen genutzt werden. Die Oberfläche der Wege ist zu 61 % Asphalt, 26 % wassergebundene Oberflächen (z. B. Schotter) und sonst Pflaster, Kopfsteinpflaster oder ungebundene Decken. Die Breite der Anlagen liegt zwischen 1,80 m und maximal 18,00 m und liegt im Mittel bei ca. 4,50 m. Weitere infrastrukturelle und betriebliche Merkmale sind für die selbstständigen Wege nicht relevant.

Die Radverkehrsstärke liegt zwischen 0 Rad/24h (4 Strecken, wobei an diesen auch kein Unfall erfasst wurde) und maximal ca. 8.000 Rad/24. Die Mittlere Radverkehrsstärke liegt bei 1.400 Rad/24h. Der Umfeldfaktor (POI/m zur Abschätzung der Fußverkehrsdichte) zwischen 0,0 POI/m und 0,3 POI/m mit einem Mittelwert von 0,015 POI/m.

Die Korrelationsanalyse zeigt, dass zwischen den Eigenschaften nur schwache Korrelationen vorliegen. Einzig zwischen der Anlagenbreite und dem Umfeldfaktor besteht eine signifikante Korrelation von 0,35, d.h. Anlagen mit hohem Fußverkehrspotential sind tendenziell breiter.

Abbildung 21 zeigt die Eigenschaften des Unfallkollektivs an den selbstständigen Wegen. Insgesamt sind 97 Unfälle (davon 91 U(P)) an den untersuchten Wegen aufgetreten. Fast die Hälfte dieser Unfälle sind Unfälle im Längsverkehr (was mit den Ergebnissen von Hantschel et al. (2020) vergleichbar ist). Fahrunfälle und sonstige Unfälle machen jeweils ca. ein Sechstel der Unfälle aus.

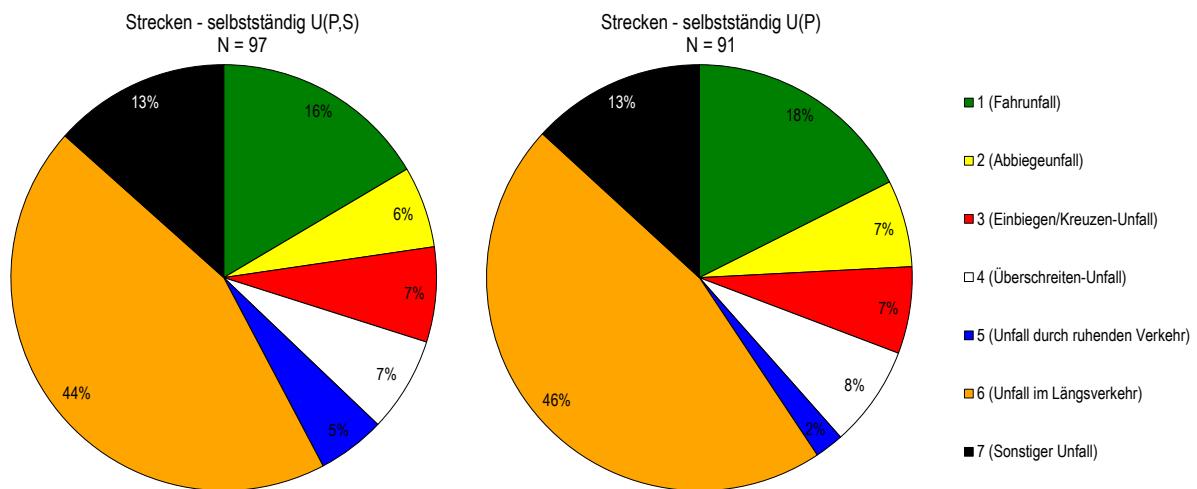


Abbildung 21 Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeteiligung) an selbstständigen Wegen für alle Unfallkategorien (links) und Unfälle mit Personenschaden (rechts)

Aufgrund der geringen Unfallanzahl und dem detaillierten Wissensstand zum Thema selbstständige Wege in Hantschel et al. (2020) wird für diese nur ein Gesamtmodell (U(P,S)) ohne weitere Differenzierung gerechnet.

Das Modell in Tabelle 19 zeigt, dass ein positiv degressiver Zusammenhang zwischen Unfallanzahl und Radverkehrsstärke existiert. Weiterhin weisen Wege mit breiteren Querschnitten höhere Unfallzahlen auf. Hierbei ist zu beachten, dass die Querschnittsbreite mit dem Umfeldfaktor korreliert und im Alternativmodell (siehe Abbildung A 3-10) auch der Umfeldfaktor einen positiven Zusammenhang zur Unfallzahl aufweist.

Tabelle 19 Endmodell Strecken – Selbstständige Wege U(P,S)

Parameter	Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)	-7,574	0,000	1,457
In(DTV_Rad)	0,754	0,000	0,197
QS_Breite RVF	0,172	0,000	0,030

5.1.2 Annäherungsbereiche

Um abzuschätzen, ob sich eine Modellbetrachtung dediziert für Annäherungsbereiche durchführen lässt, wird hier zuerst eine Unfallanalyse und anschließend eine deskriptive Analyse der Annäherungsbereiche durchgeführt. An den insgesamt 521 Annäherungsbereichen mit Informationen zur Exposition wurden 253 Unfälle erfasst. Das entspricht einem Auftreten von etwa 0,09 Unfällen je Annäherungsbereich pro Jahr, was etwa halb so viel ist wie an jeder Knotenpunktzufahrt (0,23 U(P,S) je Knotenpunktzufahrt, siehe 5.1.4. Auf die Länge bezogen entspricht diese Anzahl (bei einer Annäherungsbereichslänge von 50 m) einer Unfalldichte von im Mittel 1,9 Unfällen/(km*Jahr), was wiederum etwa 1,5-mal so hoch ist wie die Unfalldichte an Strecken. Im Weiteren wird auf die längenbezogene Betrachtung verzichtet und Annäherungsbereiche als Elemente betrachtet, wie in Aurich (2013).

Hinsichtlich der Unfallstruktur zeigen die Annäherungsbereiche eine mit der Unfalltypenverteilung an Strecken vergleichbare Verteilung. Einzig Unfälle mit ruhendem Verkehr treten in Annäherungsbereichen anteilig um 6-7 % seltener als an Strecken auf, was damit zu erklären ist, dass Parken im Vorfeld von Hauptverkehrsknoten häufig

untersagt ist. Dafür ist der Anteil an Abbiegeunfällen um diesen Anteil höher, was mit der Lokalisierung dieser Unfälle in der polizeilichen Unfallaufnahme zusammenhängen kann.

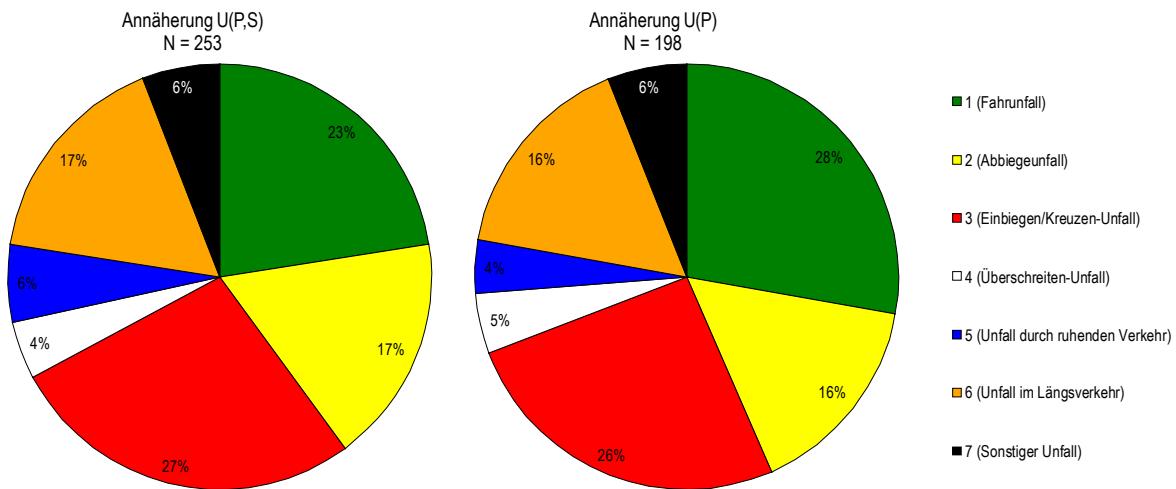


Abbildung 22 Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeziehung) an Annäherungsbereichen für alle Unfallkategorien (links) und Unfälle mit Personenschaden (rechts)

Da für Annäherungsbereiche sowohl Knotenpunkt- als auch Streckenmerkmale relevant sind, jedoch bisher keine Aussagen zu Einflussfaktoren auf das Radunfallgeschehen vorliegen, wurden diese hier aggregiert und die in Tabelle 20 dargestellten Ausprägungen untersucht. Neben der Verteilung der Ausprägungen sind die Unfalldichten und Unfallraten über die Radverkehrsstärke als gemittelte Werte über die Einzelkennwerte dargestellt.

Tabelle 20 Verteilung der Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Annäherungsbereiche

Merkmal	Ausprägung	Anzahl	Anteil Anzahl	Unfalldichte [U(P,S) _{Rf} //(km*Jahr)]	Unfallrate _{Rad} [U(P,S) _{Rf} /(1Mio*Rf*km*Jahr)]
gesamt		521		0,09	13,08
Verkehrsregelung Knotenpunkt	LSA	362	69%	0,11	9,82
	Teil-LSA	34	7%	0,14	16,58
	- LSA oder Teil-LSA	396	76%	0,11	10,40
	Verkehrszeichen	125	24%	0,04	21,56
Radverkehrsführung Annäherung	Mischverkehrskombination	308	59%	0,06	15,80
	Radfahrstreifen	60	12%	0,14	4,89
	Seitenraum	153	29%	0,14	10,81
Linksabbiegen Radfahrende	keine	136	26%	0,09	6,62
	direkt	228	44%	0,06	18,85
	indirekt	157	30%	0,15	10,29
Radverkehrsführung Knotenpunkt	keine	303	58%	0,06	15,80
	Fahrbahnrand	76	15%	0,16	6,81
	Radfahrstreifen in Mittellage	15	3%	0,09	2,21
	Seitenraum	127	24%	0,15	11,63
Fahrstreifenaddition	nicht relevant (kein Mischverkehr)	209	40%	0,15	9,34
	keine Fahrstreifenaddition	209	40%	0,04	16,24
	Fahrstreifenaddition (1-2 Fahrstreifen)	103	20%	0,09	14,25
Kfz-DTV	Kfz/24h]	521		Minimum:800 Mittelwert (gew.):14433,01 Maximum:42100	

Es zeigt sich, dass der überwiegende Teil (69 %) der Annäherungsbereiche an LSA- Knotenpunkten liegt und der Radverkehr zu 59 % in Mischverkehrskombinationen (Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen und mit und ohne Freigabe des Gehwegs für den Radverkehr) geführt wird. Neben diesen knotenpunkt-, bzw. streckenspezifischen Eigenschaften wurde zusätzlich die Führung der linksabbiegenden Radfahrenden betrachtet, da eine direkte Führung (44 % im Kollektiv) insb. in Annäherungsbereichen zu Konflikten/Unfällen führen kann. Teilweise ist auch keine Führung für links abbiegende Radfahrende vorhanden – z. B. an Einmündungen. Zu 30 % wird der Radverkehr indirekt geführt, was etwa dem Anteil von Radverkehrsanlagen im Seitenraum entspricht. Für die Führung am Knotenpunkt wurde die Lage der Furt auf Höhe der Haltlinie bewertet und in die Kategorien keine (i. d. R. Mischverkehr ohne Furt), Fahrbahnrand (z. B. Radfahrstreifen parallel zur Fahrbahn), Radfahrstreifen in Mittellage (Geradeausfahrende Radfahrende fahren linksseitig z. B. vom Rechtsabbiegegefahrstreifen des Kfz-Verkehrs) und Seitenraum unterschieden. Wird der Radverkehr im Mischverkehr geführt, wurde weiterhin geprüft, ob im Annäherungsbereich eine Fahrstreifenaddition (zus. Links- oder Rechtsabbiegegefahrstreifen) vorliegt.

Um Aussagen zu den beeinflussenden Faktoren der Unfallanzahl zu treffen, wurde ein Verallgemeinertes Lineares Modell für die Annäherungsbereiche geschätzt. Dieses zeigt im Nullmodell keine Überdispersion (Reststreuung von 2,4) und auch erklärende Variablen (Radverkehrs- oder Kfz-Verkehrsstärke) zeigen einen signifikanten Einfluss auf die Unfallanzahl. Der Erklärungsgehalt der Variablen lag jedoch bei unter 10 % und die Koeffizienten (z. B. der Verkehrsstärken) außerhalb der in der Literatur diskutierten Bereiche (jeweils ca. 0,0003).

Diese Umstände machen eine Modellschätzung für die Annäherungsbereiche zwar möglich, jedoch übersteigt der Aufwand (auch für Anwendende) den Nutzen (geringe erklärte Reststreuung).

Um die Annäherungsbereiche dennoch auch in Abhängigkeit der Gestaltungsmerkmale in die Betrachtung einbeziehen zu können, wurden die Mittelwerte der Unfalldichten über ausgewählte Variablen mittels Student-t-Test auf statistische Unabhängigkeit (Konfidenzintervall = 95 %) geprüft. Auf die Untersuchung der Unfallraten soll aufgrund des geringen und keineswegs linearen Einflusses der Radverkehrsstärke an dieser Stelle verzichtet werden. Ziel dieser Betrachtung ist, praktisch anwendbare Zuschläge auf das Streckenunfallgeschehen bei Angrenzen eines Annäherungsbereiches bereitzustellen.

Tabelle 21 zeigt die Ergebnisse der Prüfung der statistischen Unabhängigkeit. Die vollständigen Analysen befinden sich in Anlage 4. Dabei zeigt sich für die Verkehrsregelungsart des angrenzenden Knotenpunktes, dass verkehrszeichengeregelte Knotenpunkte gegenüber lichtsignalgeregelten Knotenpunkten (auch teilsignalisiert) signifikant unabhängige Unfalldichten aufweisen. Für die Radverkehrsführung in der Annäherung weisen Radverkehrsanlagen ggü. Mischverkehrskombinationen signifikante Unterschiede auf, jedoch nicht die Unterscheidung nach Radfahrstreifen und Seitenraum (Radwege).

Für die Führung der linkabbiegenden Radfahrenden werden alle Gruppen gegenüber den anderen signifikant, wobei hier ein starker Zusammenhang zur Radverkehrsführung in der Annäherung vermutet wird. Für die Radverkehrsführung im Knotenpunkt zeigt das Merkmal „keine Furt“ gegenüber der Führung des Radverkehrs am Fahrbahnrand und im Seitenraum signifikante Unterschiede auf, was jedoch auch durch die Attribute des Merkmals Radverkehrsführung in der Annäherung erklärt wird. Die Ausprägung Radfahrstreifen in Mittellage zeigt keine signifikanten Unterschiede zu anderen Ausprägungen, was durch die geringe Fallzahl zu erklären ist.

Für die Fahrstreifenaddition zeigen alle Ausprägungen signifikante Unterschiede, wobei die Ausprägung „nicht relevant“ mit der Eigenschaft der Radverkehrsanlagen zu erklären ist. Interessant ist hier, dass bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr, Annäherungsbereiche mit Fahrstreifenaddition signifikant höhere Unfalldichten aufweisen als Annäherungsbereiche ohne Fahrstreifenaddition.

Im ersten Ergebnis zeigen somit die Merkmale Verkehrsregelungsart (unterschieden nach Verkehrszeichen und Lichtsignalgeregt) und Radverkehrsführung in der Annäherung (unterschieden nach Mischverkehrskombination und Radverkehrsanlage) die am besten erklärbaren signifikanten Unterschiede in den Unfalldichten.

Zur Bestimmung des Zuschlags für Strecken an Annäherungsbereichen wurden diese Merkmalausprägungen deshalb erneut gekreuzt und die kombinierten Variablen auf Unabhängigkeit geprüft.

Tabelle 21 Statistische Unabhängigkeit mittleren Unfalldichten gruppiert nach Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Annäherungsbereiche

Merkmal	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Signifikant
Verkehrsregelung Knotenpunkt	LSA	Teil-LSA	nein
	LSA	- LSA oder Teil-LSA	nein
	LSA	Verkehrszeichen	ja
	Teil-LSA	- LSA oder Teil-LSA	nein
	Teil-LSA	Verkehrszeichen	ja
	- LSA oder Teil-LSA	Verkehrszeichen	ja
Radverkehrsführung Annäherung	Mischverkehrskombination	Radfahrstreifen	ja
	Mischverkehrskombination	Seitenraum	ja
	Radfahrstreifen	Seitenraum	nein
Linksabbiegen Radfahrende	keine	direkt	ja
	keine	indirekt	ja
	direkt	indirekt	ja
Radverkehrsführung Knotenpunkt	keine Furt	Fahrbahnrand	ja
	keine Furt	Radfahrstreifen in Mittellage	nein
	keine Furt	Furt Seitenraum	ja
	Fahrbahnrand	Radfahrstreifen in Mittellage	nein
	Fahrbahnrand	Furt Seitenraum	nein
	Radfahrstreifen in Mittellage	Furt Seitenraum	nein
Fahrstreifenaddition	nicht relevant (kein Mischverkehr)	keine Fahrstreifenaddition	ja
	nicht relevant (kein Mischverkehr)	Fahrstreifenaddition (1-2)	ja
	keine Fahrstreifenaddition	Fahrstreifenaddition (1-2)	ja

Aus den Merkmalen entstehen die Kombinationen:

- LSA – Mischverkehr
- LSA – Radverkehrsanlage
- Verkehrszeichen - Mischverkehr
- Verkehrszeichen – Radverkehrsanlage

Tabelle 22 zeigt, dass die Merkmalkombinationen im Vergleich signifikant unterschiedliche Unfalldichten aufweisen. Ausnahme ist hier die Kombination „Verkehrszeichen – Radverkehrsanlage“, welche vermutlich aufgrund der geringen Fallzahl gegenüber den anderen Kombinationen nicht signifikant wird. Daher wurde die Gruppe Verkehrszeichen zusammengefasst und wird gegenüber den anderen Kombinationen (LSA – Mischverkehr; LSA – Radverkehrsanlage) unterschieden.

Im Ergebnis werden Strecken, die an Annäherungsbereiche mit folgenden Eigenschaften grenzen, folgende Zuschlagfaktoren addiert:

- LSA – Mischverkehr: 0,077 Unfälle/Jahr
- LSA – Radverkehrsanlage: 0,151 Unfälle/Jahr
- Verkehrszeichen: 0,038 Unfälle/Jahr

Tabelle 22 Statistische Unabhängigkeit der mittleren Unfalldichten der kombinierten Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Annäherungsbereiche

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Anzahl 1	Anzahl 2	Mittelwert UD 1	Mittelwert UD 2	Signifikant
LSA - Mischverkehr	Verkehrszeichen - Mischverkehr	207	101	0,077	0,030	ja
LSA - Mischverkehr	Verkehrszeichen - Radverkehrsanlage	207	24	0,077	0,075	nein
LSA - Radverkehrsanlage	Verkehrszeichen - Mischverkehr	189	101	0,151	0,030	ja
LSA - Radverkehrsanlage	Verkehrszeichen - Radverkehrsanlage	189	24	0,151	0,075	nein
Verkehrszeichen - Mischverkehr	Verkehrszeichen - Radverkehrsanlage	101	24	0,030	0,075	ja
LSA - Mischverkehr	LSA - Radverkehrsanlage	207	189	0,077	0,151	ja
LSA - Mischverkehr	Verkehrszeichen	207	125	0,077	0,038	ja
LSA - Radverkehrsanlage	Verkehrszeichen	189	125	0,151	0,038	ja

5.1.3 Knotenpunkte

Deskriptive Statistik

Informationen zu Knotenpunkten gemäß Abschnitt 3.2.3 liegen für 176 Knotenpunkte vor. Die für die Zufahrten erhobenen Elemente werden für die Knotenpunktbeobachtung aggregiert, sodass das Vorhandensein einzelner Infrastrukturelemente als Anteil oder Wahrheitswert (vorhanden/nicht vorhanden) bzw. als Anwesenheit/Abwesenheit einer Ausprägung ausgewiesen wird. Weiterhin wird als zusätzliche Information das Vorhandensein einer Ausprägung an mind. 2 Zufahrten ausgewiesen. Die Verkehrsstärke der Knotenpunkte wird als Gesamtbelastung des Knotens ausgewiesen. Die Ergebnisse der deskriptiven Analyse der Knotenpunkteigenschaften sind in Tabelle 23 dargestellt. Informationen zu den über die Merkmalsausprägungen gemittelten Unfallraten sind in Anlage 5 dargestellt. Das Kollektiv ist dominiert durch Kreuzungen und Lichtsignalgeregelte Knotenpunkte (jeweils 72 %). Hinsichtlich der Radverkehrsführungen besteht das Kollektiv hauptsächlich aus Knotenpunkten mit vorwiegender Zuführung im Mischverkehr oder Mischverkehrskombinationen (Mischverkehr ohne oder mit Schutzstreifen), was sich insb. in der Auswertung „Radverkehrsanlage in mind. 1 Zufahrt“ zeigt. Radfahrstreifen und Radwege liegen entsprechend seltener an den Knotenpunktzufahrten vor, wobei häufiger Radwege als Radfahrstreifen angelegt sind. Nachfolgend werden aufgrund der möglichen Kombination der Führungsformen an einem Knotenpunkt und damit verbundenen Vielzahl an Ausprägungen Radwege und Radfahrstreifen als Radverkehrsanlagen zusammengefasst. Da für beide Anlagen unterschiedliche Implikationen für die Verkehrssicherheit erwartet werden, wird für die weitere Differenzierung auf die Zufahrtenmodelle (Abschnitt 5.1.4) verwiesen.

Tabelle 23 Verteilung der Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Knotenpunkte

	Merkmal	Ausprägung	Anzahl	Anteil	Unfalldichte [$U(P,S)_{Ri}/(KP^*Jahr)$]
	gesamt		176		0,98
Knotenpunkt allgemein	Knotenpunktform	Einmündung	49	28%	0,77
		Kreuzung	127	72%	1,06
	Verkehrsregelung	Lichtsignalanlage	127	72%	1,06
		Teil-LSA	14	8%	0,97
		Z206	4	2%	0,30
		Z205	28	16%	0,80
		Rechts-vor Links	3	2%	0,13
		Nicht vollsignalisiert	49	28%	0,77
		80-120 gon	154	88%	0,97
	Winkel Achsen	kleiner/größer	22	13%	0,99

	Merkmal	Ausprägung	Anzahl	Anteil	Unfalldichte [U(P,S) _{RF} /(KP*Jahr)]
Infrastruktur und Betrieb Radverkehr	Mischverkehr in der Annäherung	keine Zufahrt	32	18%	1,82
		mind. eine Zufahrt	144	82%	0,79
		mind. zwei Zufahrten	107	61%	0,73
	Mischverkehrskombination in der Annäherung	keine Zufahrt	18	10%	1,76
		mind. eine Zufahrt	158	90%	0,89
		mind. zwei Zufahrten	128	73%	0,80
	Radfahrstreifen in der Annäherung	keine Zufahrt	144	82%	0,76
		mind. eine Zufahrt	32	18%	1,93
		mind. zwei Zufahrten	13	7%	1,94
	Radweg in der Annäherung	keine Zufahrt	96	55%	0,78
		mind. eine Zufahrt	80	45%	1,21
		mind. zwei Zufahrten	54	31%	1,13
Infrastruktur und Betrieb motorisierter Verkehr	Radverkehrsanlage in mind. 1 Zufahrt	Trifft nicht zu	85	48%	0,68
		Trifft zu	91	52%	1,26
	Radverkehrsanlage in mind. 2 Zufahrten	Trifft nicht zu	97	55%	0,71
		Trifft zu	79	45%	1,30
	Absetzung der Radfahrtfurt	keine Zufahrt	136	77%	0,89
		mind. eine Zufahrt	40	23%	1,26
		mind. zwei Zufahrten	24	14%	1,39
	Ruhender Verkehr im Annäherungsbereich	keine Zufahrt	118	67%	1,09
		mind. eine Zufahrt	58	33%	0,74
		mind. zwei Zufahrten	24	14%	0,78
	Signalisierung Linksabbiegende (teilweise) gesichert	keine Zufahrt	105	60%	0,84
		mind. eine Zufahrt	71	40%	1,18
		mind. zwei Zufahrten	42	24%	1,25
	Signalisierung Rechtsabbiegende (teilweise) gesichert	keine Zufahrt	138	78%	0,97
		mind. eine Zufahrt	38	22%	0,99
		mind. zwei Zufahrten	13	7%	1,06
ÖPNV	Abbiegeverbote	keine Zufahrt	105	60%	0,77
		mind. eine Zufahrt	71	40%	1,29
		mind. zwei Zufahrten	47	27%	1,29
	Grünpfeil (Z720)	keine Zufahrt	133	76%	0,93
		mind. eine Zufahrt	43	24%	1,12
		mind. zwei Zufahrten	19	11%	1,22
	Straßenbahnschienen	nicht vorhanden	70	40%	0,73
		vorhanden	106	60%	1,14
	Bushaltestelle	nicht vorhanden	104	59%	1,07
		vorhanden	72	41%	0,84
	Straßenbahnhaltestelle	nicht vorhanden	121	69%	0,88
		vorhanden	55	31%	1,19
Exposition	Haltestelle	nicht vorhanden	62	35%	0,88
		vorhanden	114	65%	1,03
	Umfeldfaktor	Minimum:0,00	Mittelwert:0,01	Maximum:0,33	
	DTV: Kfz [Kfz/24h]	Minimum:2340	Mittelwert:22393	Maximum:60000	
	DTV: Rad [Rad/24h]	Minimum:44,01	Mittelwert:1802,81	Maximum:9462,15	
	Schwerverkehrsanteil [%]	Minimum:0,9	Mittelwert:3,64	Maximum:8,95	

Abbildung 23 Korrelationsmaße (Spearman) der verkehrlichen, betrieblichen und infrastrukturellen Merkmale an Knotenpunkten

Die Analyse der inneren Abhängigkeiten zeigt, dass starke Korrelationen vorwiegend zwischen in sich abhängigen Ausprägungen eines Merkmals vorliegen (z.B. Anteil Mischverkehr korreliert stark mit Anteil Mischverkehrskombination).

Weiterhin zeigt sich, dass

- Sowohl Radverkehrsstärke, als auch Kfz-Verkehrsstärke negativ mit dem Anteil an Mischverkehrsführungen korreliert, was zum einen durch eine höhere Nachfrage und zum anderen mit den Vorgaben aus dem Regelwerk zu erklären ist
- Das Vorhandensein von Absetzungen negativ mit den Mischverkehrskombinationen und positiv mit dem Vorhandensein von Radwegen korreliert
- Der Anteil von (teilweise) separat signalisierten Linksabbiegern mit dem Kfz-DTV korreliert, sodass an Knotenpunkten mit höheren Verkehrsstärken häufiger eine separate Phase für linksabbiegende Kfz vorliegt – für den Rechtsabbiegeschutz existiert diese Korrelation nicht
- Das Vorhandensein von ruhendem Verkehr im Vorfeld des Knotenpunktes (50 m von Haltlinie) mit der Verkehrsregelungsart LSA korreliert, was sachlogisch ist, da an (größeren) LSA-geregelten Knotenpunkten z. B. wegen Abbiegefahrstreifen kein ruhender Verkehr vorhanden ist

Die Betrachtung der Unfalltypen im Knotenpunktkollektiv zeigt Abbildung 24, wobei in die Betrachtung für alle Unfallkategorien und Unfälle mit Personenschaden differenziert wird. Abbiegeunfälle und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle haben in beiden Betrachtungen die höchsten Anteile, wobei Abbiegeunfälle in den Unfällen mit Personenschaden häufiger auftreten (also eine höhere Unfallschwere aufweisen). Neben diesen Unfalltypen sind Fahrunfälle und Unfälle im Längsverkehr mit Anteilen von mind. 10 % vertreten. Da die Unfalltypen über alle Unfallkategorien etwa gleich verteilt sind wie die Unfälle mit Personenschäden (Abweichungen von max. 2 %), werden für die multikriterielle Betrachtung alle Unfallkategorien einbezogen, um mit einem größeren Kollektiv die Aussagekraft der Modelle zu erhöhen.

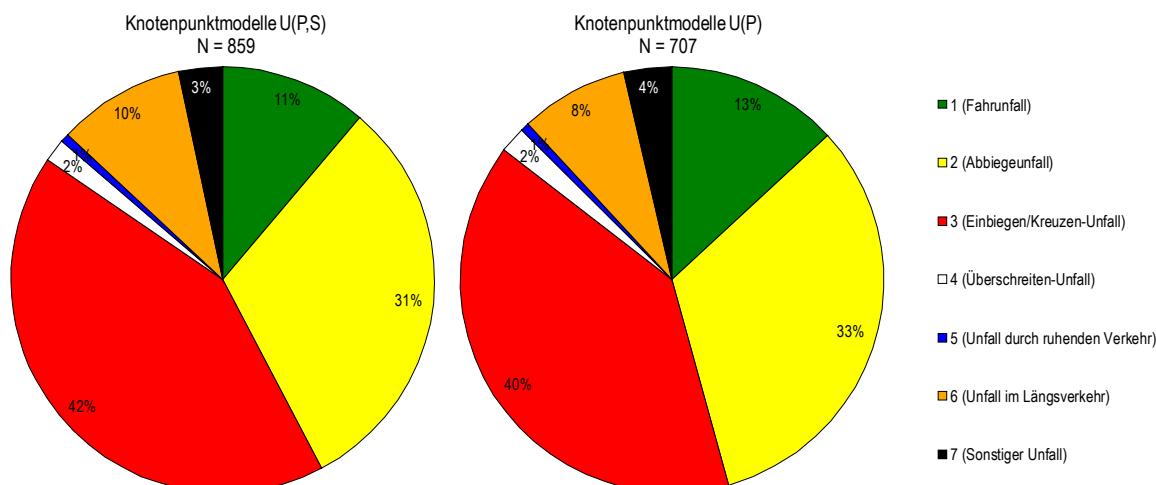


Abbildung 24 Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeziehung) an Knotenpunkten für alle Unfallkategorien (links) und Unfälle mit Personenschaden (rechts)

Auffällig ist, dass trotz dem hohen Anteil an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten (72%, siehe Tabelle 23) der überwiegende Teil des Unfallgeschehens durch Einbiegen-Kreuzen Unfälle geprägt ist, welche an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen untypisch sind. Daher wurde das Einbiegen-Kreuzen Unfallgeschehen explorativ untersucht. Von den Insgesamt 363 Einbiegen-Kreuzen Unfällen an Knotenpunkten traten 127 Unfälle an nicht- oder teilsignalisierten Knotenpunkten auf. Für die 236 Einbiegen-Kreuzen Unfälle an Knotenpunkten mit LSA wurden

die Unfalltexte der polizeilichen Unfallaufnahme gelesen und auf Erklärung zum Auftreten geprüft. Dabei zeigt sich, dass:

- 35 % der Unfälle im Zusammenhang mit Rotlichtverstößen (davon wiederum 93 % der Rotlichtverstöße durch Radfahrende) standen,
- 17 % der Unfälle im Zusammenhang mit der Nutzung eines Grünpeils (Z720) auftraten,
- für 17 % der Unfälle auf Basis des Unfalltextes nicht eindeutig zwischen Abbiege- und Einbiegen-Kreuzen Unfall differenziert werden kann
- 4 % der Unfälle an ausgeschalteten LSA (z. B. wegen Nachtabschaltung) und
- weitere 4 % der Unfälle zwischen Radfahrenden im Seitenraum stattfanden.

Die übrigen 22 % der Unfälle sind durch andere Konstellationen (z. B. Rückstau im Knotenpunktinnbereich, Unfälle zwischen Radfahrenden im Seitenraum oder zwischen Kfz und Radfahrenden an Dreiecksinseln ohne Signalisierung, jeweils zu Anteilen bis 3 %) zu erklären oder auf Basis des Unfalltextes nicht zuordenbar.

Zusammenfassend werden für die multivariate Betrachtung folgende Kollektive für die Knotenpunkte einbezogen:

- U(P,S) für Aussagen zum Gesamtunfallgeschehen
- U(P,S)-Typ 1 für Aussagen zu Fahrunfällen
- U(P,S)-Typ 2 für Aussagen zu Abbiegeunfällen
- U(P,S)-Typ 3 für Aussagen zu Einbiegen/Kreuzen-Unfällen

Multivariate Statistik

In der multivariaten Statistik werden die in der deskriptiven Statistik beschriebenen Merkmale auf ihren Einfluss auf die Unfallanzahl geprüft. Dabei zeigen folgende Einflussgrößen einen Zusammenhang mit der Unfallanzahl für mindestens ein Teilkollektiv, wobei die konkreten Zusammenhänge nachfolgend beschrieben werden:

- Verkehrsstärke Rad, Kfz- und Schwerverkehr sowie Umfeldfaktor
- Verkehrsregelungsart des Knotenpunktes
- Anzahl Zufahrten
- Führung des Radverkehrs in der Annäherung
- Signalisierung Rechtsabbiegender Kfz-Verkehr
- Signalisierung Linksabbiegender Kfz-Verkehr
- Straßenbahnschienen
- Kreuzungswinkel

Für die Betrachtung aller Unfalltypen (U(P,S)) zeigt das Endmodell vorwiegend positive Zusammenhänge zwischen Unfallanzahl und Exposition. Dabei weisen die Verkehrsstärke des Rad- und Kfz-Verkehrs jeweils Koeffizienten von ca. 0,6 auf, was bedeutet, dass beide Ströme die Unfallanzahl etwa gleich determinieren. Der Koeffizient des Radverkehrs ist hierbei vergleichbar mit denen in der Literatur untersuchten Einflüssen. Der Koeffizient des Kfz-Verkehrs ist nur teilweise mit den Erkenntnissen aus anderen Untersuchungen vergleichbar. Andere Untersuchungen, die Unfallmodelle für Knotenpunkte berechnen, betrachten konkrete Unfallkonstellationen und teilweise stromfeine Verkehrsstärken (wie im folgenden Abschnitt 5.1.4). Untersuchungen über Knotenpunktmodelle betrachten sonst das Unfallgeschehen über alle Beteiligtenarten oder für Radverkehrsunfälle nur mit Differenzierung in Unfalltypen. Einzig Aurich (2013) betrachtet Unfallmodelle für Knotenpunkte mit Radverkehrsbeteiligung, wobei hier die Verkehrsstärke von Haupt- und Nebenrichtung ermittelt wird. Hierbei werden für Knotenpunkte mit LSA Koeffizienten des Kfz-Verkehrs zwischen 0,5 und 0,7 ermittelt.

Zusätzlich hat der Umfeldfaktor, welcher ein Indikator für hohe Fußverkehrsstärken darstellt, einen positiven Zusammenhang, wobei die Höhe des Koeffizienten nicht interpretiert wird.

LSA-geregelte Knotenpunkte zeigen (unter Berücksichtigung der Verkehrsstärken) einen negativen Zusammenhang mit der Unfallanzahl gegenüber anderen Verkehrsregelungsarten, wobei die prognostizierte Unfallanzahl an Knotenpunkten mit LSA um etwa 40 % niedriger ist.

Tabelle 24 Endmodell Knotenpunkte alle Unfalltypen U(P,S)

Parameter		Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)		-10,719	0,000	1,094
In(DTV_Rad)		0,623	0,000	0,062
In(DTV_Kfz)		0,638	0,000	0,123
UF		3,901	0,001	1,194
Verkehrsregelungsart LSA	ja	-0,472	0,011	0,185
	nein	0,000		

In den Alternativmodellen (siehe Anlage 5) zeigt außerdem sowohl die (teilweise) separate Signalisierung des rechtsabbiegenden motorisierten Verkehrs als auch des linksabbiegenden motorisierten Verkehrs in mindestens einer Knotenpunktzufahrt einen negativen Zusammenhang zur Unfallanzahl (Alternativmodell 1&2). Beide Einflüsse zeigen dabei einen vergleichbaren Erklärungsgehalt (bezogen auf die Reststreuung), die separate Signalisierung des rechtsabbiegenden Verkehrs zeigt jedoch den größeren Einfluss.

Die Reststreuung ist in allen Betrachtungen (Endmodell, Alternativmodell 1&2) verhältnismäßig hoch, was heißt, dass diese Modelle für das Unfallgeschehen einen geringen Erklärungsgehalt aufweisen. Ein höherer Erklärungsgehalt wird für die Modelle der Unfalltypen und in den Modellen der Knotenpunktzufahrten erwartet.

In der Betrachtung der Fahrunfälle (U(P,S)_Typ1) zeigt das Endmodell in Tabelle 30 einen positiven Zusammenhang der Verkehrsstärke des Radverkehrs am Knotenpunkt mit der Unfallanzahl. Für den Kfz-Verkehr besteht kein Zusammenhang, was sachlogisch ist, da Fahrunfälle i. d. R. Alleinunfälle von Radfahrenden sind.

Als weiteres Expositionsmaß wird hier der Umfeldfaktor (der mit höheren Fußverkehrsstärken zu assoziieren ist) einen positiven Zusammenhang zur Unfallanzahl. Dies wird mit einer höheren Komplexität des Verkehrsraums (erhöhte Interaktion der Verkehrsteilnehmer*innen) und der Bewegungsabläufe an geschäftigen Orten erklärt.

Hinsichtlich der Infrastruktur zeigen Straßenbahnschienen einen positiven Zusammenhang zur Unfallanzahl. Insbesondere an Knotenpunkten müssen diese häufig gequert bzw. durch Radfahrende überfahren werden, wobei diese stürzen können.

In den Alternativmodellen (siehe Anlage 5) weist außerdem das Vorhandensein von Grünpfeilen einen positiven Zusammenhang zum Unfallgeschehen auf. Für diesen Zusammenhang kann für Fahrunfälle keine Interpretation gefunden werden.

Tabelle 25 Endmodell Knotenpunkte Fahrunfälle U(P,S)_Typ1

Parameter		Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)		-6,562	0,000	0,981
In(DTV_Rad)		0,466	0,000	0,131
UF		6,107	0,047	3,072
Straßenbahnschienen	ja	1,073	0,003	0,360
	nein	-		

In der Betrachtung der Abbiegeunfälle (U(P,S)_Typ2) zeigt das Endmodell in Tabelle 30 wie im Gesamtmodell einen positiven Zusammenhang der Verkehrsstärke des Rad- und Kfz-Verkehrs mit der Unfallanzahl. Hierbei hat die Verkehrsstärke einen beinahe linearen Einfluss (Koeffizient ≈ 1) und die Radverkehrsstärke einen positiv degressiven Einfluss. Es wird vermutet, dass für die Radfahrenden beinahe ausschließlich die Verkehrsstärke des geradeausfahrenden Verkehrs wirkt, während für den motorisierten Verkehr die Verkehrsstärke des abbiegenden Verkehrs wirkt.

Infrastrukturell zeigt das Merkmal „Mischverkehr in der Annäherung in max. 75% der Zufahrten“ einen positiven Zusammenhang zur Unfallanzahl. Dieses Merkmal ist gleichzusetzen mit dem Vorhandensein einer

Radverkehrsanlage in mind. einer Zufahrt (Knotenpunkte mit nur Mischverkehrsführungen zeigen einen negativen Zusammenhang zur Unfallanzahl).

Betrieblich wirkt das Vorhandensein eines Linksabbiegeschutzes (separate Phase an mindestens einer Zufahrt an Knotenpunkten mit LSA) negativ auf die Unfallanzahl, wie bereits in der Literatur bestätigt wird.

Weiterhin wirkt hier die Anzahl der Zufahrten negativ auf die Unfallanzahl. Während dieses Merkmal in der Literatur häufig als Exposition im Sinne der Verkehrsstärke interpretiert werden kann, wirkt es hier als Einflussfaktor auf die Anzahl der Abbiegebeziehungen, da an dreiarmigen Knoten in der Regel nur eine Linksabbiege- und eine Rechtsabbiegerelation vorhanden ist.

Tabelle 26 Endmodell Knotenpunkte Abbiegeunfälle U(P,S)_Typ2

Parameter		Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)		-15,901	0,000	1,741
ln(DTV_Rad)		0,597	0,000	0,093
ln(DTV_Kfz)		0,985	0,000	0,186
Mischverkehr in max. 75 % der Zufahrten	ja	0,578	0,004	0,198
	nein	-		
Mind. eine Zufahrt Linksabbiegeschutz	ja	-0,694	0,000	0,172
	nein	-		
Anzahl Zufahrten	4	0,543	0,006	0,198
	3	-		

In den Alternativmodellen (siehe Anlage 5) wird außerdem in Alternativmodell 1 das Vorhandensein eines Rechtsabbiegeschutzes an mindestens einer Zufahrt signifikant – das Vorhandensein an 2 Zufahrten zeigt einen ähnlichen Einfluss, jedoch eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 11 % und wird deshalb nicht aufgenommen. Dieser Einfluss wurde noch nicht in einem multikriteriellen Ansatz nachgewiesen.

In Alternativmodell 2 zeigt zusätzlich zu dem Einfluss Mischverkehr vs. Radverkehrsanlage das Vorhandensein von Absetzungen an mindestens 2 Zufahrten einen negativen Zusammenhang zur Unfallanzahl. Die Interpretation ist hier schwierig, da in den Modellen nicht geprüft werden kann, ob die Absetzung jeweils an den Zufahrten mit Radverkehrsanlage vorliegt. Hierzu werden nähere Erkenntnisse in den Zufahrtenmodellen erwartet.

Für die Einbiegen/Kreuzen-Unfälle (U(P,S)_Typ3) zeigt das Endmodell in Tabelle 27 wie im Gesamtmodell einen positiven Zusammenhang der Verkehrsstärke des Rad- und Kfz-Verkehrs mit der Unfallanzahl. Auffällig ist hier, dass in der Modellbildung die Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs nicht signifikant wird und die Modellgüte vorerst verschlechtert (siehe Anlage 5). Erst in Kombination mit der Verkehrsregelung des Knotenpunktes (LSA geregelt vs. andere Regelungsarten) wird die signifikant, was auf eine Korrelation der beiden Größen hinweist, welche laut Abbildung 23 jedoch nur im mittleren Bereich vorliegt.

Tabelle 27 Endmodell Knotenpunkte Einbiegen/Kreuzen-Unfälle U(P,S)_Typ3

Parameter		Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)		-12,677	0,000	1,724
ln(DTV_Rad)		0,709	0,000	0,103
ln(DTV_Kfz)		0,718	0,000	0,190
Verkehrsregelungsart LSA	ja	-1,177	0,000	0,231
	nein	0,000		
Kreuzungswinkel ungleich 90° (+- 20 %)	ja	0,565	0,034	0,267
	nein	0,000		

Alternativmodelle entstehen nicht. Zwar zeigt das Vorhandensein von Grünpfeilen einen positiven Zusammenhang zur Unfallanzahl, jedoch mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 20 %, weshalb dieses Modell nicht aufgenommen wird.

5.1.4 Knotenpunktzufahrten

Deskriptive Statistik

In die Betrachtung der Knotenpunktzufahrten können insgesamt 477 Knotenpunktzufahrten an 130 Knotenpunkten einbezogen werden. Die in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Attribute werden hier für die einzelnen Zufahrten betrachtet. Das Kollektiv der Knotenpunktzufahrten wird im Folgenden beschrieben. Tabelle 28 zeigt die Anzahl und den Anteil der Ausprägungen im Kollektiv für kategoriale Variablen. Dabei werden Variablen, für welche einzelne Merkmalausprägungen im Kollektiv mit weniger als 5 % besetzt sind, teilweise zusammengefasst, um für die multivariate Betrachtung eine ausreichend große Anzahl an Fällen betrachten zu können. Die Zusammenfassung dieser Variablenausprägungen sind kursiv dargestellt. Für metrische Variablen sind die Spannweiten (Minimum und Maximum) und der Mittelwert angegeben. Weiterhin sind die Durchschnittswerte der Unfalldichte für Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung über die Ausprägungen gegeben. Informationen zu den über die Merkmalsausprägungen gemittelten Unfallraten sind in Anlage 6 dargestellt.

Hinsichtlich der Knotenpunktform liegen zwei Drittel der Zufahrten an Kreuzungen, und ein Viertel der Zufahrten an Einmündungen. Die vorwiegende Verkehrsregelungsart an den betrachteten Zufahrten liegt mit drei Viertel der Zufahrten an LSA-geregelten Knotenpunkten. Verkehrszeichengeregelte Knotenpunkte im Kollektiv sind vorwiegend durch Zeichen 205 („Vorfahrt gewähren!“) geregelt. Zu beachten ist hier, dass die Verkehrsregelung sich auf den gesamten Knotenpunkt und nicht auf das Verkehrszeichen in der Zufahrt bezieht. Kreisverkehre liegen in Dresden so selten vor, dass diese aus der Untersuchung ausgeschlossen wurden.

Die Radfahrenden nähern sich den Knotenpunkten an über 50 % der Zufahrten im Mischverkehr, bzw. in zwei Dritteln der Fälle in Mischverkehrskombinationen (mit Schutzstreifen, bzw. für den Radverkehr freigegebenen Gehweg). Führt eine Radverkehrsanlage an den Knotenpunkt, so ist dies am häufigsten ein Radweg.

Die Absetzung der Radfahrt beträgt zwischen Null und 20 Metern, wobei über 80 % der Zufahrten eine Absetzung von 0 Metern besitzen. Der Einfluss der Absetzung auf die Unfalldichte ist in Abbildung 25 dargestellt. Dabei zeigt sich sowohl in der Betrachtung aller Unfalltypen als auch für Abbiegeunfälle keine eindeutige Tendenz zur Wirkung auf das Unfallgeschehen. Betrachtet man nur Rechtsabbiegeunfälle, so zeigen die mittleren Absetzungen die geringsten Unfalldichten (bei kleiner Fallzahl). Alle Zufahrten mit mittlerer Absetzung sind dabei an Knotenpunkten mit LSA. Die Abbildung verdeutlicht aber auch noch einmal die Verhältnisse der Ausprägungen in dem Kollektiv, in dem Absetzungen ab 2 m kaum vorhanden sind. Damit ist der Einfluss des Absetzmaßes in der multivariaten Betrachtung nicht untersuchbar und es kann nur einbezogen werden, ob eine Absetzung vorliegt oder nicht.

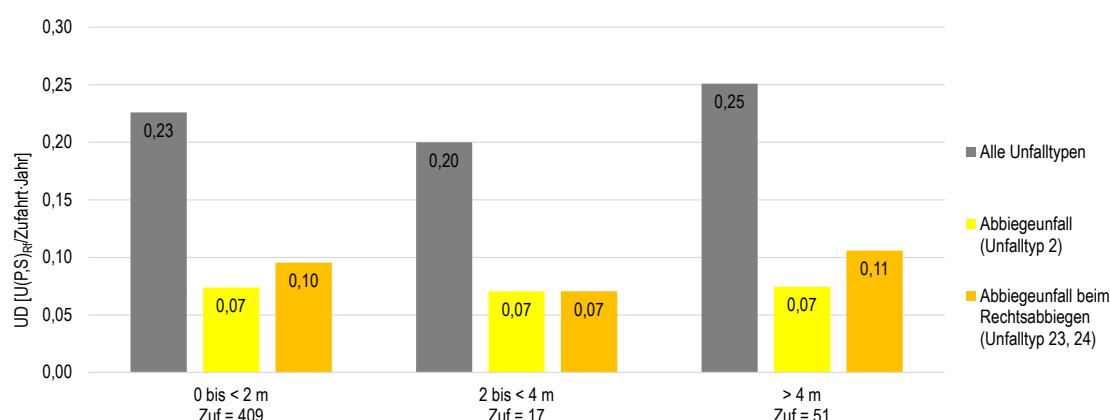


Abbildung 25 Unfalldichten aller Unfälle und Abbiegeunfälle an Knotenpunktzufahrten in Abhängigkeit von der Absetzung der Zufahrt

Tabelle 28 Verteilung der Ausprägungen von infrastrukturellen und betrieblichen Merkmalen der Knotenpunktzufahrten

	Merkmal	Ausprägung	Anzahl	Anteil	Unfalldichte [U(P,S) _{Rf} /(Zuf*Jahr)]
	Gesamt		477	-	0,23
Knotenpunkt allgemein	Knotenpunktform	Einmündung	117	25%	0,18
		Kreuzung	324	68%	0,23
		Sonderform	36	8%	0,37
	Verkehrsregelung	Lichtsignalanlage	344	72%	0,24
		Teil-LSA	31	6%	0,29
		Z206	16	3%	0,08
		Z205	75	16%	0,22
		Rechts-vor Links	11	2%	0,04
		Nicht vollsignalisiert	133	28%	0,20
Infrastruktur und Betrieb Radverkehr	Führung in der Annäherung	Mischverkehr	251	53%	0,16
		Mischverkehr mit Schutzstreifen	30	6%	0,32
		Mischverkehr; Gehweg "Radfahrende frei"	46	10%	0,21
		Mischverkehrskombination	327	69%	0,18
		Radfahrstreifen	40	8%	0,38
		Radweg	64	13%	0,30
		Gemeinsamer Geh- und Radweg	46	10%	0,32
		Radverkehrsanlage	150	31%	0,32
	Absetzung Radfahrtfurt [m]	Minimum:0		Mittelwert:0,95	Maximum:20
		Absetzung nicht vorhanden	400	84%	0,22
		Absetzung vorhanden	77	16%	0,25
	Furteinfärbung	eingefärbt	92	19%	0,32
		nicht eingefärbt	385	81%	0,20
	Signalisierung	mit motorisiertem Verkehr	366	77%	0,21
		Signalgeber für Radverkehr	59	12%	0,36
		Fuß-Rad-Kombibischeibe	52	11%	0,23
	Führung Linksabbiegende	direkt	319	67%	0,19
		indirekt - nicht geführt	116	24%	0,26
		indirekt - geführt	42	9%	0,45
Infrastruktur und Betrieb motorisierter Verkehr	Signalisierung Linksabbiegende	nicht gesichert	374	78%	0,21
		gesichert	103	22%	0,28
	Signalisierung Rechtsabbiegende	nicht gesichert	445	93%	0,23
		gesichert (2 Felder)	7	1%	0,09
		gesichert (3 Felder)	13	3%	0,31
		Dreiecksinsel ohne LSA	7	1%	0,20
		Dreiecksinsel mit LSA	5	1%	0,16
		(teilweise) gesichert	32	7%	0,21
	Ausrundungsradius [m]	Minimum:0		Mittelwert:11,94	Maximum:71,5
	Abbiegeverbote (bzw. vorgeschriebene Fahrtrichtung FR)	keine	362	76%	0,22
		vorgeschriebene FR: geradeaus oder rechts	58	12%	0,26
		vorgeschriebene FR: rechts	20	4%	0,22
		vorgeschriebene FR: geradeaus	18	4%	0,19
		andere	19	4%	0,22
		Rechtsabbiegeverbot nicht vorhanden	362	76%	0,22
		Rechtsabbiegeverbot vorhanden	58	12%	0,26
	Grünpfahl (Z720)	nicht vorhanden	451	95%	0,23
		vorhanden	26	5%	0,20

Über 20 % der Furten für den Radverkehr sind (teilweise oder über den gesamten Knoten) rot eingefärbt. Dabei weisen die Zufahrten mit Roteinfärbung der Furt eine um ca. 50 % höhere Unfalldichte als jene ohne Roteinfärbung auf. Aufgrund der nicht zu deutenden Kausalität von Roteinfärbung und Unfallanzahl (siehe Abschnitt 2.1.6) wird dieses Merkmal in den nachfolgenden Betrachtungen nicht mehr einbezogen.

Hinsichtlich der Signalisierung nutzen die Radfahrenden am häufigsten (77 %) den Signalgeber des Kfz-Verkehrs. Signalgeber für den Radverkehr sind im Kollektiv etwa so häufig wie Fuß-Rad-Kombischeiben. In zwei Dritteln der Zufahrten wird der linksabbiegende Radverkehr direkt geführt. An 24 % der Zufahrten werden linksabbiegende Radfahrende indirekt (z. B. über die Furten des Fußverkehrs) geführt und nur in 9 % der Zufahrten werden Linksabbiegende mit Signalgebern und Aufstellflächen geführt.

Die Signalisierung des linksabbiegenden motorisierten Verkehrs ist an etwa einem Viertel der Zufahrten gesichert, an den restlichen ungesichert. Für den rechtsabbiegenden motorisierten Verkehr liegt nur an 7 % der Zufahrten eine (teilweise) gesicherte Führung vor. Die häufigste signaltechnische Lösung ist dabei die gesicherte Signalisierung über einen dreifeldigen Signalgeber für den rechtsabbiegenden Verkehr.

Abbiegeverbote liegen an einem Viertel der Zufahrten vor. An Zufahrten, an denen ein Abbiegeverbot vorliegt, sind Rechtsabbiegeverbote (auch in Kombination mit anderen Abbiegeverboten die häufigsten).

Grünpeile für den motorisierten Verkehr (Zeichen 720) sind an 5 % der Zufahrten angelegt.

In der Erhebung der Merkmale wurde auch die Anzahl der Fahrstreifen für den motorisierten Verkehr differenziert nach den Fahrtrichtungen (Mischfahrstreifen, Linksabbiege- Geradeausfahr- und Rechtsabbiegefahrstreifen) erhoben. In der Korrelationsanalyse der Fahrstreifenanzahl mit den Verkehrsstärken in Abbildung 26 zeigt sich für fast alle Kombinationen ein mittlerer bis starker Zusammenhang zwischen diesen Größen. Das ist sachlogisch, weil das Angebot (Fahrstreifen) auf Basis der Nachfrage (Verkehrsstärken) geplant wird.

	Fahrstreifen gesamt [-]	Mischfahrstreifen [-]	Linksabbiegefahrstreifen [-]	Geradeausfahrstreifen [-]	Rechtsabbiegefahrstreifen [-]	Rechtsabbiegende [Kfz/24h]	Geradeausfahrende [Kfz/24h]	Linksabbiegende [Kfz/24h]	Zufahrtende gesamt [Kfz/24h]	Rechtsabbiegende [SV/24h]	Geradeausfahrende [SV/24h]	Linksabbiegende [SV/24h]	Zufahrtende gesamt [SV/24h]
Fahrstreifen gesamt [-]	-	-0,31	0,69	0,66	0,38	0,24	0,51	0,32	0,63	0,27	0,50	0,38	0,61
Mischfahrstreifen [-]		-	-0,22	-0,61	-0,59	-	-0,12	0,09	-0,24	-0,11	-0,15	-	-0,23
Linksabbiegefahrstreifen [-]			-	0,26	-	-	0,26	0,56	0,37	0,10	0,27	0,57	0,37
Geradeausfahrstreifen [-]				-	0,27	-	0,60	-	0,60	0,09	0,57	-	0,56
Rechtsabbiegefahrstreifen [-]					-	0,40	-	-0,14	0,15	0,39	-	-	0,16
Rechtsabbiegende [Kfz/24h]						-	-	-	0,26	0,83	-	-	0,22
Geradeausfahrende [Kfz/24h]						-	-	0,85	-	0,95	-	-	0,77
Linksabbiegende [Kfz/24h]						-	0,26	-	-	-	0,88	0,26	
Zufahrtende gesamt [Kfz/24h]						-	0,28	0,83	0,28	0,28	-	-	0,91
Rechtsabbiegende [SV/24h]						-	-	-	-	-	0,11	0,34	
Geradeausfahrende [SV/24h]						-	-	-	-	-	0,10	0,84	
Linksabbiegende [SV/24h]						-	-	-	-	-	-	0,36	
Zufahrtende gesamt [SV/24h]						-	-	-	-	-	-	-	-

Abbildung 26: Korrelationsmaße (Spearman) zwischen Fahrstreifenanzahl und Verkehrsstärken des Kfz- und Schwerverkehrs

Aufgrund des starken Zusammenhangs können jedoch nicht Fahrstreifenanzahl und Verkehrsstärken gemeinsam in die multivariaten Betrachtungen einbezogen werden. Da die Verkehrsstärken den größeren Erklärungsgehalt haben, wird für die nachfolgenden Betrachtungen ausschließlich der Einfluss der Verkehrsstärken und nicht der Einfluss der Fahrstreifenanzahl betrachtet.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse der einbezogenen Variablen zeigt Abbildung 27. Alle Zusammenhänge weisen ein Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ auf. An dieser Stelle sollen nur starke Zusammenhänge (Koeffizient $\geq 0,5$) erläutert werden.¹⁰ Diese zeigen sich insbesondere zwischen den Verkehrsstärken (sowohl verschiedener Modi als auch der Relationen bzw. Bewegungsrichtungen), wobei die meisten und stärksten positiven Zusammenhänge zwischen Kfz- und Schwerverkehrsstärken vorliegen und wenige Korrelationen für Rad- und Kfz-, bzw. Rad- und Schwerverkehrsstärke. Das ist sachlogisch, da Hauptverkehrsrouten (mit größeren Verkehrsstärken) für den gesamten motorisierten Verkehr ausgelegt sind, während diese für den Radverkehr abweichen können.

Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärken und Entwurf zeigen sich vor allem zwischen den Verkehrsstärken des Kfz- und Schwerverkehrs und der Führung des Radverkehrs in der Annäherung. Dass sich hingegen nur ein mittlerer Zusammenhang zwischen den Radverkehrsstärken und der Führungsform zeigt, ist dabei überraschend, jedoch durch die Auswahl der Radverkehrsführungsform auf Strecken laut FGSV (2010) mittels Verkehrsstärke des motorisierten Verkehr und zulässigen Höchstgeschwindigkeiten, nicht aber die Radverkehrsstärke, zu erklären. Die Zusammenhänge zeigen dabei über alle Betrachtungen, dass bei höheren Kfz-Verkehrsstärken höherklassige Radverkehrsanlagen angeboten werden, bzw. Mischverkehr(-skombinationen) seltener vorliegen.

Die Korrelation der Verkehrsstärke des rechtsabbiegenden Kfz- und Schwerverkehrs mit dem Ausrundungsradius ist durch die größeren Schleppkurven, bzw. das Vorhandensein z. B. eines Rechtsabbiegefahrstreifens bei höheren Verkehrsstärken und somit auch größeren Ausrundungsradien zu erklären.

Zuletzt ist der Zusammenhang zwischen Entwurf und Betrieb zu erwähnen, nachdem mit Absetzung der Radfahrfurt häufiger ein (für den Rad-, bzw. Rad- und Fußverkehr) eigener Signalgeber vorhanden ist. Dies ist sachlogisch, da die Signalisierung im Seitenraum häufig nicht gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr möglich ist. Außerdem werden linksabbiegende Radfahrende häufiger indirekt geführt, wenn es eine separate Phase für den Linksabbiegenden Kfz-Verkehr gibt, wenn (für den Rad-, bzw. Rad- und Fußverkehr) ein eigener Signalgeber und in der Annäherung eine höherklassige Radverkehrsanlage vorhanden ist.

¹⁰ Zusammenhänge zwischen verschiedenen Aggregationen eines Merkmals werden hier nicht interpretiert.

Abbildung 27 Korrelationsmaße (Spearman) der verkehrlichen, betrieblichen und infrastrukturellen Merkmale an Knotenpunktzufahrten

An den 477 Zufahrten treten insgesamt 543 Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung auf, die in die multivariate Betrachtung einbezogen werden können. Im Folgenden wird das Kollektiv Unfälle an Knotenpunktzufahrten kurz beschrieben. Hinsichtlich der Unfallschwere sind 448 der 543 Unfälle mit Radverkehrsbeteiligung mit Personenschäden, davon wiederum sind 85 % Unfälle mit leichtem Personenschaden, 14 % Unfälle mit Schwerverletzten und 1 % mit Getöteten.

Die Unfalltypenverteilung ist Abbildung 28 zu entnehmen. Dabei wird die Betrachtung für alle Unfallkategorien und Unfälle mit Personenschäden differenziert getroffen. Für beide Betrachtungen machen Einbiegen-Kreuzen-Unfälle (Unfalltyp 3) den größten Anteil am Unfallgeschehen aus. Der zweithäufigste Unfalltyp sind Abbiegeunfälle (Unfalltyp 2) gefolgt von Alleinunfällen (Unfalltyp 1) und Unfällen im Längsverkehr (Unfalltyp 6). Die übrigen Unfalltypen weisen sehr geringe Anteile am Gesamtunfallgeschehen auf. Der Vergleich der Unfalltypenverteilung über alle Unfallkategorien und Unfälle mit Personenschäden zeigt, dass sich die Anteile der häufigsten Unfalltypen nur marginal unterscheiden. Da somit die Betrachtung aller Unfallkategorien die Verteilung der Unfälle mit Personenschäden repräsentiert, werden für die multikriterielle Betrachtung alle Unfallkategorien einbezogen um mit einem größeren Kollektiv die Aussagekraft der Modelle zu stützen.

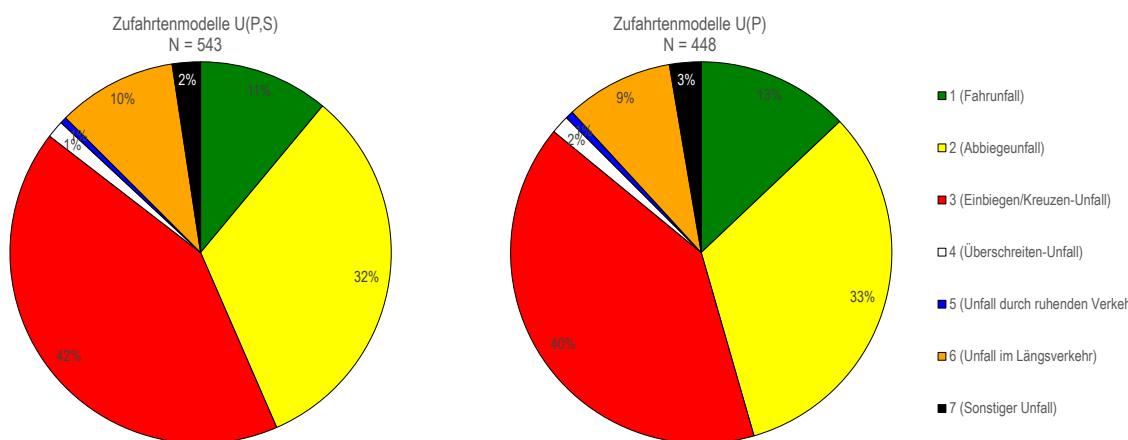


Abbildung 28 Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeteiligung) an Knotenpunktzufahrten für alle Unfallkategorien (links) und Unfälle mit Personenschäden (rechts)

Die Betrachtung der Beteiligtenkonstellation in Abbildung 29 zeigt, dass Radfahrende im Kollektiv am häufigsten (zu 69 %) mit PKW verunfallen. Dabei sind die Pkw-Führer in drei Viertel der Unfälle zwischen Radfahrenden und Pkw die Unfallverursachenden. Mit 10 % der Fälle machen Alleinunfälle von Radfahrenden den zweithöchsten Anteil der Beteiligtenkonstellationen aus. Den geringsten Anteil zeigen Unfälle zwischen Fußgängern und Radfahrenden. Die übrigen Konstellationen (Lkw-Radfahrende, Radfahrende-Radfahrende, Radfahrende-Andere Fahrzeuge) sind etwa gleich häufig im Kollektiv vertreten.

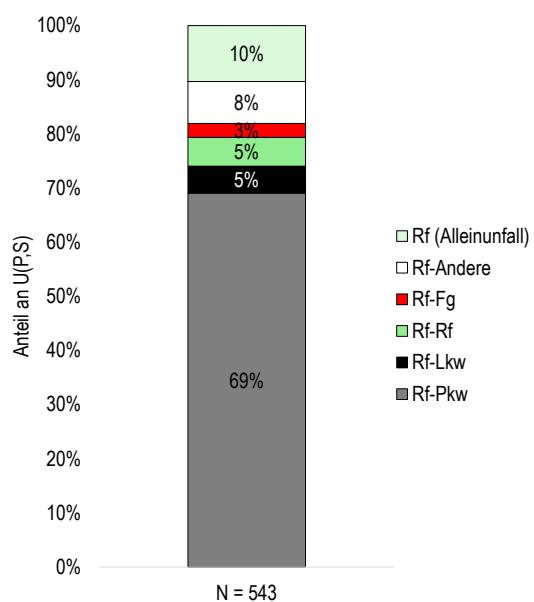


Abbildung 29 Verteilung der Beteiligtenkonstellation für Unfälle an Knotenpunktzufahrten

Die Betrachtung der Unfallumstände zeigt, dass die Unfälle überwiegend (76 %) bei Helligkeit und trockener Fahrbahn (83 %) stattfinden. Außerdem wurde nur bei 8 Unfällen (2 %) eine abgeschaltete LSA erfasst. Damit ergeben sich keine weiteren dedizierten Modelle z. B. für Unfälle bei Nässe, weil diese Ausprägungen nicht ausreichend im Kollektiv vertreten sind.

Zusammenfassend werden für die multivariate Betrachtung folgende Kollektive für die Knotenpunktzufahrten einbezogen:

- U(P,S) für Aussagen zum Gesamtunfallgeschehen
- U(P,S)-Typ 2 für Aussagen zu Abbiegeunfällen
- U(P,S)-Typ 3 für Aussagen zu Einbiegen/Kreuzen-Unfällen

Multivariate Statistik

In der multivariaten Statistik werden die in der deskriptiven Statistik beschriebenen Merkmale auf ihren Einfluss auf die Unfallanzahl geprüft. Dabei zeigen folgende Einflussgrößen einen Zusammenhang mit der Unfallanzahl für mindestens ein Teilkollektiv, wobei die konkreten Zusammenhänge nachfolgend beschrieben werden:

- Verkehrsstärke Rad, Kfz- und Schwerverkehr
- Verkehrsregelungsart des Knotenpunktes
- Führung des Radverkehrs in der Annäherung
- Signalisierung Rechtsabbiegender Kfz-Verkehr
- Abbiegeverbote
- Absetzung Radfahrfurt
- Führung Linksabbiegende Radfahrende
- Vorfahrtsregelung (vorfahrtberechtige Zufahrt)

Merkmale, für die in den Modellen kein signifikanter Einfluss auf die Unfallanzahl nachgewiesen werden konnte, werden im Folgenden textlich interpretiert:

- Knotenpunktform: Dieser wird in der Literatur häufig ein Einfluss auf die Unfallanzahl nachgewiesen (Kreuzungen haben höhere Unfallzahlen als Einmündungen), jedoch nur wenn die Exposition nicht einbezogen wird. Die Wirkung der Exposition in dieser Untersuchung „ersetzt“ den Zusammenhang mit der Knotenpunktform.
- Signalisierung Radverkehr: Diese zeigt einen mittleren Zusammenhang mit der Radverkehrsführung in der Annäherung und der Furtabsetzung. Da beide Größen bereits einen Teil des Unfallgeschehens erklären, zeigt die Signalisierung keinen weiteren Erklärungsgehalt.
- Signalisierung Linksabbiegende: Die separate Signalisierung zeigt laut Literaturangaben einen negativen Zusammenhang mit (Links-)Abbiegeunfällen. Da das Untersuchungskollektiv hier jedoch von Rechtsabbiegeunfällen dominiert wird, ist dieser Einfluss nicht beobachtbar.
- Ausrundungsradius: Es konnte keine Literatur gefunden werden, die den Einfluss des Ausrundungsradius auf die Unfallanzahl beschreibt. Das Merkmal wurde hier aufgenommen, da höhere Ausrundungsradien tendenziell zu höheren Geschwindigkeiten des Kfz-Verkehrs führen können. Ein signifikanter Einfluss auf die Unfallanzahl wurde jedoch auch hier nicht festgestellt.
- Grünpfeil (Z720): An Knotenpunktzufahrten mit Grünpfeil können bei Anordnung entgegen den Einsatzbedingungen der VwV-StVO häufiger Unfälle auftreten. In Dresden wurden in den letzten Jahren jedoch viele Grünpfeile entfernt, welche den Einsatzkriterien nicht entsprachen. Dass dieses Merkmal in der Untersuchung keinen signifikanten Einfluss zeigt, kann darauf deuten, dass regelkonform angebrachte Grünpfeile keinen negativen Zusammenhang zur Verkehrssicherheit des Radverkehrs aufweisen.

Für die Betrachtung aller Unfalltypen (U(P,S)) zeigt das Endmodell einen positiven Zusammenhang der Verkehrsstärke des Rad- und Kfz-Verkehrs mit der Unfallanzahl und der Verkehrsregelung des Knotenpunktes. Dabei werden für beide Modi die Gesamtverkehrsstärken am Knoten und nicht die der Zufahrt signifikant, was unter

der Berücksichtigung, dass Unfälle sowohl zwischen allen aus der Zufahrt kommenden Radfahrenden mit anderen Verkehrsteilnehmenden aus allen Zufahrten als auch mit anderen Verkehrsteilnehmenden aus der Zufahrt mit Radfahrenden aus allen Zufahrten auftreten können, sachlogisch ist. Die Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs zeigt hier einen höheren Koeffizienten als die des Radverkehrs, was mit den Ergebnissen der Literaturrecherche übereinstimmt.

Wenn die Zufahrt an einem LSA-geregelten Knotenpunkt liegt, hat dies (unter Berücksichtigung der Verkehrsstärken) einen negativen Zusammenhang mit der Unfallanzahl gegenüber anderen Verkehrsregelungsarten, wobei die prognostizierte Unfallanzahl an Zufahrten mit LSA über 40 % niedriger ist.

Tabelle 29 Endmodell Zufahrten alle Unfalltypen U(P,S)

Parameter		Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)		-15,738	0,000	1,582
In(DTV_Rad)_ges		0,590	0,000	0,101
In(DTV_Kfz)_ges		0,886	0,000	0,156
Verkehrsregelungsart	ja	-0,533	0,029	0,244
	nein	-		

In den Alternativmodellen (siehe Anlage 6) zeigt außerdem die (teilweise) separate Signalisierung des rechtsabbiegenden motorisierten Verkehrs einen negativen Zusammenhang zur Unfallanzahl, wenn statt der Kfz-Verkehrsstärke des Knotenpunktes die Verkehrsstärke des rechtsabbiegenden Schwerverkehrs betrachtet wird (Alternativmodell 1). Dieser Zusammenhang wird noch einmal verstärkt, wenn der Radverkehr in der Annäherung der Zufahrt im Mischverkehr geführt wird. (Alternativmodell 2).

Die Reststreuung ist in allen Betrachtungen (Endmodell, Alternativmodell 1&2) verhältnismäßig hoch, was heißt, dass diese Modelle für das Unfallgeschehen einen geringen Erklärungsgehalt aufweisen. Ein höherer Erklärungsgehalt wird für die Modelle der ein- und zweistelligen Unfalltypen erwartet.

In der Betrachtung der Abbiegeunfälle (U(P,S)_Typ2) zeigt das Endmodell in Tabelle 30 ebenso einen positiven Zusammenhang der Verkehrsstärke des Rad- und Kfz-Verkehrs mit der Unfallanzahl. Für den Kfz-Verkehr liefert hier die Verkehrsstärke der Zufahrenden den höchsten Erklärungsgehalt, für den Radverkehr wird die Gesamtverkehrsstärke am Knoten und nicht die der Zufahrt signifikant. Auch hier ist der Zusammenhang erklärbar, da die Zuweisung des Unfalls zu einer Zufahrt über den Unfallverursachenden getroffen wird (siehe Abschnitt 3.4) und die Kfz-Führenden in 75 % der Unfälle zwischen Radfahrenden und Kfz die Unfallverursachenden sind.

Die Koeffizienten Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs zeigen hier (und auch in den kommenden Modellen) einen überproportionalen (progressiven) Einfluss auf das Unfallgeschehen. Gemäß der Literatur werden hier degressive oder maximal proportionale Zusammenhänge erwartet. Möglich ist, dass die Verkehrsstärken in den Betrachtungen nicht ausreichend gut abgebildet werden, da die betrachteten Unfallkonstellationen so unterschiedliche Bewegungsrichtungen und Beteiligtenkonstellationen beinhalten, dass die Verkehrsstärken zwar einen signifikanten Einfluss auf das Unfallgeschehen haben, aber deren Einfluss überschätzt wird, bzw. noch andere Einflüsse in diesen abgebildet werden. So wirkt in dem Modell der Abbiegeunfälle beispielsweise die Verkehrsstärke aus der Zufahrt (aus der der Hauptverursachende ausfährt), während dies einerseits ein linksabbiegendes Kfz mit einem Geradeausfahrenden aus der Gegenrichtung sein kann, andererseits aber auch ein rechtsabbiegendes Kfz mit einem parallel fahrenden Radfahrenden oder ein geradeausfahrendes Kfz als nachfolgender eines rechtsabbiegenden Radfahrenden. Während hier in jeder Unfallkonstellation nur ein Fahrzeugstrom Einfluss auf die Unfallanzahl hat, wirkt im Modell die Verkehrsstärke aller Zufahrender Kfz, weil die Unterscheidung der Ströme bzw. Unfallkonstellationen nicht gegeben ist.

Abseits der Exposition zeigen die infrastrukturellen und betrieblichen Eigenschaften Rechtsabbiegeverbot, Mischverkehrskombination und Furtabsetzung einen negativen Zusammenhang mit der Unfallanzahl. Das Rechtsabbiegeverbot ist hier ähnlich einer Expositionsgröße zu interpretieren, da an Zufahrten, an denen dieses gilt, keine bis wenige Kfz rechtsabbiegen werden und somit auch keine Unfälle mit rechtsabbiegenden Kfz

aufreten. Der große Einfluss des Rechtsabbiegeverbotes (ca. - 50 % prognostizierte Unfallanzahl - im Gegensatz zum Linksabbiegeverbotes, welchem kein Einfluss nachgewiesen wird) ist an dieser Stelle u. a. durch den hohen Anteil an Rechtsabbiegeunfällen im Kollektiv zu erklären. Der negative Zusammenhang zwischen der Führung des Radverkehrs in einer Mischverkehrskombination (Mischverkehr, Mischverkehr mit Schutzstreifen, Mischverkehr – Gehweg „Radfahrende frei“) und der Unfallanzahl lässt sich durch die besseren Sicht- und Platzverhältnisse von im Mischverkehr/auf der Fahrbahn fahrenden Radfahrenden erklären, da insbesondere beim Rechtsabbiegen die Radfahrenden i. d. R. vor statt neben den rechtsabbiegenden Kfz stehen/warten (Unfalltyp 23) bzw. nicht im Seitenraum fahren (Unfalltyp 24). Dieses Ergebnis wird auch durch die Literatur (Kolrep-Rometsch et al. 2013; Alrutz et al. 2015) bestätigt. Im Alternativmodell (siehe Anlage 6) wird statt der Gesamtverkehrsstärke des Radverkehrs am Knoten auch die Verkehrsstärke des Radverkehrs in der Zufahrt signifikant, womit verdeutlicht werden soll, dass die Führungsform „Mischverkehr“ in der Zufahrt nicht als Stellvertreter für eine niedrige Verkehrsstärke des Radverkehrs in der betrachteten Zufahrt gegenüber der Gesamtverkehrsstärke am Knotenpunkt steht.

Die Interpretation sowohl des negativen Zusammenhangs der Führungsform *Mischverkehr – Gehweg „Radfahrende frei“* als auch des Vorhandenseins einer Absetzung mit der Unfallanzahl ist in diesem Zusammenhang schwierig, da für den ersten Zusammenhang keine Information vorhanden ist, ob die Radfahrenden auf der Fahrbahn oder im Seitenraum fahren und für den zweiten Zusammenhang die Absetzung nicht in weiterer Differenzierung in einem Modell signifikant wurde. Möglich ist hier, dass sich Effekte auf die Unfallzahl gegenüber Rechtsabbiegeunfällen und Linksabbiegeunfällen überlagern, durch die geringen Besetzungen im Kollektiv jedoch weder separate Modelle für Linksabbiegeunfälle möglich sind noch der Einfluss verschiedener Absetzmaße auf das Unfallgeschehen überprüft werden kann.

Tabelle 30 Endmodell Zufahrten Abbiegeunfälle U(P,S)_Typ2

Parameter		Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)		-17,397	0,000	2,173
In(DTV_Rad)_ges		0,645	0,000	0,134
In(DTV_Kfz)_zuf		1,088	0,000	0,197
Rechtsabbiegeverbot	ja	-0,735	0,025	0,327
	nein	-		
Mischverkehrs-kombination	ja	-0,587	0,012	0,235
	nein	-		
Furt abgesetzt (>0,5m)	ja	-0,522	0,030	0,240
	nein	-		

Für die Einbiegen/Kreuzen-Unfälle (U(P,S)_Typ3) hat (entgegen aller anderen Unfalltypen) nicht die Verkehrsstärke, sondern die Vorfahrtsregelung (bevorrechtigte Zufahrt vs. wertepflichtige Zufahrt auch an Knotenpunkten mit LSA) den höchsten Erklärungsgehalt für das Unfallgeschehen und auch den stärksten Zusammenhang zum Unfallgeschehen (Faktor: 0,1), siehe Tabelle 31. Dabei entstehen ohne Einbezug dieser Variable keine statistisch gesicherten Aussagen. Inhaltlich ist dieser Umstand so zu erklären, dass Einbiegen/Kreuzen-Unfälle i. d. R. mit einer Missachtung der Vorfahrt durch den Unfallverursachenden verbunden ist – an Knotenpunkten ohne LSA liegen somit in der bevorrechtigten Zufahrt keine Einbiegen/Kreuzen-Unfälle vor. An Knotenpunkten mit LSA hingegen sind Einbiegen/Kreuzen-Unfälle in i. d. R. mit Rotlichtmissachtungen assoziiert. Die Hypothese zu dem Zusammenhang ist hier, dass Zufahrten der wertepflichtigen Zufahrt an Knotenpunkten mit LSA höhere Sperrzeiten aufweisen und es an diesen Zufahrten häufiger zu Unfällen durch Rotlichtmissachtungen kommt.

Zusätzlich zeigen die Verkehrsstärke des zufahrenden Radverkehrs und die Gesamtverkehrsstärke des Kfz-Verkehrs am Knoten einen positiven Zusammenhang zur Unfallanzahl.

Tabelle 31 Endmodell Zufahrten Einbiegen/Kreuzen-Unfälle U(P,S)_Typ3

Parameter		Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)		-17,906	0,000	2,637
ln(DTV_Rad)_zuf		0,386	0,000	0,096
ln(DTV_Kfz)_ges		1,374	0,000	0,257
Vorfahrtsregelung	Bevorrechtigte Zufahrt	-2,230	0,000	0,246
	Wartepflichtige Zufahrt	-		
Verkehrsregelungsart LSA	ja	-1,268	0,000	0,310
	nein	-		

Auch in den Alternativmodellen (siehe Anlage 6) wirkt die Vorfahrtsregelung mit vergleichbarem Einfluss auf die Unfallanzahl. Im Alternativmodell 1 wirkt auch die Betrachtung von Teil-LSA (gemeinsam mit LSA) negativ auf die Unfallanzahl, jedoch weniger stark als die Vollsignalisierung (Faktor 0,44).

In Alternativmodell 2 wird (ohne Einfluss der Kfz-Verkehrsstärke) außerdem die Führung linksabbiegender Radfahrender signifikant. Dabei weisen Zufahrten, an denen eine indirekte Führung für den linksabbiegenden Radverkehr vorliegt, eine mehr als doppelt so hohe prognostizierte Unfallanzahl auf, was dadurch zu erklären ist, dass Radfahrende in dieser Führungsform den Abbiegevorgang in zwei Kreuzen-Vorgänge teilen und sich das Unfallgeschehen in diesen Typen verlagert. Ein weiterer möglicher Einfluss dieser Führungsform ist, dass Radfahrende mit indirekter Führung zwei Freigabephasen benötigen, um einen Abbiegevorgang durchzuführen, was möglicherweise die Akzeptanz der Verkehrsregelung (= Rotlicht an LSA) verringert.

5.2 Vereinfachte Modelle für Dresden, Darmstadt und München

Für den vereinfachten Ansatz der Modellschätzung wurden die in Abschnitt 3.6 beschriebenen reduzierten Datensätze erhoben und werden nachfolgenden in Abschnitt 5.2.1 deskriptiv ausgewertet und in Abschnitt 5.2.2 sowie 5.2.3 multikriteriell auf ihren Einfluss auf das Unfallgeschehen geprüft.

5.2.1 Deskriptive Statistik

Für das vereinfachte Streckenmodell wurden (im Sinne des kleinsten gemeinsamen Nenners der Datenverfügbarkeit) nur Hauptverkehrsstrecken betrachtet, für welche die Verkehrsstärke für den Kfz-Verkehr vorliegt. Insgesamt konnten 1458 Streckenabschnitte mit einer Gesamtlänge von ca. 500 km betrachtet werden. Analog wurden für die vereinfachten Knotenpunktmodelle nur Knotenpunkte mit LSA betrachtet, da für Darmstadt Verkehrsstärken aus den Detektoren der LSA ermittelt wurden (und folglich keine Daten für nichtsignalisierte Knotenpunkte vorliegen). Hier kann ein Gesamtkollektiv von 333 Knotenpunkten betrachtet werden. Ein Überblick über beide Kollektive sowie der Ausprägungen der aggregierten Eigenschaften befindet sich in Tabelle 32.

Tabelle 32 Verteilung der Ausprägungen von Merkmalen der Strecken und Knoten in den vereinfachten Modellen

Merkmal	Ausprägung	Anzahl [-]	Länge [km]	Anteil Anzahl	Anteil Länge	Unfalldichte $[U(P)_{Rf//} / (km^*Jahr)]$	Unfallrate Rf $[U(P)_{Rf//} / (km^*1Mio^*Rf^*Jahr)]$
Strecken							
	gesamt	1458	500,2	-	-	1,43	5,03
Stadt	Darmstadt	49	12,5	3%	3%	0,93	1,49
	Dresden	597	203,4	41%	41%	1,13	10,08
	München	812	284,3	56%	57%	1,68	1,53
Radverkehrsanlage	Mischverkehrskombination	535	175,5	37%	35%	1,04	9,62
	Radfahrstreifen	86	22,4	6%	4%	2,62	3,01
	Radweg	633	218,9	43%	44%	1,77	1,67
	Gemeinsamer Geh- und Radweg	128	57,5	9%	11%	0,78	4,84
	Sonstige Kombination	76	25,8	5%	5%	1,11	3,25
Straßenbahn-gleise	Nicht vorhanden	1122	398,9	77%	80%	1,18	4,42
	Vorhanden	336	101,3	23%	20%	2,27	7,06
zulässige Höchstgeschwindigkeit	30 km/h	102	29,2	7%	6%	0,76	8,70
	50 km/h	1259	416,8	86%	83%	1,52	4,97
	> 50 km/h	97	54,2	7%	11%	1,01	1,85
ruhender Verkehr	kein	626	215,5	43%	43%	1,26	7,56
	(teilweise) einseitig	446	150,9	31%	30%	1,37	3,14
	(teilweise) beidseitig	295	97,7	20%	20%	1,84	3,62
	keine Information	91	36,1	6%	7%	1,52	1,40
Merkmal	Ausprägung	Anzahl [-]		Anteil Anzahl		Unfalldichte $[U(P)_{Rf//} / (km^*Jahr)]$	Unfallrate Rf $[U(P)_{Rf//} / (km^*1Mio^*Rf^*Jahr)]$
Knoten							
	gesamt	333	-	-	-	0,88	0,98
Stadt	Darmstadt	51	3%	0,51	0,50		
	Dresden	128	9%	0,82	1,28		
	München	154	11%	1,06	0,87		

Hinsichtlich der Unfallstruktur zeigt sich die Verteilung der Unfalltypen nach Abbildung 30. Insgesamt wurden auf den erhobenen Strecken mehr Unfälle registriert als an den Knotenpunkten. Im Vergleich zu der Unfalltypenverteilung in Dresden (vgl. Abbildung 18) zeigt das Streckenunfallgeschehen in den drei Kommunen

deutlich mehr Unfälle vom Typ 7 (sonstiger Unfall): mit 17% anteilig etwa dreimal so viele Unfälle. Die Betrachtung der Unfalltypenverteilung in den Städten zeigt, dass der überwiegende Teil der Typ 7-Unfälle in München stattfand. Im gesamten Unfalldatensatz wurden in Bayern 20 % der Unfälle als Unfalltyp 7 klassifiziert, während in Sachsen und Hessen jeweils 9 % bzw. 10 % der Unfälle als Unfalltyp 7 erfasst wurden. Hier werden Unterschiede in der Unfallaufnahme vermutet.

Weiterhin wurden anteilig mehr Abbiegeunfälle sowie Unfälle im Längsverkehr registriert und analog weniger Einbiegen-Kreuzen Unfälle sowie Unfälle durch den ruhenden Verkehr, was durch den Ausschluss der Nebennetzstrecken in den vereinfachten Modellen erklärt werden kann.

Im Unfallgeschehen an den Knotenpunkten ist auffällig, dass es gegenüber der Unfälle der differenzierten Modelle eine Verschiebung von Einbiegen-Kreuzen Unfällen zu Abbiegeunfällen gibt (vgl. Abbildung 24), was dadurch zu erklären ist, dass sich im Kollektiv der einfachen Modelle nur LSA-geregelte Knotenpunkte finden, an denen Einbiegen-Kreuzen Unfälle seltener auftreten, während in den differenzierten Modellen in Dresden auch verkehrszeichengeregelte Knotenpunkte enthalten sind.

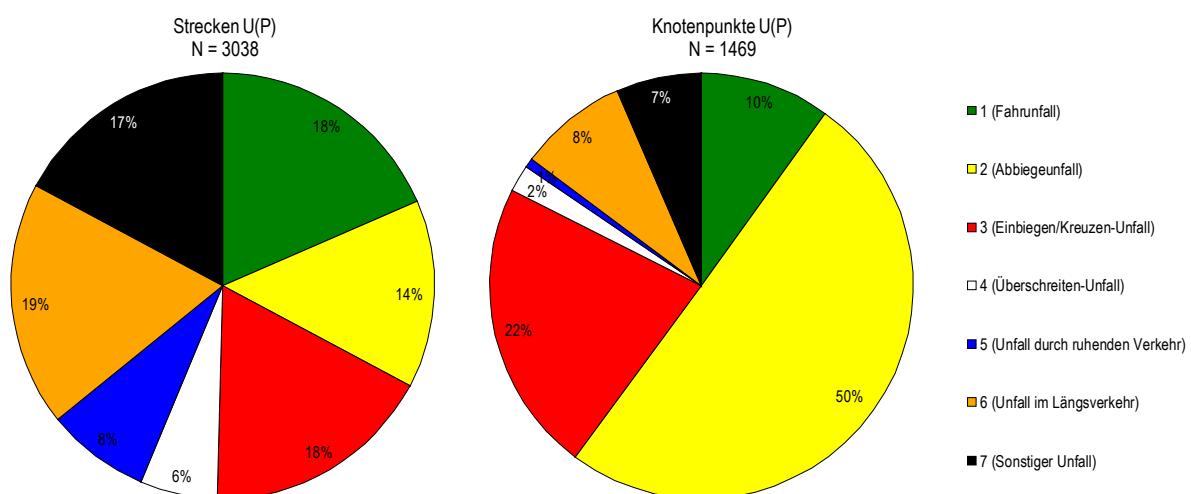


Abbildung 30 Unfalltypenverteilung der Unfälle (mit Radverkehrsbeteiligung) der vereinfachten Modelle an Strecken (links) Knotenpunkten (rechts)

Durch die Unterschiede in den Unfalltypenstrukturen und weil es sich um vereinfachte (aggregierte Modelle) handeln soll, werden in den nachfolgenden Abschnitten nur Gesamtmodelle über alle Unfalltypen berechnet.

5.2.2 Vereinfachtes Streckenmodell

Das vereinfachte Streckenpunktmodell zeigt den Einfluss von Radverkehrs- und Kfz-Verkehrsstärke sowie betrieblich-infrastruktureller Eigenschaften auf das Unfallgeschehen an Streckenabschnitten von Hauptverkehrsstraßen (ohne Anschlussknotenpunkte). Das vollständige Modell befindet sich in Anlage 7.

Die Koeffizienten im Modell (Tabelle 33) zeigen für die Radverkehrsstärke, wie in den differenzierten Modellen, einen positiv degressiven Einfluss (Koeffizient 0,45).

Im Gegensatz zu den differenzierten Modellen wird auch die Kfz-Verkehrsstärke signifikant, allerdings mit einem Koeffizienten von 0,26. In der Literatur wird der Einfluss der Kfz-Verkehrsstärke durchgängig eher linear (Koeffizient ≈ 1) abgebildet. Fraglich ist hier welchen Einfluss der Koeffizient auf Basis der insgesamt wenigen Konfliktsituationen auf Streckenabschnitten mit Kfz (Konflikte im Längsverkehr, diese jedoch auch abwesend bei Führungen im Seitenraum -> 50 % der Strecken im Kollektiv) abbildet. Eine höhere Kfz-Verkehrsstärke könnte hier auch stellvertretend für mehr Ein- und Abbiegevorgänge bzw. Parkvorgänge stehen, jedoch ebenso stellvertretend für andere Einflussgrößen (z. B. Breite der Fahrbahn), die für den vereinfachten Datensatz nicht vorliegen. Da die Verkehrsstärke jedoch sowohl signifikant wird als auch den Erklärungsgehalt des Modells verbessert, wird sie in die Betrachtungen einbezogen. Im Alternativmodell ohne Kfz-Verkehrsstärke wird der Einfluss der

Radverkehrsführung jedoch nicht signifikant, was auch durch den Zusammenhang „Führung auf der Fahrbahn“ und Einfluss der Kfz-Verkehrsstärke zu erklären ist. Das Alternativmodell in Anlage 7 enthält somit nur den Einfluss von Radverkehrsstärke und Straßenbahngleisen, weil keine weiteren Einflussgrößen im Modell einen signifikanten Einfluss zeigen.

Hinsichtlich des Einflusses von Radverkehrsanlagen auf Strecken zeigt das vereinfachte Modell Mischverkehr(-skombinationen) als Basis. Radfahrstreifen werden am unsichersten bewertet – fraglich ist hier, ob diese eine ausreichende Breite haben, da diese Information im Datensatz nicht vorhanden ist und Radfahrstreifen evtl. bei Sicherheitsproblemen mit geringen Breiten gebaut werden. Radwege und gemeinsame Geh- & Radwege haben ggü. Mischverkehr(-skombinationen) einen negativen Zusammenhang zur Unfallanzahl, was durch die Trennung vom Kfz-Verkehr auf Strecken zu erklären ist. Dabei ist die besonders hohe Sicherheitsbewertung von gemeinsamen Geh- & Radwegen (bei gleichzeitig höheren Unfallraten, siehe Tabelle 32) fraglich, aber evtl. durch die höheren Breiten zu erklären. Die Ausprägung „sonstige Kombination“ ist nicht interpretierbar.

Wie in den differenzierten Modellen zeigt sich auch hier im Gesamtmodell der positive Zusammenhang zwischen Unfallanzahl und dem Vorhandensein von Straßenbahnschienen (Koeffizient differenzierte Modelle: 0,51).

Tabelle 33 Vereinfachtes Modell Streckenabschnitte U(P)

Parameter		Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)		-5,244	0,000	0,501
ln(DTV_Rad)		0,402	0,000	0,032
ln(DTV_Kfz)		0,261	0,000	0,057
Radverkehrsführung	Sonstige Kombination	-0,446	0,007	0,166
	Gemeinsamer Geh-&Radweg	-0,438	0,001	0,137
	Radweg	-0,223	0,008	0,084
	Radfahrstreifen	0,213	0,066	0,116
	Mischverkehr (-skombination)	-		
	ja	0,608	0,000	0,070
Straßenbahnschienen		nein	-	

Für die vereinfachten Modelle wird die Modellgüte mittels Streudiagramm und CURE-Plots betrachtet. Abbildung 31 zeigt, dass die berechneten Unfallzahlen tendenziell häufiger unterhalb der beobachteten Unfallzahlen liegen – die Abbildung ist jedoch aufgrund der vielen Stützpunkte schwer interpretierbar. Das Fehlermaß (RMSE) liegt bei 2,46 U(P), die Schätzung der Gesamtunfallanzahl wird durch Modell jedoch gut abgebildet (U beobachtet = U berechnet = 3038).

Die CURE-Plots in Abbildung 32 zeigen, dass die Residuen der Unfallanzahl innerhalb des Vertrauensbereichs ($\pm 2\sigma^*(n)$) liegen. Lediglich bei Radverkehrsstärken im Bereich von ca. 8.000 bis 12.000 Radfahrende/24h werden die Unfallzahlen systematisch unterschätzt, weshalb das Modell hier nur eingeschränkt gültig ist.

Die Betrachtung über die Kfz-Verkehrsstärke zeigt ein ähnliches Bild: die Unfallzahlen werden bei Verkehrsstärken von ca. 9.000 bis 17.000 Kfz/24h systematisch unterschätzt, sodass das Modell in diesem Bereich nur eingeschränkt anwendbar ist. Für hohe Kfz-Verkehrsstärken (ab ca. 50.000 Kfz/24h) wird die Unfallanzahl systematisch überschätzt. In diesem Bereich trifft das Modell keine zuverlässigen Aussagen zur Unfallanzahl.

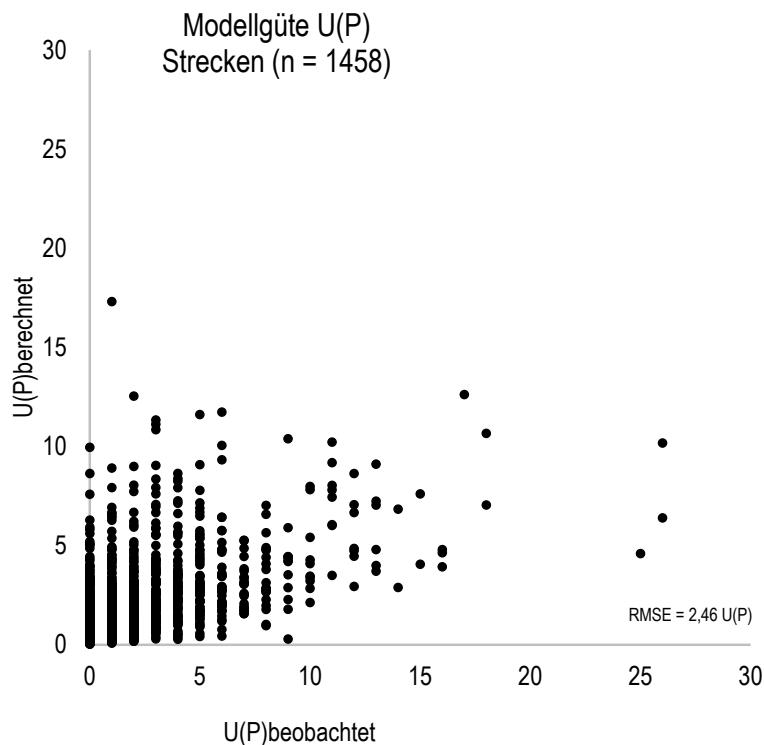


Abbildung 31 Streudiagramm der beobachteten und berechneten Unfallzahlen an Streckenabschnitten (vereinfachtes Modell)

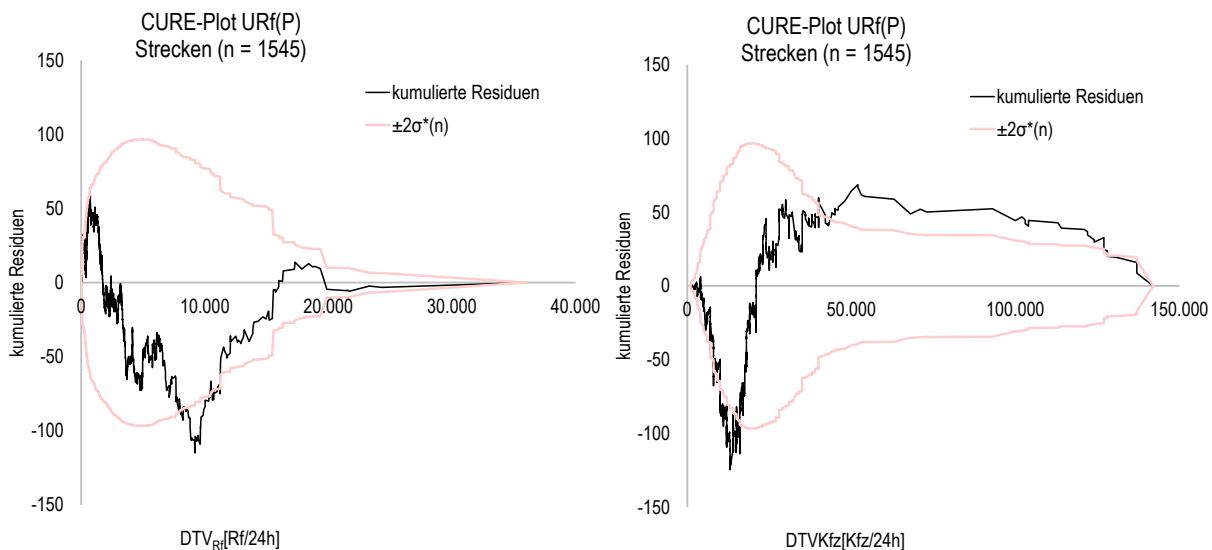


Abbildung 32 CURE-Plot der Streckenabschnitte (vereinfachtes Modell) in Abhängigkeit von der Radverkehrsstärke (links) und der Kfz-Verkehrsstärke (rechts)

5.2.3 Vereinfachtes Knotenpunktmodell

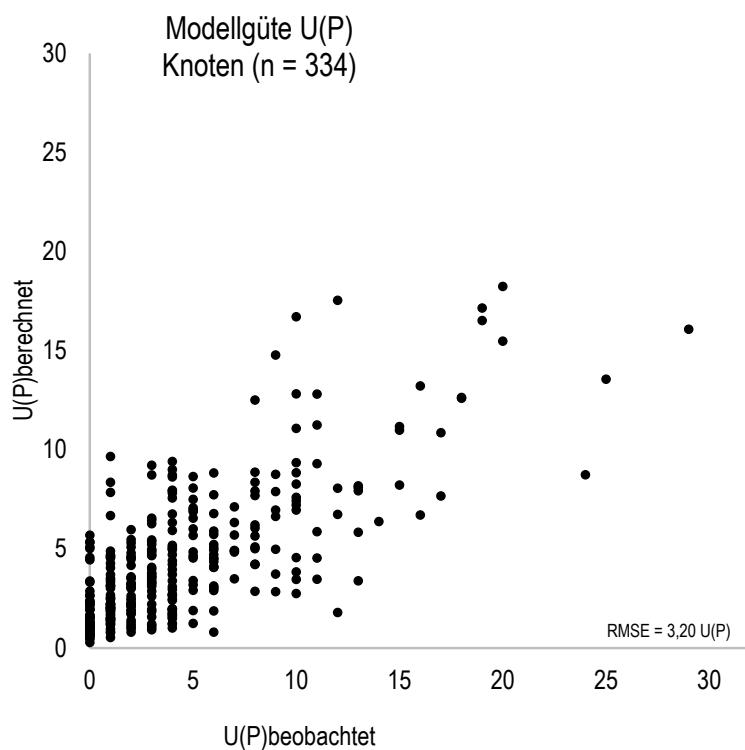
Das vereinfachte Knotenpunktmodell zeigt den Einfluss der Gesamtbelastung von Radverkehrs-, sowie Kfz-Verkehrsstärke auf das Unfallgeschehen an signalisierten Knotenpunkten. Hierbei zeigt der Koeffizient für die Radverkehrsstärke mit 0,560 einen mit den Koeffizienten der detaillierten Modelle vergleichbaren Wert (0,623). Mit 0,490 liegt der Koeffizient der Kfz-Verkehrsstärke deutlich unter dem in den detaillierten Modellen (0,638) und ebenso unter dem Koeffizienten des Radverkehrs. Eine mögliche Erklärung ist hier die unterschiedliche Datenerhebung in den Kommunen und damit verbundene „Mischung“ der Wirkung der Kfz-Verkehrsstärken.

Tabelle 34 Vereinfachtes Modell Knotenpunkte U(P)

Parameter	Koeffizient	Signifikanzniveau	Standardfehler
(Konstanter Term)	-9,603	0,000	0,957
In(DTV_Rad)_ges	0,560	0,000	0,052
In(DTV_Kfz)_ges	0,490	0,000	0,105

Infrastrukturell-betriebliche Eigenschaften liegen für das Knotenpunktkollektiv nicht vor und können deshalb nicht abgeschätzt werden. Ebenso entstehen keine Alternativmodelle.

Abbildung 33 zeigt das Streudiagramm der beobachteten und berechneten Unfallzahlen. Die Werte streuen relativ gleichmäßig um die Achsendiagonale, sodass keine systematische Über- oder Unterschätzung festgestellt werden kann. Das Fehlermaß (RMSE) liegt bei 3,20 U(P), die Schätzung der Gesamtunfallanzahl wird wiederum gut abgebildet (U beobachtet = U berechnet = 1469).

**Abbildung 33 Streudiagramm der beobachteten und berechneten Unfallzahlen an Knotenpunkten (vereinfachtes Modell)**

Die Betrachtung der CURE-Plots (Abbildung 34) zeigt im Vergleich zu den CURE-Plots der Streckenmodelle, dass die kumulierten Residuen innerhalb des Vertrauensbereich oszillieren und das Modell über die Bandbreite der Verkehrsstärken anwendbar ist.

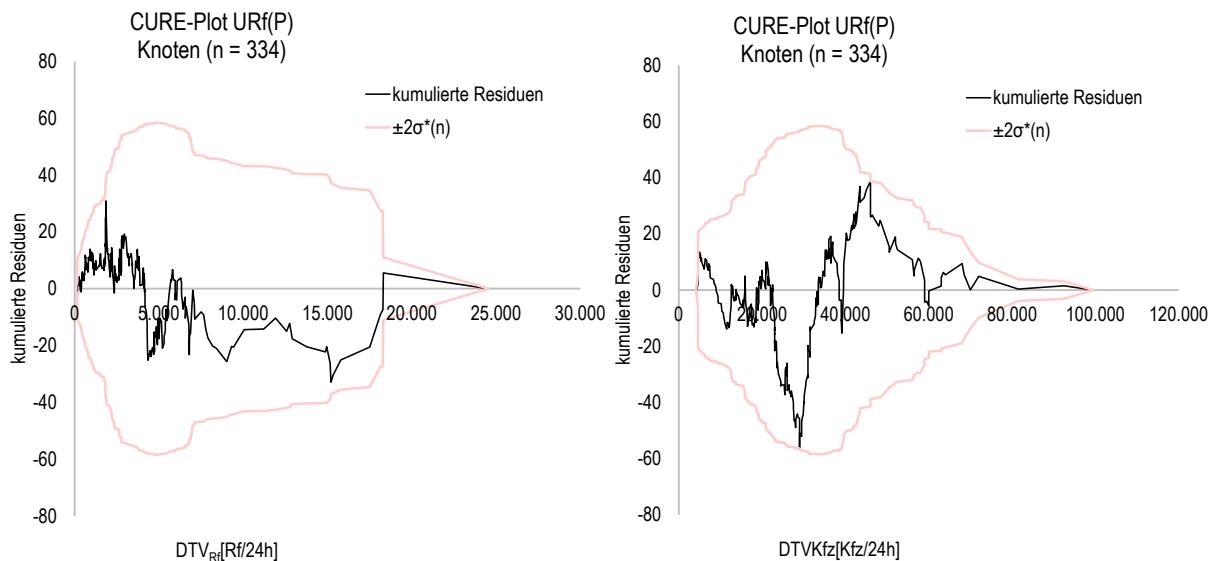


Abbildung 34 CURE-Plot der Knotenpunkte (vereinfachtes Modell) in Abhängigkeit von der Radverkehrsstärke (links) und der Kfz-Verkehrsstärke (rechts)

5.3 Vergleich der Modelle

Der Vergleich der differenzierten und vereinfachten Modelle ist aufgrund der unterschiedlichen Funktionen im Projekt und unterschiedlicher unabhängigen Variablen nur eingeschränkt möglich. Die differenzierten Modelle dienen insbesondere dazu, infrastrukturelle und betriebliche Wirkungen auf das Unfallgeschehen zu beschreiben und nicht der Prognose von Unfallzahlen an bestimmten Infrastrukturelementen (wie in den vereinfachten Modellen). Außerdem wurden für die differenzierten Modelle die Unfälle aller Unfallkategorien (inklusive Sachschäden), für die vereinfachten Modelle jedoch nur die Unfälle mit Personenschäden, betrachtet. Daher sollen an dieser Stelle insbesondere die in die Modelle aufgenommenen Variablen und deren Wirkrichtung, nicht jedoch die Werte der Koeffizienten interpretiert werden. Zusätzlich wird der Erklärungsgehalt der Modelle verglichen.

Der Vergleich der Streckenmodelle (Gesamtmodell in Tabelle 15, Vereinfachtes Modell in Tabelle 33) zeigt, dass in beiden Modellen die Radverkehrsstärke einen positiv degressiven Einfluss hat. Eine weitere Gemeinsamkeit ist der positive Zusammenhang zwischen der Unfallanzahl und dem Vorhandensein von Gleisen (wobei in den differenzierten Modellen nur Gleise im Mischverkehr betrachtet werden).

Abweichend ist, dass in den vereinfachten Modellen sowohl die Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs als auch die Radverkehrsführungsform signifikant wird, während in den differenzierten Modellen die Dichte der Grundstückzufahrten, die Breite der Fahrbahn und die zulässige Geschwindigkeit einen Einfluss zeigen. An dieser Stelle wird vermutet, dass die Kfz-Verkehrsstärke stellvertretend auch für die Breite der Fahrbahn und die Dichte der Grundstückzufahrten (welche indirekt für die Anzahl an Abbiegevorgängen steht) interpretiert werden kann.

Ein maßgeblicher Unterschied in den Datensätzen besteht darin, dass in den differenzierten Modellen auch Streckenabschnitte des Nebennetzes betrachtet werden. Darin wird vermutet, dass die Effekte von zulässiger Höchstgeschwindigkeit sich insbesondere auf die Unterscheidung Haupt- und Nebennetz auswirken und daher im vereinfachten Modell nicht signifikant werden. Analog wird für die differenzierten Modelle vermutet, dass die hohe Anzahl Nebennetzstrecken (mit i. d. R. Führung des Radverkehrs im Mischverkehr) die Effekte der Radverkehrsanlagen überlagert.

Zusammenfassend weisen die Modelle auf vergleichbare Effekte hin, die sich in unterschiedlichen Attributen spiegeln. Vergleicht man die Modellgüte über den Erklärungsgehalt (Anteil erklärter Reststreuung), so zeigt sich, dass im differenzierten Modell 55 % der Reststreuung erklärt werden, während dies im vereinfachten Modell 49 % sind.

Für die Knotenpunkte können nur die Knotenpunktmodelle verglichen werden (Gesamtmodell in Tabelle 24, Vereinfachtes Modell in Tabelle 34). Hier zeigt die Radverkehrsstärke in beiden Modellen einen positiv degressiven Einfluss. Die Kfz-Verkehrsstärke wird in beiden Modellen signifikant.

Abgesehen davon sind die Einflussgrößen nicht vergleichbar. Der Umfeldfaktor liegt für die vereinfachten Modelle nicht vor und die Differenzierung nach Verkehrsregelungsart ist nicht möglich, da in den vereinfachten Modellen nur Knotenpunkte mit LSA betrachtet werden konnten.

Der Vergleich des Erklärungsgehaltes (62 % differenzierte Modelle, 65 % vereinfachte Modelle) zeigt, dass beide Modelle etwa gleich viel erklärte Reststreuung aufweisen. Dies verdeutlicht zwei wesentliche Aspekte:

- Die Exposition ist der entscheidende Einflussfaktor auf das Unfallgeschehen und eine maßgebliche Information für die Unfallprognose
- Je einheitlicher der Betrachtungsgegenstand (Knotenpunkte unterschiedlicher Verkehrsregelungsart vs. Knotenpunkte mit LSA), desto besser lässt sich das Unfallgeschehen beschreiben, auch wenn nicht alle Informationen vorliegen.

5.4 Kritische Situationen

Es konnten insgesamt 372 Ereignisse georeferenziert werden. Häufig waren dabei Kreuzungen bzw. Einmündungen betroffen, sowie Orte, an denen sich viele Zufußgehende aufhalten. Die meisten Ereignisse wurden für Hauptverkehrsstraßen berichtet, für Wohngebiete oder Nebenstraßen wurden dagegen kaum Ereignisse dokumentiert. Die Teilnehmenden hatten neben der Auswahl einer Kategorie der kritischen Situationen (siehe Abschnitt 3.5) die Möglichkeit, in einem Freitextfeld auch eine „Sonstige kritische Situation“ einzutragen. Als freie Anmerkungen wurden z. B. folgende kritische Situationen geschildert:

- „Beinahe-Zusammenstoß mit entgegenkommendem Fahrrad“,
- „Radfahrer scherte plötzlich aus“,
- „Der Pkw fuhr vor mir recht unentschlossen und wollte nach links in eine Einfahrt biegen, ohne zu blinken. Ich rechnete nicht damit und überholte den Pkw, weil dieser fast stillstand. Plötzlich fuhr er auf gleicher Höhe nach links und stoppte kurz vor mir.“,
- „Ein Radfahrer hat nicht erkannt das die kleine Straße vor der Haupthalle des Hauptbahnhofes für Radfahrer in beide Richtungen freigegeben ist. Somit kam er mit schneller Geschwindigkeit um die Ecke und ich musste scharf bremsen.“,
- „Straße ist beidseitig zugeparkt. Als Radfahrer ist man für Autofahrer ein Hindernis, welches nicht leicht zu überholen ist. Die genervten Autofahrer nutzen jede winzige Gelegenheit, den Radfahrer zu überholen und bedrängen von hinten und überholen knapp. Da ich sogar noch links abbiegen wollte, war der Autofahrer recht ungehalten und gab zu verstehen, dass ich weiter rechts fahren sollte. Ich hatte mich aber zum Linksabbiegen in die Mitte der Fahrbahn bewegt und der Autofahrer fuhr im Kreuzungsbereich recht zügig und knapp an mir dann rechts vorbei... mit entsprechender Gestik natürlich...“,
- „Durch mein Ausweichmanöver durch Fußgänger auf dem Radweg bin ich an einem vorstehenden Pflasterstein hängengeblieben und fast gestürzt.“,
- „Ein Radfahrer bremste abrupt vor mir und stieg ab, um die Straße zu überqueren.“,
- „Hund ist ins Rad gelaufen“,
- „Fußgänger haben einen Hauseingang unachtsam verlassen.“,
- „Rollsplitt auf der Straße“,
- „Nasse Fahrbahn, Hinterrad blockiert + seitlich weggerutscht (Fahrfehler, anderes Fahrrad als meist in der Stadt)“.

Deshalb wurden die gemeldeten Situationen systematisch geprüft und aus den „Sonstigen kritischen Situationen“ bei mindestens fünffacher Nennung einer Situation eine neue Kategorie für diese benannt. Die Lokalisierung der gemeldeten Situationen ist Abbildung 35 zu entnehmen.

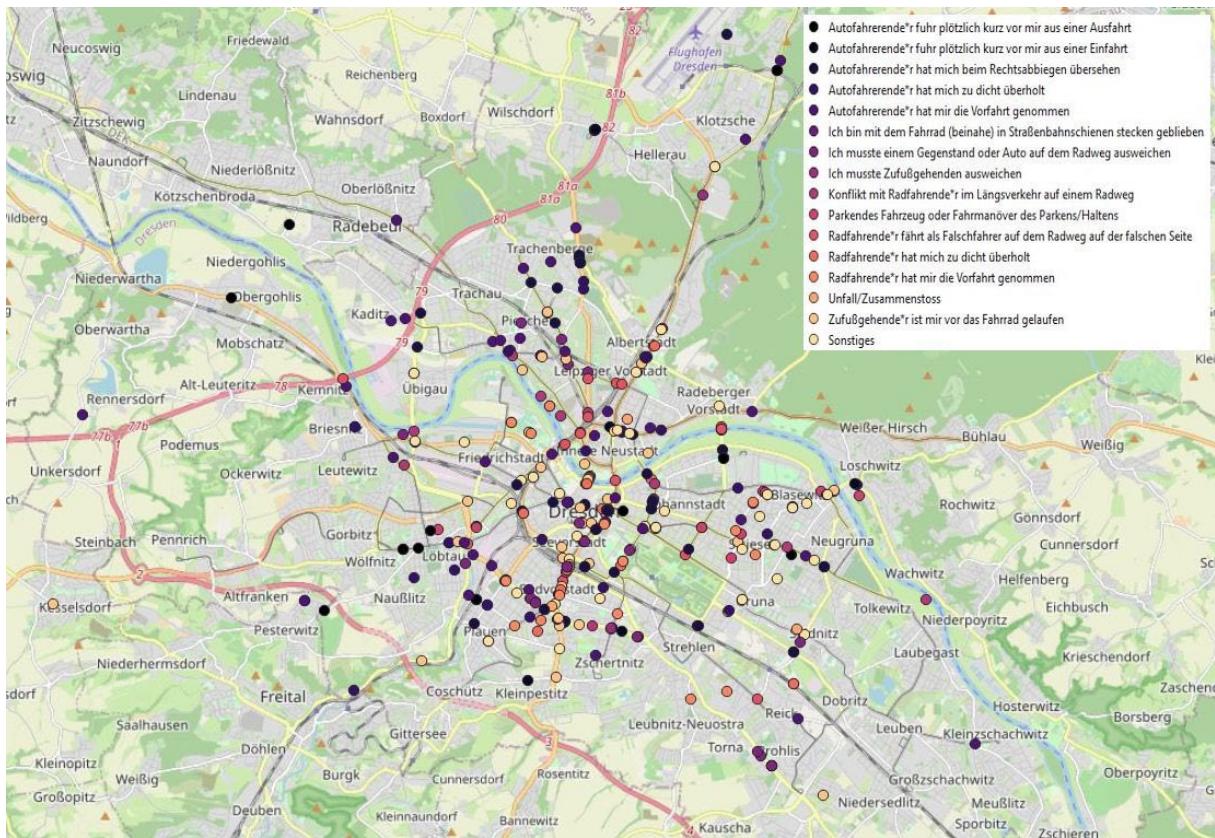


Abbildung 35 Lokalisierung der kritischen Situationen aus Mobilitätstagebuch - RadVerS-Projekt (Kartengrundlage: OpenStreetMap)

Nach der Neuzuordnung wurde am häufigsten die Missachtung der Wartepflicht durch Autofahrende, Zufußgehende die vor das Fahrrad laufen, das Übersehen werden durch rechtsabbiegende Pkw und das zu dichte Überholen durch Pkw berichtet (Abbildung 36). Trotz eingehender Prüfung konnten 41 Situationen keiner der Kategorien zugeordnet werden.



Abbildung 36 Häufigkeiten der kritischen Situationen (Einfachauswahl), $N_{ges} = 372$; aus Mobilitätstagebuch - RadVerS-Projekt.

Anschließend wurden die georeferenzierten Situationen mit dem erhobenen Netz verschnitten. Insgesamt liegen 90 % der gemeldeten Situationen auf Elementen, die in der Untersuchung erfasst wurden. Für die übrigen 10 % können keine Aussage zu Lage und Infrastruktur getroffen werden, da sie außerhalb des Untersuchungsgebietes liegen.

Für die Situationen innerhalb des Untersuchungsgebietes fällt auf, dass knapp 60 % der kritischen Situationen an Knotenpunkten auftraten, wobei dort die am häufigsten genannte Situation, ebenso wie in der gesamten Betrachtung, die Vorfahrtmissachtung durch Autofahrende ist. Am zweithäufigsten wurde benannt, dass die Radfahrenden beim Rechtsabbiegen von Autofahrenden übersehen wurden.

Etwa ein Drittel der Situationen trat an Strecken auf, an denen am häufigsten das „vor das Fahrrad laufen durch Zufußgehende“ und das „zu dichte überholen durch Auto- und Radfahrende“ genannt wird. Interessant ist hierbei, dass das zu dichte Überholen durch ein Auto an Strecken ebenso häufig genannt wurde, wie an Knotenpunkten.

Für die kritischen Situationen in Annäherungsbereichen lässt sich aufgrund der geringen Fallzahl keine Systematik feststellen.

5.5 Zusammenfassung

In den differenzierten Modellen wurden insbesondere Einflussgrößen und deren Wirkung auf das Unfallgeschehen beschrieben. Demgegenüber wurde in den vereinfachten Modellen die Möglichkeit der Unfallvorhersage mit reduzierter Datenverfügbarkeit geprüft und beide Modellformen verglichen. Abschließend wurde die Verteilung der kritischen Situationen analysiert. Nachfolgend sind jeweils die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst.

Aus den differenzierten Streckenmodellen können folgende Erkenntnisse zusammengefasst werden:

- Alle Betrachtungen zeigen einen positiv degressiven Zusammenhang zwischen Radverkehrsstärke und Unfallgeschehen (Koeffizienten: 0,226 - 0,788).
- Für die Fahrbahnbreite existiert ein positiver Zusammenhang zwischen der Unfallanzahl aller Unfälle und Einbiegen/Kreuzen-Unfällen – bei größeren Breiten werden höhere gefahrene Geschwindigkeiten erwartet.
- Ein Zusammenhang zur Radverkehrsführungsform zeigt sich nur für Einbiegen/Kreuzen-Unfälle, bei denen die Führung im Mischverkehr einen negativen Zusammenhang zur Unfallanzahl aufweist.
- Sowohl die Dichte der Haltestellen als auch das Vorhandensein von Gleisen im Mischverkehr zeigt einen positiven Zusammenhang zur Unfallanzahl, insbesondere für Fahrunfälle.
- Sowohl die Dichte der Grundstückszufahrten als auch der Anteil der Länge des ruhenden Verkehrs wirken als infrastrukturelle „Expositionsgrößen“ und zeigen einen positiven Zusammenhang zu Einbiegen/Kreuzen-Unfällen bzw. Unfälle mit dem ruhenden Verkehr.
- Sowohl für Unfälle mit dem ruhenden Verkehr als auch für Längsverkehrsunfälle können keine Aussagen zu infrastrukturellen bzw. betrieblichen Einflüssen auf das Unfallgeschehen getroffen werden.
- Auch eine Bewertung von Breiten von Radverkehrsführungen an Verkehrsstraßen (Breiten der Radverkehrsanlagen bzw. Sicherheitsräume) ist auf Basis der Daten nicht möglich.
- Für die selbstständigen Wege wird ein positiver Zusammenhang von Unfallgeschehen mit der Radverkehrsstärke und der Anlagenbreite festgestellt

Für die Annäherungsbereiche lassen sich die Erkenntnisse wie folgt zusammenfassen:

- Aufgrund der Kollektiveigenschaften wurden keine Modelle für die Annäherungsbereiche gerechnet
- Signifikante Unterschiede in den Unfalldichten zeigen sich für die Differenzierung LSA – Radverkehrsanlage (höchste UD), LSA – Mischverkehrskombination und verkehrszeichengeregelte Knotenpunkte (niedrigste UD)

In den Knotenpunkt- und Zufahrtenmodellen liegen folgende Zusammenhänge vor:

- Alle Betrachtungen zeigen einen positiven Zusammenhang zwischen Radverkehrsstärke und Unfallgeschehen (Koeffizienten: 0,173- 0,709), wobei die Stärke des Zusammenhangs bei den Zufahrtenmodellen geringer ist, wenn differenziertere Verkehrsstärken betrachtet werden.
- Wenn ein Zusammenhang zwischen Unfallanzahl und Kfz- oder Schwerverkehrsstärke vorliegt, ist dieser bei den Knotenpunktmodellen höher als der Koeffizient der Radverkehrsstärke und maximal linear. Bei den Zufahrtenmodellen ist der Koeffizient der Kfz-Verkehrsstärke mindestens doppelt so hoch wie der der Radverkehrsstärke im selben Modell.
- Zufahrten an LSA-geregelten Knotenpunkten zeigen im Vergleich zu teilsignalisierten und verkehrszeichengeregelten Knotenpunkten für alle Unfalltypen und Einbiegen/Kreuzen-Unfälle einen negativen Zusammenhang zur Unfallanzahl (unter Beachtung von Rad- und Kfz-Verkehrsstärken).
- Zufahrten mit Mischverkehrsführungen in der Annäherung haben im Vergleich zu Führungen mit Mischverkehr mit zusätzlichen Angeboten und Führungen auf Radverkehrsanlagen einen negativen Zusammenhang mit Abbiegeunfällen, dennoch zeigt auch das Vorhandensein einer Absetzung einen negativen Zusammenhang zur Unfallanzahl. Diese Effekte wirken in den Knotenpunkt- und Zufahrtenmodellen.
- Eine (teilweise) separate Signalisierung des motorisierten Verkehrs (Links- und Rechtsabbiegeschutz) verringert die Zahl der Abbiegeunfälle.
- Für Einbiegen/Kreuzen-Unfälle werden keine gestalterischen Merkmale signifikant. Lediglich in den Knotenpunktmodellen zeigen spitzwinklige Kreuzungen eine höhere Unfallanzahl
- Wie in den Streckenmodellen zeigt das Vorhandensein von Gleisen einen positiven Zusammenhang zu Fahrunfällen

Die Betrachtung & der Vergleich der vereinfachten Modelle zeigt folgende Zusammenhänge:

- Das vereinfachte Streckenmodell zeigt den Einfluss der Verkehrsstärken sowie der Radverkehrsführungsform. Führungen im Seitenraum werden hier sicherer bewertet als Führungen auf der Fahrbahn
- Für das vereinfachte Knotenpunktmodell entsteht (aufgrund der Datengrundlage) ein reines Expositionsmodell, welches den Einfluss der Verkehrsstärken beschreibt
- Die vereinfachten Modelle weisen einen ähnlichen Erklärungsgehalt auf, wie die differenzierten Modelle – die Abschätzung von Unfallzahlen ist also auch bei reduzierter Datenverfügbarkeit möglich, jedoch bedarf es der Kenntnis zu den Verkehrsstärken

Die Analyse der kritischen Situationen zeigt:

- Die meisten kritischen Situationen wurden zwischen Radfahrenden und Kfz-Führenden gemeldet
- Kritische Situationen traten überwiegen an Knotenpunkten auf, wobei als häufigste gemeldete Situation die Vorfahrtmissachtung durch Kfz-Führende genannt wurde
- Konflikte mit Zufußgehenden wurden vorrangig an Streckenabschnitten berichtet

6 ANALYSE DER ROUTENWAHL

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Analysen beschrieben. Dazu werden zunächst die Eigenschaften der Radfahrenden und der aufgezeichneten Fahrten vorgestellt (deskriptive Statistik), um einen Überblick über die Stichprobeneigenschaften zu erhalten sowie die Ergebnisse der multivariaten Analyse besser einordnen zu können. Die Darstellung der multivariaten Analyseergebnisse (Einflussfaktoren der Routenwahl) schließt daran an. Die genannte Ergebnisbeschreibung erfolgt sowohl für die differenzierten Modelle für Dresden als auch für die vereinfachten Modelle (Dresden, Darmstadt, München). Ein Vergleich der Modelle schließt das Kapitel.

6.1 Differenziertes Modell für Dresden

Deskriptive Statistik

Radfahrende

Insgesamt haben 187 Proband*innen an der Datenerhebung teilgenommen. Nach der Datenaufbereitung konnten jedoch nur von 167 Proband*innen die Routendaten genutzt werden. Etwas mehr als die Hälfte der Teilnehmenden waren Männer ($n = 96$). Der Frauenanteil der Stichprobe liegt bei knapp 43 % ($n = 71$). Die Geschlechterverteilung ist in Abbildung 37 dargestellt. Die Verteilung der Fahrten über die Geschlechter entspricht nahezu der Geschlechterverteilung der Stichprobe. Rund 56,8% der Fahrten wurden von Männern erbracht und 43,2% von Frauen. Männer und Frauen nutzen das Rad dementsprechend ähnlich häufig.

Die Proband*innen haben im Rahmen der Erhebung ein Geburtsjahr angegeben, aus dem jeweils das Alter berechnet wurde. Das Durchschnittsalter der Radfahrenden in der Stichprobe beträgt 44,3 Jahre (Mittel) bzw. 45,0 Jahre (Median). Die jüngsten Teilnehmenden waren 16 Jahre alt. Der älteste Proband war 88 Jahre alt. Dadurch ergibt sich eine Streuung des Alters von 72 Jahren. Die Standardabweichung beträgt 14,5 Jahre. Die

Altersverteilung der Stichprobe in Altersklassen ist Abbildung 38 dargestellt.

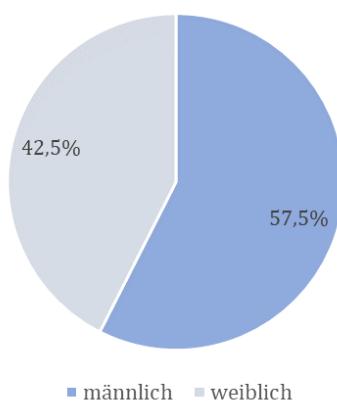


Abbildung 37 Geschlechterverteilung der Stichprobe (n = 167)

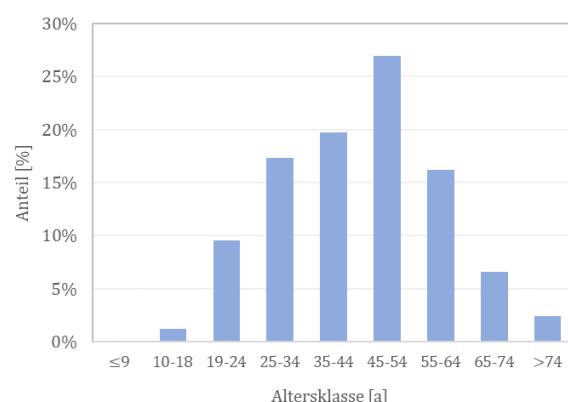


Abbildung 38 Altersverteilung der Stichprobe (n = 167)

Im Rahmen des Projekts RadVerS wurden die Radfahrenden vier unterschiedliche Radfahr-Typen (Ambitionierte, Passioniert, Funktionelle, Pragmatiker) zugeordnet. Die Proband*innen innerhalb der Stichprobe verteilen sich leicht unterschiedlich auf diese vier Typen. 34 der Proband*innen (20%) wurden den „Ambitionierten“ zugeordnet und 51 Teilnehmende (31%) den „Passionierten“. 38 Radfahrer*innen (23%) wurden als „Funktionelle“ klassifiziert und 44 den „Pragmatikern“ zugeordnet (26%). Die Verteilung der Radfahr-Typen ist in Abbildung 39 dargestellt.

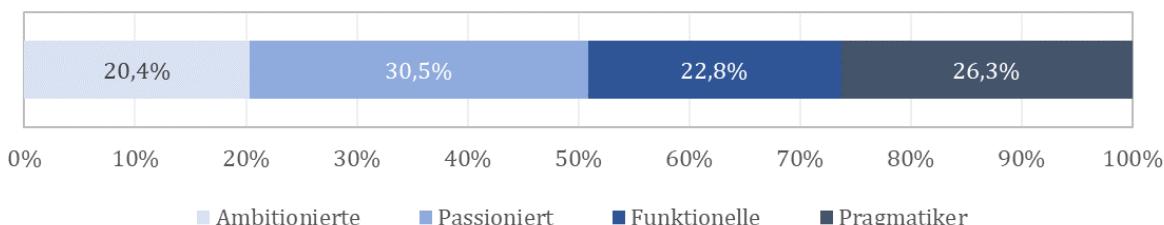


Abbildung 39 Radfahr-Typen innerhalb der Stichprobe (n = 167)

Wegezwecke

Für 3.560 Fahrten im genutzten Datensatz wurde von den Radfahrenden ein Wegezweck angegeben. Aufgrund der Erhebungsart und der genutzten App standen lediglich die drei Wegezwecke „Arbeit“, „Einkauf“ und „Freizeit“ zur Auswahl. Mehr als die Hälfte der aufgezeichneten Fahrten (57%) im Datensatz waren Arbeitswege. Bei nur etwa 5% der Fahrten wurden Besorgungen (Einkauf) erledigt und etwas mehr als ein Drittel der Fahrten (38%) wurde zu Freizeitzwecken durchgeführt (siehe Abbildung 40).

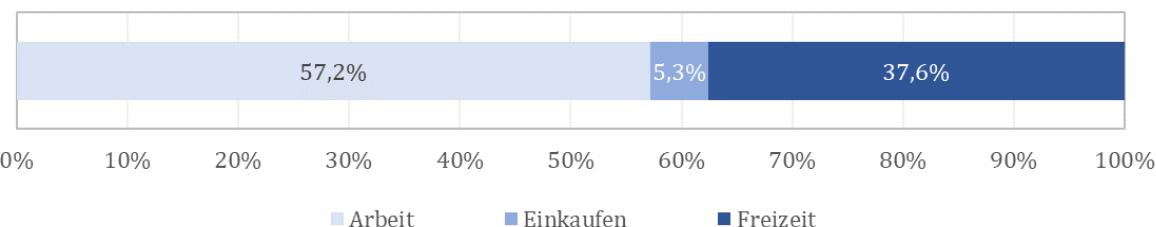


Abbildung 40 Anteile der Wegezwecke an den Fahrten (n = 3.560)

Fahrten

Bei den knapp 4.000 im Datensatz vorliegenden Fahrten wurden insgesamt 17.663 km zurückgelegt. Dies kommt angesichts der Gesamtlänge des in Dresden vorhandenen Radwegenetzes von ca. 420 km bzw. eines Straßennetzes von knapp 1.500 km (Landeshauptstadt Dresden 2020) einer beträchtlichen Netzabdeckung gleich. In Abbildung 41 sind die auf das Verkehrsnetz projizierten Fahrten (Verkehrsmengen) dargestellt. Sie vermittelt einen Eindruck der Abdeckung des Dresdener Verkehrsnetzes. Es wird deutlich, dass nahezu das gesamte innerstädtische Verkehrsnetz von den Radfahrer*innen genutzt wurde. Die Fahrten sind dabei unterschiedlich im Verkehrsnetz verteilt. Stark frequentierte Streckenabschnitte befinden sich vor allem im Hauptverkehrsnetz und auf den Rad-Hauptrouten wie bspw. auf dem Elberadweg oder im Großen Garten. Strecken im Nebennetz sind weniger stark frequentiert.

Die **Fahrtweiten** der zurückgelegten Routen sind sehr unterschiedlich ausgeprägt. Die durchschnittliche Fahrtweite der aufgezeichneten Routen beträgt 4,4 km (Mittelwert) bzw. 3,0 km (Median). Es wurden jedoch auch sehr kurze Fahrten (mindestens 300 m) sowie sehr lange Fahrten (maximal 60,4 km) zurückgelegt. Dies ergibt eine Streuung von 60,1 km. Die Fahrtweitenverteilung der aufgezeichneten Radfahrten ist in Abbildung 42 dargestellt. Aus der dargestellten Fahrtweitenverteilung wird deutlich, dass die meisten Fahrten auf kurzen Distanzen zurückgelegt wurden. Am häufigsten wurden Fahrten mit einer Länge zwischen ein und zwei Kilometern zurückgelegt. Rund zwei Drittel aller Fahrten (66,8%) sind kürzer als 5 km. Fast 90 % aller Fahrten sind nicht länger als zehn Kilometer und nur bei etwa 2,1 % aller Fahrten wird eine Fahrtweite von mehr als 15 km erreicht.

Damit die gewählten Routen besser eingeschätzt bzw. interpretiert werden können, werden sie im Folgenden jeweils mit den Eigenschaften der nicht gewählten Alternativen verglichen und ins Verhältnis gesetzt.

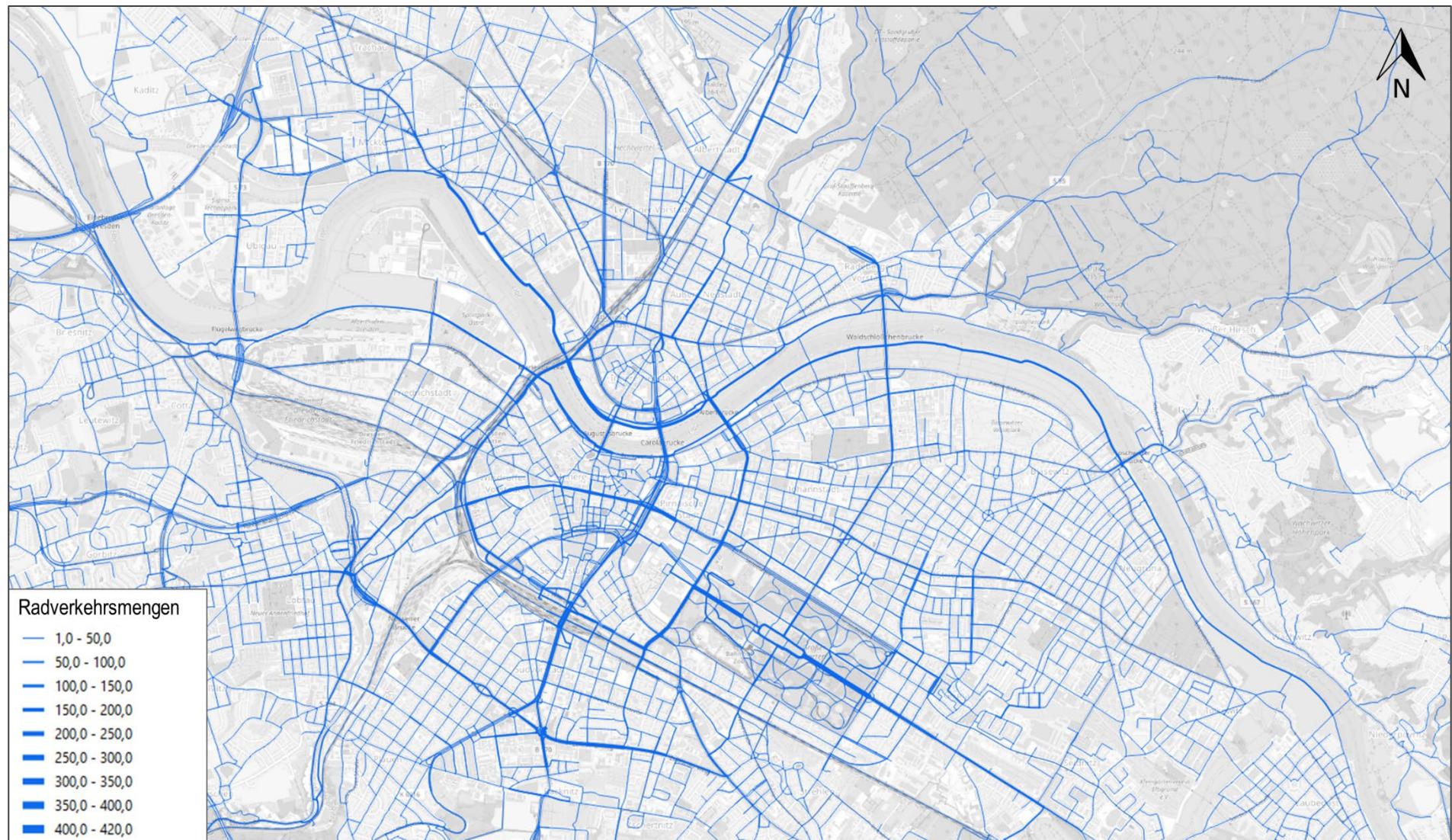


Abbildung 41 Radverkehrsmengen in Dresden (N=3.988 Fahrten)

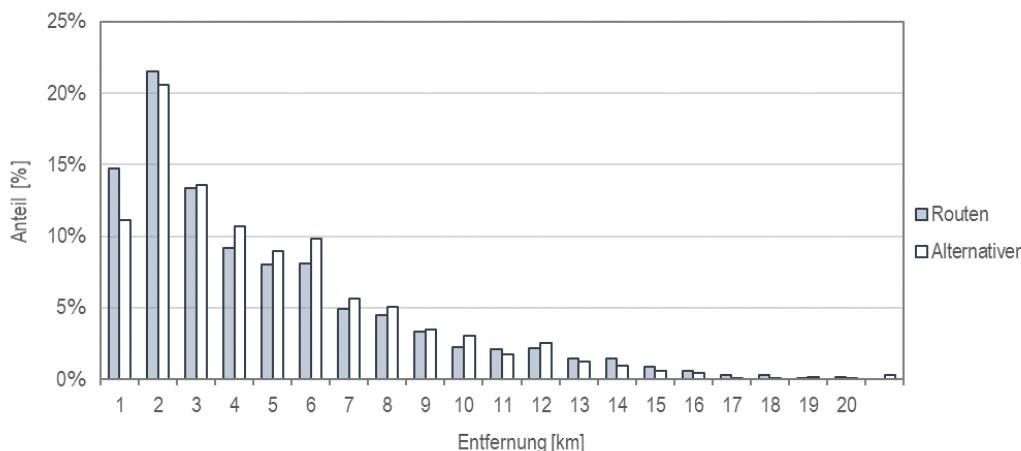


Abbildung 42 Fahrtweitenverteilung

Der Vergleich der Fahrtweitenverteilung zeigt auf, dass die gewählten Routen im Durchschnitt ein wenig kürzer sind als die nicht gewählten Alternativen. Während die durchschnittliche Distanz der gewählten Routen 3,0 km (Median) bzw. 4,4 km (Mittelwert) beträgt, liegt die durchschnittliche Distanz der nicht gewählten Alternativen bei 3,4 km (Median) bzw. 4,9 km (Mittelwert). Die Verteilung der absoluten Häufigkeit in Entfernungsklassen (siehe Abbildung 42) zeigt, dass die Verteilung der Fahrtweiten der Routen und Alternativen leicht unterschiedlich ausfällt. Bei den gewählten Routen sind deutlich mehr Fahrten bis drei Kilometer Länge zu beobachten – bei längeren Fahrten kehrt sich dies um. Das lässt zunächst darauf schließen, dass die Proband*innen auf Relationen mit geringeren räumlichen Distanzen eher direkte und kurze Routen gewählt haben. Dass die Proband*innen jedoch nicht immer die kürzeste Route wählten, wird auch durch den berechneten Best-Weg-Faktor bestätigt. Nur bei rund der Hälfte der Fahrten (52,7%) wählten die Proband*innen die kürzeste Route.

Auf den gewählten Routen beträgt die **maximale Längsneigung**, die die Radfahrenden auf einem Teilstück entlang einer Route zu überwinden hatten, im Durchschnitt rund 6,77 % (Mittelwert) bzw. 5,29 % (Median). Es konnte eine maximale Längsneigung von Streckenabschnitten von rund 112 % beobachtet werden. Es handelt sich dabei jedoch um Einzelfälle (99,9 % aller Werte übersteigen eine max. Längsneigung von 45 % nicht). Die nicht gewählten Alternativen weisen durchschnittlich leicht höhere Werte auf. Im Durchschnitt beträgt die maximale Längsneigung 9,23 % (Mittelwert) bzw. 6,58 % (Median). Minima und Maxima unterscheiden sich im Vergleich zu den gewählten Routen jedoch nicht. Aus den Kennzahlen lässt sich resümieren, dass die gewählten Routen im Durchschnitt geringere maximale Längsneigungen auf Streckenabschnitten entlang der Route aufweisen. Die Radfahrenden wählten scheinbar eher Routen, auf denen die maximal vorhandene Längsneigung geringer ausfiel.

Tabelle 35 Längsneigungen im Vergleich

	Maximal Längsneigung		Streckenanteil mit Längsneigung < 2%	
	Routen	Alternativen	Routen	Alternativen
Minimum	-	-	-	0,05
Median	5,29	6,58	0,89	0,86
Mittel	6,77	9,23	0,85	0,83
Maximum	112,00	112,00	1,00	1,00
Standardabw.	6,21	8,74	0,14	0,14
Streuung	112,00	112,00	1,00	0,95

Die Betrachtung der Anteile mit einer **Längsneigungen < 2 %** entlang der Routen offenbart ebenfalls Unterschiede zwischen gewählten Routen und ihren Alternativen. Es fällt auf, dass die durchschnittlichen Anteile von Streckenabschnitten mit geringen Längsneigungen auf den gewählten Routen leicht höher ausfallen. So liegt der Anteil von Strecken mit einer Längsneigung < 2 % entlang der Routen im Mittel bei ca. 85 %. Auf den Alternativrouten besitzen im Mittel rund 83 % der Strecken eine Längsneigung von weniger als 2 %. Es lässt sich zusammenfassen, dass die gewählten Routen im Durchschnitt geringere Längsneigungen von

Streckenabschnitten entlang der Route aufweisen als die nicht gewählten Alternativen. Die Unterschiede treten bei der maximalen Längsneigung besonders deutlich hervor. Dies könnte auf eine Präferenz der Radfahrenden hinweisen, auf Relationen, bei denen Höhenunterschiede überwunden werden müssen, Routen mit geringen Längsneigungen zu bevorzugen.

Die Existenz von **Radverkehrsinfrastruktur** scheint einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl einer Route auszuüben. Entlang der gewählten Routen liegen die durchschnittlichen Anteile der Strecken, die über eine Radverkehrsinfrastruktur oder markierte Schutz- und Radfahrstreifen verfügen, deutlich über denen der nicht gewählten Alternativen. Auf den gewählten Routen waren die Radfahrenden im Mittel zu rund 29 % (Mittelwert) bzw. 28 % (Median) auf Strecken unterwegs, auf denen Radverkehrsinfrastruktur vorhanden war. Der Anteil ist bei den nicht gewählten Alternativen mit rund 15 % (Mittelwert) bzw. 12 % (Median) nur etwa halb so groß. Abbildung 43 verdeutlicht die Streuung der Anteile für die Routen und Alternativen und unterstreicht die Tendenz zur Nutzung von Radverkehrsinfrastruktur durch die Radfahrenden. Es wird jedoch auch deutlich, dass sowohl Routen als auch Alternativen existieren, bei denen keine Radverkehrsinfrastruktur vorhanden sind bzw. genutzt wurden (minimaler Anteil jeweils 0 %). Es konnten jedoch auch Routen und Alternativen beobachtet werden, auf denen durchgängig Radverkehrsinfrastruktur bzw. markierte Radfahr- bzw. Schutzstreifen genutzt wurden (Maximum jeweils 100 %). Auch wenn aus den Ergebnissen der deskriptiven Analyse keine Kausalitäten abgeleitet werden können, so deuten die Ergebnisse dennoch auf einen Zusammenhang zwischen der Führungsform und der Routenwahl hin, weil die gewählten Routen deutlich höhere Anteile von Radverkehrsinfrastruktur beinhalten.

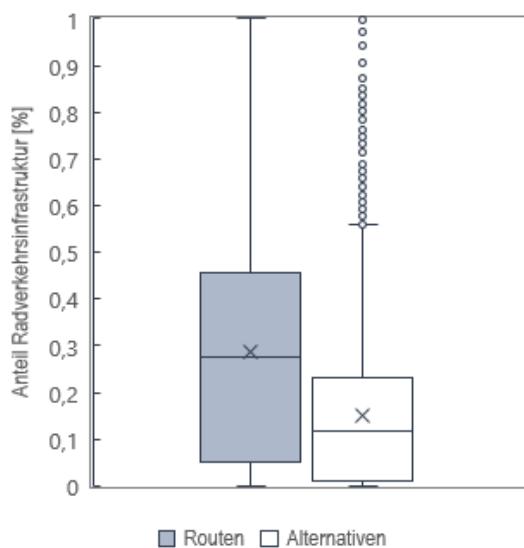


Abbildung 43 Anteile der Routen mit Radverkehrsinfrastruktur

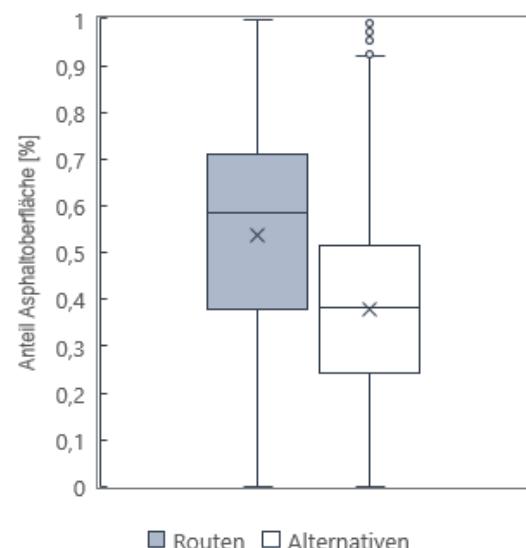


Abbildung 44 Anteile der Routen mit Asphaltoberfläche

Die **Oberflächenqualität** unterscheidet sich ebenfalls zwischen den gewählten Routen und den nicht gewählten Alternativen. Entlang der gewählten Routen besitzen mit rund 54 % (Mittelwert) bzw. 59 % (Median) im Durchschnitt deutlich mehr Streckenabschnitte eine asphaltierte Oberfläche als entlang der nicht gewählten Alternativen, deren durchschnittlicher Anteil bei rund 15 % (Mittelwert) bzw. 12 % (Median) liegt. Es existieren insgesamt sowohl Routen als auch Alternativen, deren Oberfläche zu 100 % (Max.) oder 0 % (Min.) über eine Asphaltdecke verfügen. Der Vergleich der bereits genannten mittleren Anteile sowie die in Abbildung 44 dargestellten Verteilung der Merkmalsausprägungen verdeutlicht jedoch, dass sich die von den Radfahrenden gewählten Wege bzgl. der Oberflächenbeschaffenheit insgesamt deutlich unterscheiden. Die Ergebnisse der deskriptiven Auswertung ergeben für die vorliegende Variable ein plausibles, aber noch nicht vollständiges Bild. Routen mit einer guten Oberflächenqualität (Asphalt) wurden bei der Wahl der Route offensichtlich bevorzugt.

Die Betrachtung des (längs angeordneten) **ruhenden Verkehrs** offenbart kaum Unterschiede zwischen Routen und Alternativen (siehe Abbildung 45). Im Mittel sind die Anteile von längs angeordnetem ruhendem Verkehr

entlang der Routen und Alternativen mit rund 24 % (Routen) und 22 % (Alternativen) in etwa gleich groß. Die Werte des Medians zeigen mit 19 % faktisch keine Unterschiede zwischen Routen und Alternativen auf. Auf eine Vermeidung von längs angeordnetem ruhendem Verkehr lässt sich auf Basis der deskriptiven Statistik demzufolge nicht schließen.

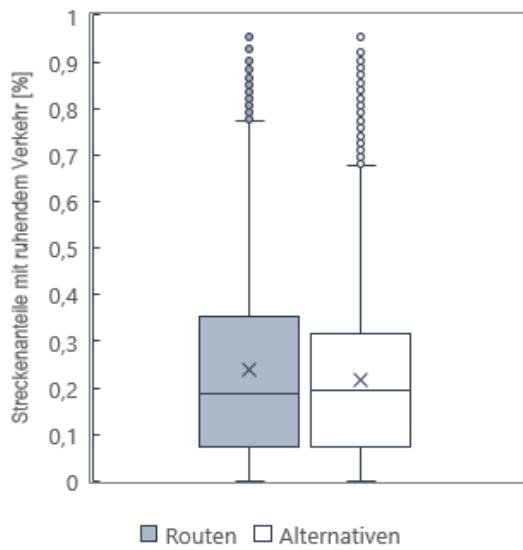


Abbildung 45 Routenanteile mit ruhendem Verkehr

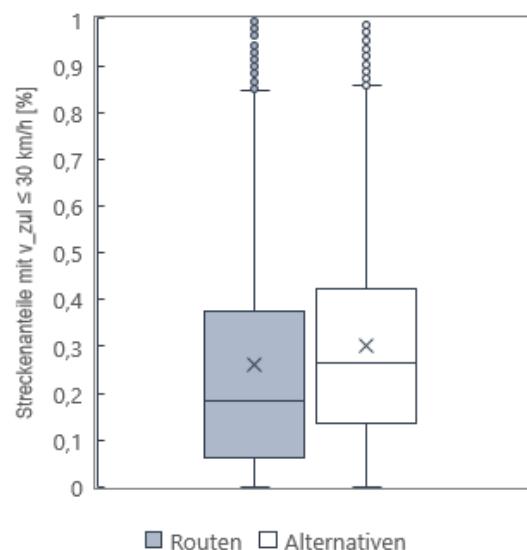


Abbildung 46 Routenanteile mit einer max. zulässigen Höchstgeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs ≤ 30km/h

Die Betrachtung der maximal zulässigen **Höchstgeschwindigkeiten des motorisierten Verkehrs** (MV) entlang der Routen und Alternativen erzeugt ebenfalls ein Bild, das mit bloßem Blick auf die Anteile der vorhandenen Variablen nicht intuitiv erklärbar scheint. Entlang der gewählten Routen fällt der Streckenanteil der Routen, auf denen für den MV eine maximal zulässige Geschwindigkeit von ≤ 30 km/h gilt, im Durchschnitt geringer aus als auf den nicht gewählten Alternativen (siehe Abbildung 46). Auf den gewählten Routen waren die Radfahrenden im Mittel zu 26 % (Mittelwert) bzw. 18 % (Median) auf Strecken unterwegs, auf denen für den Kfz-Verkehr eine Maximalgeschwindigkeit von 30 km/h zulässig ist. Dieser Anteil ist entlang der nicht gewählten Alternativen mit rund 30 % (Mittelwert) bzw. 26 % (Median) deutlich höher. Die Betrachtung dieser Kennzahl ließe für diese Variable vermuten, dass die Radfahrenden eher Routen bevorzugen, entlang derer der MV höhere Geschwindigkeiten realisieren darf. Die Verteilung der Merkmalsausprägungen sollte inhaltlich jedoch nicht so interpretiert werden. Die kausalen Zusammenhänge gehen erst aus der multivariaten Analyse hervor.

Entlang der gewählten Routen ist mit ca. 6.330 Kfz/Tag (Mittelwert) bzw. 5.080 Kfz/Tag (Median) ist im Durchschnitt eine relativ hohe **Kraftfahrzeugverkehrsstärke** zu beobachten. Sie ist im Gegensatz zu den nicht gewählten Alternativen sogar leicht erhöht. Bei diesen beträgt der DTV im Durchschnitt rund 6.040 Kfz/Tag (Mittelwert) bzw. 5.190 Kfz/Tag (Median). Aus den Werten ergibt sich eine Differenz von rund 290 Kfz/Tag (Mittelwert) bzw. 110 Kfz/Tag (Median). Die Verteilung der Werte ist in Abbildung 47 visualisiert. Die Betrachtung des mittleren DTV entlang der Routen und Alternativen zeigt auf, dass entlang der gewählten Routen mehr motorisierter Verkehr vorhanden war. Die deskriptive Auswertung zeigt jedoch ebenso, dass die Unterschiede zwischen den von den Radfahrenden gewählten Routen und den nicht gewählten Alternativen nicht sonderlich stark ausgeprägt sind. Inwiefern sich ein vergleichsweise höherer DTV tatsächlich positiv oder negativ auf die Wahl einer Route auswirkt kann erst mit der multivariaten Analyse untersucht werden.

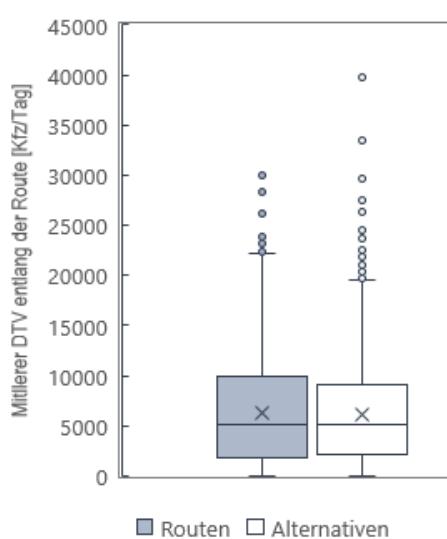


Abbildung 47 Mittlerer DTV-Kfz entlang der Routen

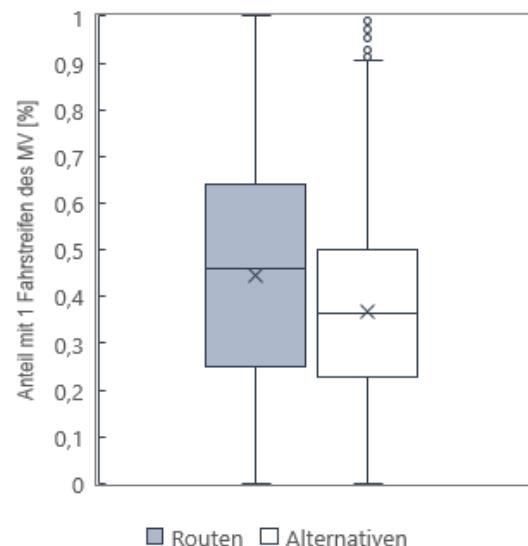


Abbildung 48 Routenanteile mit Richtungsfahrstreifen des MV 1

Die Betrachtung der **Fahrstreifenanzahl** des motorisierten Verkehrs (MV) erzeugt ein differenziertes Bild, das bei der Betrachtung der vorhandenen Variable intuitiv erklärbar scheint. Es lässt sich festhalten, dass der durchschnittliche Anteil von Streckenabschnitten mit nur einem Richtungsfahrstreifen für den motorisierten Verkehr entlang der gewählten Routen höher ausfällt als auf den nicht gewählten Alternativen. Auf den gewählten Routen waren die Radfahrenden im Mittel zu 45 % (Mittelwert) bzw. 46 % (Median) auf Strecken unterwegs, auf denen für den MV nur ein Richtungsfahrstreifen zur Verfügung steht. Dieser Anteil ist entlang der nicht gewählten Alternativen mit rund 37 % (Mittelwert und Median) deutlich kleiner. Es existieren sowohl Routen als auch Alternativen, entlang derer ausschließlich ein Richtungsfahrstreifen für den MV vorhanden ist (Max = 100 % bzw. 99%). Die gleiche Aussage kann für Routen getätigt werden, entlang derer der Anteil von Strecken mit einem Richtungsfahrstreifen gleich Null ist (Min = 0 %). Die Betrachtung der Verteilung (siehe Abbildung 48) verdeutlicht, dass die Variable entlang der Alternativen eine geringere Streuung aufweist und entlang der Routen gleichmäßiger verteilt ist. Die Ergebnisse der deskriptiven Auswertung ergeben für die vorliegende Variable auf den ersten Blick ein relativ eindeutiges Bild: die Radfahrenden bevorzugten offenbar Routen, auf denen nur ein Richtungsfahrstreifen für den MV vorhanden war. Die kausalen Zusammenhänge gehen erst aus der multivariaten Analyse hervor.

Bei der Betrachtung der **Radverkehrsstärken** sind deutliche Unterschiede zwischen den gewählten Routen und den nicht gewählten Alternativen zu beobachten. So waren entlang der gewählten Routen deutlich mehr Radfahrende unterwegs als auf den nicht gewählten Alternativen. Die Proband*innen waren auf den gewählten Routen im Durchschnitt zu rund 41 % (Mittelwert) bzw. 42 % (Median) auf Streckenabschnitten unterwegs, auf denen die Radverkehrsstärke > 500 Radfahrende/Tag war. Dieser Anteil liegt bei den Routenalternativen mit einem Wert von rund 22 % (Mittelwert) bzw. 17 % (Median) deutlich niedriger. Die Verteilung der durchschnittlichen Anteile ist in Abbildung 49 gegenübergestellt. Sie verdeutlicht, dass, obwohl Streuung und Extremwerte (Minima und Maxima) ähnlich ausgeprägt sind, die Verteilung der Variable sehr unterschiedlich ausfällt. Es lässt sich zusammenfassen, dass entlang der gewählten Routen im Mittel deutlich mehr Radfahrende unterwegs waren als auf den nicht gewählten Alternativen. Dies könnte auf eine Präferenz der Radfahrenden hinweisen, Routen mit mehr Radverkehr zu bevorzugen.

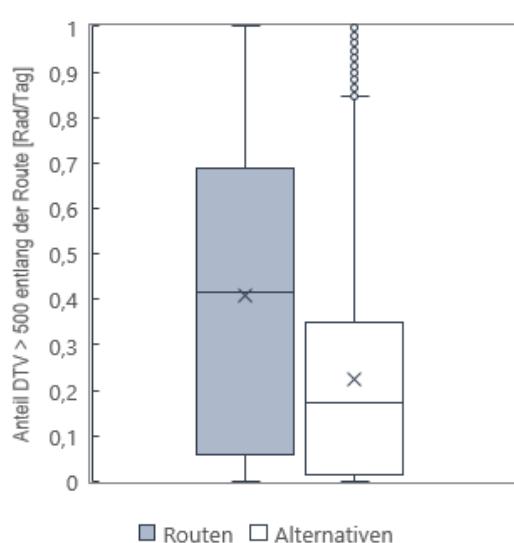


Abbildung 49 DTV-Rad > 500 [R/d] entlang der Routen

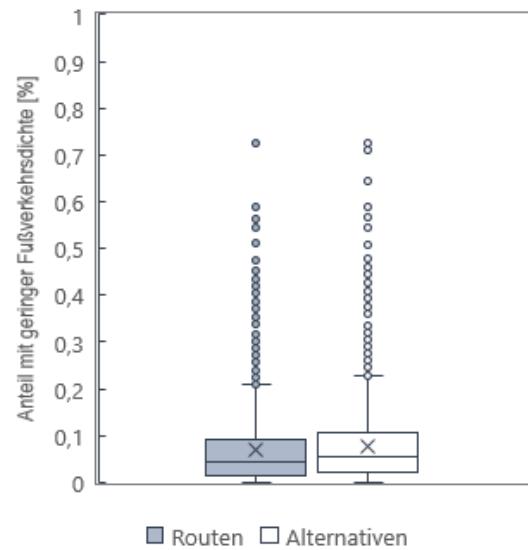


Abbildung 50 Streckenanteile mit geringer Fußverkehrsdichte [%]

Die Betrachtung der **Fußverkehrsdichte** zeigt auf den ersten Blick keine deutlichen Unterschiede zwischen den gewählten Routen und ihren Alternativen. Abbildung 50 verdeutlicht, dass die Ausprägung der Variable sehr ähnlich ist. Die Streckenanteile der Routen, auf denen eine geringe Fußverkehrsdichte vorherrschte, beträgt im Durchschnitt nur rund 7 % (Mittelwert) bzw. 4 % (Median) und fällt damit generell sehr gering aus. Die durchschnittlichen Anteile entlang der Alternativen fallen mit rund 8 % (Mittelwert) bzw. 6 % (Median) ebenfalls sehr gering aus. Trotz der geringen Werte sind, wenn auch nur sehr schwach, Unterschiede zwischen den Routen und Alternativen festzustellen. Es scheint eine leichte Tendenz der Radfahrenden zu existieren, Routen mit geringeren Fußverkehrsdichten zu präferieren. Inwiefern die geringen Unterschiede tatsächlich einen Einfluss auf die Routenwahl ausüben, geht aus der multivariaten Analyse hervor.

Die Betrachtung der auf den Routen durchfahrenen **Knotenpunkte** und deren Art der Regelung zeigt im Vergleich zu den Alternativen geringe Unterschiede auf. Entlang der gewählten Routen passierten die Radfahrenden im Durchschnitt rund 3,1 (Mittelwert) bzw. 2,9 (Median) Knotenpunkte je Streckenkilometer, die „rechts-vor-links“ geregelt sind. Mit ca. 3,0 (Mittelwert) bzw. 2,8 (Median) Knotenpunkten je Streckenkilometer fällt der Wert für diese Art der Regelung entlang der Alternativen unwe sentlich höher aus. Es existieren sowohl Routen als auch Alternativen, entlang derer keine rechts-vor-links geregelten Knotenpunkte passiert wurden (Min = 0 KP/km). Als Maximalwert werden jeweils rund 11,6 Knotenpunkte je Streckenkilometer erreicht – ein Wert, der sehr hoch erscheint und vermutlich bei sehr kurzen Fahrtweiten entsteht. Dass die Unterschiede insgesamt schwach ausgeprägt sind, zeigt auch die Verteilung der Merkmalsausprägung (siehe Abbildung 51). Bei der Betrachtung von Kontenpunkten, die durch eine LSA geregelt sind, ergibt sich ein umgekehrtes Muster. Die von den Radfahrenden gewählten Routen beinhalteten im Durchschnitt mit 0,9 (Mittelwert) bzw. 0,8 (Median) LSA-Knotenpunkten je Streckenkilometer mehr Knotenpunkte dieses Typs als die nicht gewählten Alternativen. Entlang der Alternativen wurden im Durchschnitt nur rund 0,7 (Mittelwert und Median) LSA geregelte Knotenpunkte je Streckenkilometer durchfahren. Diese moderaten Unterschiede spiegeln sich nur leicht in der Verteilung der Merkmalsausprägung aller Routen und Alternativen wider (siehe Abbildung 52). Eindeutige Tendenzen oder Aussagen lassen sich, ebenso wie bei den Rechts-vor-links geregelten Knotenpunkten, an dieser Stelle noch nicht tätigen. Die Ergebnisse der deskriptiven Auswertung deuten insgesamt zunächst auf eine leichte Tendenz der Radfahrenden hin, Knotenpunkte mit LSA-Regelung gegenüber rechts-vor-links geregelten Knotenpunkten zu bevorzugen.

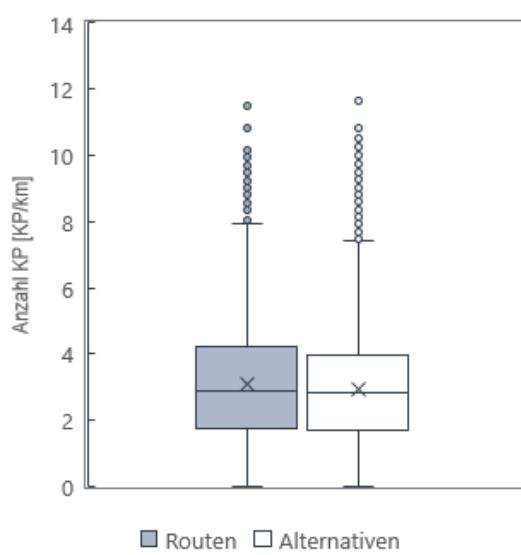


Abbildung 51 Häufigkeit „rvi“ geregelter Knotenpunkte

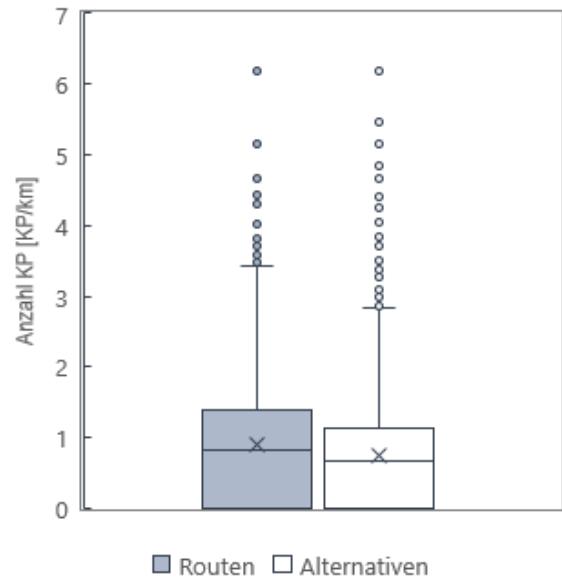


Abbildung 52 Häufigkeit kritischer Knotenpunkte LSA-geregelter

Die deskriptive Auswertung der **Unfallhäufigkeit** und der **kritischen Situationen** weist auf leichte Unterschiede zwischen Routen und Alternativen hin. Die von den Radfahrenden gewählten Routen passieren im Durchschnitt rund 102 (Mittelwert) bzw. 67 (Median) Unfallpunkte entlang ihrer Route. Dieser Wert fällt mit ca. 87 (Mittelwert) bzw. 58 (Median) Unfällen entlang der nicht gewählten Alternativen rund 13-15 % geringer aus. Es existieren sowohl Routen als auch Alternativen, entlang derer keine Unfälle stattgefunden haben, wodurch die Unfallhäufigkeit ein Minimum von Null erreicht. Als Maximalwert wurden knapp 700 (Routen) bzw. 600 (Alternativen) Unfälle erreicht. Dieser sehr hohe Wert ist vermutlich auf eine sehr lange Fahrt (siehe Abschnitt Fahrtweiten) zurückzuführen.

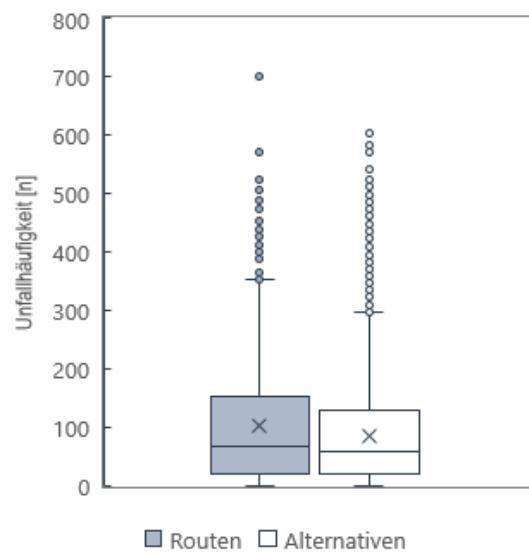


Abbildung 53 Unfallhäufigkeit

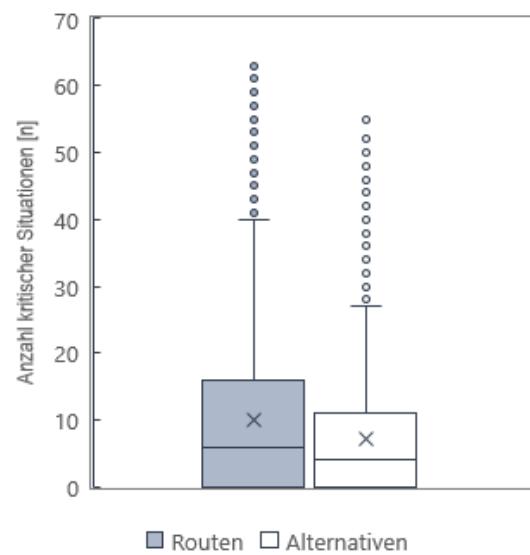


Abbildung 54 Häufigkeit kritischer Situationen

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung von Orten mit kritischen Situationen. Die von den Radfahrenden gewählten Routen beinhalteten insgesamt mehr Punkte, an denen kritische Situationen berichtet wurden, als auf den Routenalternativen. So lag die durchschnittliche Anzahl von derartigen Punkten mit 10 (Mittelwert) bzw. 6 (Median) etwa 40-50 % über dem Wert der Alternativen, die im Durchschnitt rund 7 (Mittelwert) bzw. 4 (Median) Punkten kritischer Situationen aufwiesen. Die Betrachtung der Werteverteilung (siehe Abbildung 54) unterstreicht

zunächst den durch die Kennwerte gewonnenen Eindruck. Es lassen sich jedoch lediglich leichte Tendenzen bzgl. der Variablenausprägung erkennen. Dass die gewählten Routen durchschnittlich mehr Unfallpunkte und Orte mit berichteten kritischen Situationen passieren, muss nicht zwangsläufig auf einen positiven Einfluss der vorliegenden Variable zurückzuführen sein. Es ist möglich, dass andere Variablen die Präferenzen der Radfahrenden beeinflussen und bspw. Strecken mit hoher Unfallhäufigkeit genutzt werden, weil andere Faktoren diesen „Nachteil“ überkompensieren. Die Ergebnisse der deskriptiven Auswertung ergeben für die vorliegende Variable also ein eher fragmentiertes Bild, zeigen jedoch eine leichte Tendenz zur Nutzung von Routen mit höherer Unfallhäufigkeit und mehr Punkten kritischer Situationen auf.

Die Betrachtung der **Umfeldnutzung „Wohngebiet“** entlang der Route lässt nur relativ geringe Unterschiede zwischen den gewählten Routen und ihren Alternativen erkennen. Es kann zunächst festgehalten werden, dass insgesamt ein Großteil der Routen und Alternativen entlang von Wohn- und Grünflächen verläuft (siehe Abbildung 55). Im Mittel machen diese beiden Nutzungsarten zusammen mehr als die Hälfte der Flächennutzung entlang der Routen und Alternativen aus (jeweils 51 %). Die beiden Flächennutzungen sind demnach die dominierenden Nutzungsarten entlang der Routen/Alternativen in der Stadt (Vgl. ca. 49 % für alle sonstigen vier Nutzungsarten zusammen). Entlang der gewählten Routen liegt der durchschnittliche Anteil der Umfeldnutzung „Wohnen“ bei rund 33 % (Mittelwert) bzw. 29 % (Median). Mit einem durchschnittlichen Anteil von 35 % (Mittelwert) bzw. 33 % (Median) führen die Alternativen zu etwas größeren Anteilen durch Wohngebiete. Sowohl bei den gewählten Routen als auch bei den Alternativen existieren jedoch Routen, deren Strecken nahezu vollständig (Maximum jeweils ca. 97-99 %) oder überhaupt nicht (Minimum jeweils 0 %) durch Wohngebiete verlaufen. Die Unterschiede fallen insgesamt jedoch relativ gering aus.

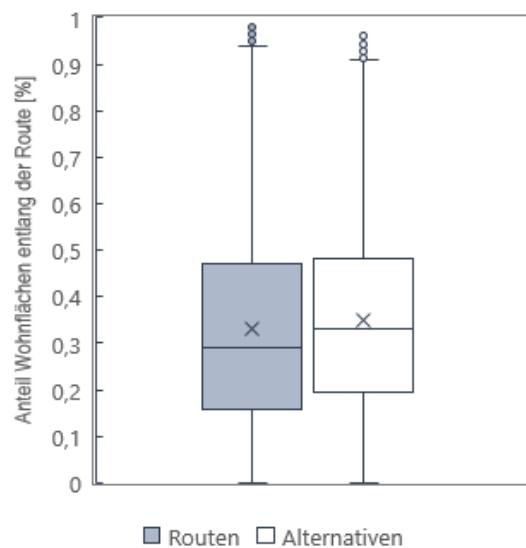


Abbildung 55
Verteilung der
„Wohnflächen“
Umfeldnutzung

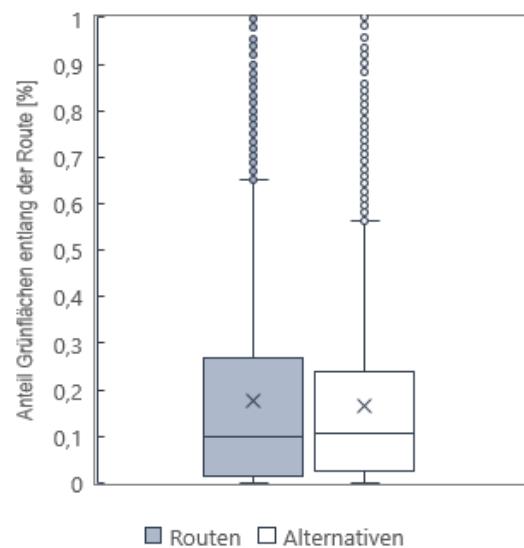


Abbildung 56
Verteilung der
„Grünflächen“
Umfeldnutzung

Die Betrachtung der **Umfeldnutzung „Grünflächen“** entlang der Route offenbart eine leicht andere Verteilung. Die Streckanteile mit Grünflächen waren entlang der gewählten Routen mit 18 % (Mittelwert) bzw. 10 % (Median) im Durchschnitt etwas höher als entlang der Alternativen, bei denen durchschnittlich rund 16 % (Mittelwert) bzw. 11 % (Median) der Route entlang von Grünflächen verliefen. Minimale und Maximale Anteile sind für Routen und Alternativen identisch (Min = 0 %; Max = 100 %). Die Betrachtung der Verteilung lässt neben den insgesamt eher geringen Unterschieden der Kennwerte (Min, Max, Mittel, Median) auch Tendenz zu höheren Werten Merkmalsausprägung entlang der Routen erkennen (siehe Abbildung 56). Es lässt sich insgesamt festhalten, dass die gewählten Routen im Mittel länger an Grünflächen vorbeiführten und etwas weniger häufig durch Wohngebiete verliefen. Dies könnte auf eine Präferenz der Radfahrenden hinweisen eher Routen durch Parks, Wälder usw. zu wählen und Wohngebiete zu meiden.

Zusammenfassung

Die deskriptive Auswertung der Merkmale kann wie folgt zusammengefasst werden: Die Radfahrenden wählten eher kürzere Routen mit geringeren Längsneigungen. Sie nutzten auf ihren Wegen vor allem Routen, auf deren Strecken möglichst Radverkehrsinfrastruktur vorhanden war. Darüber hinaus wurden die Routen genutzt, auf denen auch möglichst andere Radfahrende unterwegs waren. Die gewählten Routen verliefen weniger häufig entlang von Straßen mit geringen zulässigen Geschwindigkeiten des motorisierten Verkehrs. Eine klare Tendenz zur Meidung oder Bevorzugung von Streckenabschnitten mit einem höheren bzw. niedrigeren DTV_{Kfz} ließ sich in der deskriptiven Auswertung nicht erkennen. Demgegenüber nutzten sie eher Routen mit nur einem Richtungsfahrstreifen für den motorisierten Verkehr. Die Radfahrenden waren vornehmlich auf Routen mit höheren Anteilen glatter Oberfläche (Asphalt) unterwegs. Darüber hinaus wiesen die gewählten Routen leicht höhere Grünflächenanteile auf. Gegenüber den Alternativen wurden moderat mehr „rechts-vor-links“ und LSA-geregelte Knotenpunkte entlang der gewählten Routen beobachtet. Entlang der gewählten Routen konnten zudem eine durchschnittlich höhere Unfallhäufigkeit sowie mehr Punkte subjektiver Unsicherheit (kritische Situationen) festgestellt werden als auf den nicht gewählten Alternativen. Zum ruhenden Verkehr entlang der Routen konnten auf Basis der Daten keine eindeutigen Tendenzen aufgezeigt werden, sodass sich diesbezüglich ein fragmentiertes Bild ergibt. Die Eigenschaften der Routen sind noch einmal in Tabelle 36 zusammengefasst.

Tabelle 36 Kennwerte der Merkmalsausprägung für die einzelnen Einflussfaktoren

Merkmal	Minimum	Median	Mittel	Maximum	Stand.abw.	Streuung
Fahrtweite [km]	0,34	3,03	4,43	60,41	4,28	60,07
Maximal Längsneigung [%]	-	5,29	6,77	112,00	6,21	112,00
Längsneigung < 2% [%]	-	0,89	0,85	1,00	0,14	1,00
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	-	0,28	0,29	1,00	0,23	1,00
Asphaltoberfläche [%]	-	0,59	0,54	1,00	0,23	1,00
RV - Längsaufstellung [%]	-	0,19	0,24	0,95	0,21	0,95
V _{zul} ≤ 30km/h [%]	-	0,18	0,26	1,00	0,26	1,00
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route [Kfz/Tag]	-	5.083,47	6.334,34	30.003,30	5.444,94	30.003,30
1 Fahrstreifen [%]	-	0,46	0,45	1,00	0,25	1,00
DTV > 500 Rad/Tag [%]	-	0,42	0,41	1,00	0,33	1,00
Geringe Fußverkehrsdichte [%]	-	0,04	0,07	0,73	0,08	0,73
KP-Regelung RVL [n/km]	-	2,86	3,11	11,62	1,93	11,62
KP-Regelung durch LSA [n/km]	-	0,82	0,90	6,18	0,84	6,18
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	-	66,50	101,59	700,00	103,79	700,00
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	-	6,00	10,02	63,00	11,29	63,00
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	-	0,29	0,33	0,99	0,23	0,99
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	-	0,10	0,18	1,00	0,20	1,00

Multivariate Analyse der Routenwahl

Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen die kausalen Zusammenhänge zwischen der Routenwahl und ihren Einflussfaktoren auf. In den folgenden Abschnitten werden Richtung (positiv, negativ) und Stärke aller in die Analyse einbezogenen Einflussfaktoren präsentiert. Die zentralen Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 37 zusammengefasst. Auf die Tabelle und die einzelnen Werte der unterschiedlichen Einflussfaktoren wird in den anschließenden Abschnitten dezidiert eingegangen.

Tabelle 37 Ergebnisse der logistischen Regressionsanalyse

Merkmal	Value	StdErr	t-test	p-value	Robust StdErr	Robust t-test	p-value	Odds Ratio
Konstante (Best-Weg)	0,789	0,050	15,710	0,000	0,051	15,450	0,000	2,201
Fahrtweite	0,255	0,041	6,240	0,000	0,044	5,790	0,000	1,290
Maximale Längsneigung	-0,076	0,008	-10,120	0,000	0,007	-10,510	0,000	0,927
Längsneigung < 2%	1,090	0,397	2,740	0,010	0,348	3,130	0,000	2,974
Radverkehrsinfrastruktur	5,720	0,289	19,770	0,000	0,310	18,420	0,000	304,905
Asphaltoberfläche	2,860	0,282	10,120	0,000	0,275	10,370	0,000	17,462
Ruhender Verkehr (Längsaufst.)	0,382	0,281	1,360	0,170*	0,313	1,220	0,220*	1,465
v _{zul} ≤ 30km/h	0,131	0,215	0,610	0,540*	0,226	0,580	0,560*	1,140
Durchschnittlicher DTV _{Kfz}	-0,000	0,000	-7,040	0,000	0,000	-7,060	0,000	1,000
1 Richtungsfahrstreifen	1,880	0,294	6,420	0,000	0,309	6,100	0,000	6,554
DTV _{Rad} > 500 Rad/Tag	2,410	0,206	11,700	0,000	0,204	11,800	0,000	11,134
Geringe Fußverkehrsdichte	-1,290	0,524	-2,450	0,010	0,563	-2,290	0,020	0,275
KP-Regelung „rechts vor links“	0,138	0,032	4,270	0,000	0,032	4,290	0,000	1,148
KP-Regelung LSA	0,270	0,075	3,580	0,000	0,080	3,380	0,000	1,310
Unfallhäufigkeit	-0,004	0,001	-5,220	0,000	0,001	-5,710	0,000	0,996
Häufigkeit kritischer Situationen	0,037	0,006	6,330	0,000	0,006	6,520	0,000	1,037
Umfeldnutzung „Wohngebiet“	0,492	0,282	1,750	0,080*	0,276	1,780	0,070*	1,636
Umfeldnutzung „Grünfläche“	1,600	0,324	4,920	0,000	0,325	4,910	0,000	4,953

* p-value ≥ 0,05

Die deskriptive Statistik hat bereits aufgezeigt, dass die Radfahrenden meist die kürzeste Route (Best-Weg) wählten. Dies spiegelt sich im Analysemodell in der Konstante wider, die eine Präferenz der Radfahrende zur Nutzung der kürzesten Route (Referenz der Modellschätzung) beschreibt. Ein negativer Einfluss zunehmender **Fahrtweite** konnte in bereits durchgeföhrten Studien nachgewiesen werden (bspw. Menghini et al. 2010, Hood et al. 2011, Broach et al. 2012, Casello und Usyukov 2014, Khatri, et al. 2016 Ton et al. 2017, Chen et al. 2017, Zimmermann et al. 2017, Ghanayim und Bekhor 2018), siehe Abschnitt 2.2. Der Einfluss ist im Modell signifikant (p-value = 0,000; Odds Ratio = 2,201). Wird jedoch von der kürzesten Route abgewichen, so übt die Distanz im analysierten Datensatz einen leicht positiven Einfluss auf die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist 0,255 und dessen Signifikanz ist statistisch gesichert (p-value < 0,05; Odds ratio ≠ 1). Die Distanz beeinflusst die Routenwahl beim Abweichen vom kürzesten Weg demzufolge signifikant positiv. Dieses Ergebnis wirkt zunächst überraschend, da prinzipiell eine Distanzempfindlichkeit im Radverkehr angenommen wird. Wird von der kürzesten Route abgewichen, so sind die Radfahrenden jedoch offensichtlich bereit, eine größere Distanz zurückzulegen. Dies könnte u.U. mit anderen Faktoren zusammenhängen. Die Studie von Krizek et al. (2007) gibt ähnliche Hinweise. In ihrer Studie stellen die Autoren fest, dass die Radfahrenden in der Regel nicht zwangsläufig die (nächst-) kürzeste Route wählen.

Die **Längsneigung** entlang einer Route besitzt ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Routenwahl, wirkt sich jedoch in unterschiedlichem Maße auf die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route aus. Die maximal vorhandene Längsneigung entlang einer Route übt sich leicht negativ auf die Auswahl einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist -0,076. Dementsprechend sinkt der Nutzen einer Route mit zunehmender

maximaler Längsneigung. Die Signifikanz ($p\text{-value} = 0,000$) und die Odds Ratio ($\neq 1$) zeigen an, dass dieser Einfluss statistisch signifikant ist. Der Einfluss von Streckenabschnitten mit einer Längsneigung $< 2\%$ ist hingegen deutlich stärker ausgeprägt. Höhere Routenanteile mit einer Längsneigung $< 2\%$ üben sich positiv auf die Wahl einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist 1,090. Damit steigen Nutzen und Wahrscheinlichkeit einer Route, wenn sich der Streckenanteil der Route mit einer Längsneigungen $< 2\%$ erhöht. Die Signifikanz von 0,010 zeigt zudem an, dass der Einfluss der Variable statistisch signifikant ist (Odds Ratio $\neq 1$). Die Längsneigung zeigt insgesamt also einen wesentlichen Einfluss auf die Routenwahl. Dies kann damit erklärt werden, dass Routen, auf denen große Teile der Gesamtstrecke eine geringere Längsneigung enthalten, weniger anstrengend zurückzulegen sind und damit ein deutlich komfortableres Radfahren ermöglichen. Das Gegenteil gilt entsprechend für Routen mit hohen maximalen Längsneigungen entlang der Route. Der vergleichsweise schwache negative Einfluss der maximalen Längsneigung ist zunächst überraschend. Es muss jedoch beachtet werden, dass die maximale Längsneigung nicht in Relation zur Routenlänge steht. Der Einfluss der maximalen Längsneigung ist daher nicht direkt mit dem Einfluss Längsneigung $< 2\%$ vergleichbar. Angesichts der Tatsache, dass der Anteil eines kurzen Streckenabschnitts mit einer maximalen Längsneigung im Verhältnis zur Gesamtstrecke sehr gering sein kann, muss der Einfluss der maximalen Längsneigung entlang der Routen höher eingeschätzt werden, als es der Anblick der Regressionskoeffizienten des Modells zunächst vermuten lässt. Die Ergebnisse wirken damit intuitiv gut erfassbar. Die gefundenen Zusammenhänge wurden zudem in anderen Forschungsarbeiten offengelegt (siehe bspw. Studien von Menghini et al. 2010, Hood et al. 2011, Casello und Usyukov 2014, Zimmermann et al. 2017 oder Chen et al. 2017). Die Wirkung des Einflussfaktors wurde jedoch nicht von allen Studien bestätigt.

Das Vorhandensein von **Radverkehrsinfrastruktur** übt im analysierten Datensatz einen wesentlichen Einfluss auf die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist 5,720. Die Variable beeinflusst die Routenwahl demzufolge stark positiv. Mit einem zunehmenden Anteil von Streckenabschnitten, die über Radverkehrsinfrastruktur verfügen, steigt deren Nutzen für die Radfahrenden und die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route steigt entsprechend stark an. Die Signifikanz der Variable (Sign. = 0,000) zeigt auf, dass der Einfluss statistisch signifikant ist. Die Signifikanz wird zudem durch den Wert der Odds Ratio bestätigt ($OR >> 0$). Die Radfahrenden der Stichprobe zeigen also eine starke Präferenz zur Wahl ihrer Route in Abhängigkeit von vorhandener Radverkehrsinfrastruktur. Die deutlich ausgeprägte Präferenz wurde bereits im Rahmen der deskriptiven Auswertung vermutet. Das Ergebnis ist intuitiv erklärbar und wurde auch auf Basis des recherchierten Wissensstands erwartet. Die Ergebnisse vorangegangener Arbeiten zeigen einen ähnlichen Einfluss. Es ist soweit keine Studie bekannt, in der ein negativer Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur und der Routenwahl ermittelt wurde. Ein stark positiver Einfluss wurde auch in dem Großteil der recherchierten Forschungsarbeiten gefunden (siehe Krizek et al. 2007, Menghini et al. 2010, Hood et al. 2011, Broach et al. 2012, Kang und Fricker 2013, Casello und Usyukov 2014, Khatri et al. 2016, Chen et al. 2017, Zimmermann et al. 2017 und Ghanayim und Bekhor 2018). In der vorliegenden Arbeit konnte die Radverkehrsführungsform jedoch nicht differenzierter betrachtet werden. Dies ist vor allem auf die Verteilung der einzelnen Variablen im betrachteten Netz zurückzuführen. Diesbezügliche Analysen bleiben weiterführenden Arbeiten vorbehalten.

Die **Oberflächenbeschaffenheit** einer Route übte, in Abhängigkeit ihrer Ausprägung, einen wesentlichen Einfluss auf die Routenwahl aus. Höhere Anteile des Oberflächentyps „Asphalt“ entlang einer Route beeinflussen die Wahl einer Route positiv. Der Korrelationskoeffizient für die Variable beträgt 2,860. Dementsprechend steigt die Wahrscheinlichkeit einer Route, wenn der Anteil der Route mit asphaltgedeckten Streckenabschnitten ansteigt. Die Signifikanz ($p\text{-value} = 0,000$) und die Odds Ratio ($OR >> 0$) zeigen zudem an, dass der Einfluss der Variable statistisch signifikant ist. Auch wenn die deskriptive Auswertung der Daten bereits einen derartigen Zusammenhang hatte vermuten lassen, so ist die Stärke des analysierten Zusammenhangs jedoch beachtlich. Der Grund für den positiven Einfluss dürfte vor allem auf das Komfortempfinden der Radfahrenden zurückgehen. So steigt das Fahren auf einer glatten Oberfläche den Fahrtkomfort vermutlich deutlich gegenüber einer Fahrt auf z.B. gepflasterter Oberfläche. Darüber hinaus ermöglicht eine glatte Oberfläche häufig höhere Fahrtgeschwindigkeiten und resultiert damit auch in geringeren Reisezeiten. Ein weiterer Zusammenhang könnte zwischen dem

Sicherheitsempfinden und der Oberflächenqualität bestehen. Die Radfahrenden könnten sich auf einer gleichmäßigen Oberfläche guter Qualität deutlich sicherer fühlen als bspw. auf einer gepflasterten Oberfläche. Dies könnte wiederum zu einer positiven Bewertung dieser Oberfläche und der verstärkten Nutzung von Routen führen, die hohe Streckenanteile mit einer als komfortabel empfundenen Oberflächenbeschaffenheit aufweisen. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit decken sich weitestgehend mit den Resultaten der Arbeit von Kang und Fricker 2013, in deren Analysen sich ebenfalls ein positiver Einfluss von „guter Oberfläche“ (good pavement condition) auf die Routenwahl heraustrahlte. Weitere Arbeiten, die diesen Einflussfaktor in die Analyse einbezogen, existierten zum Zeitpunkt der Analyse nicht.

Der **ruhende Verkehr** besitzt keinen wesentlichen Einfluss auf die Routenwahl. Das Vorhandensein von längs angeordnetem bzw. aufgestelltem ruhenden Verkehr entlang einer Route beeinflusst die Routenwahl entsprechend dem Korrelationskoeffizient (0,382) zwar positiv, allerdings ist der gefundene Zusammenhang statistisch nicht gesichert. Dies wird bei der Betrachtung der Signifikanz von 0,170 deutlich. Die Analyse offenbart also insgesamt, dass der längs angeordnete ruhende Verkehr keinen wesentlichen Einfluss auf die Routenwahl der Radfahrenden des vorliegenden Datensatzes ausübt. In keiner der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Studien wurde das Vorhandensein von ruhendem Verkehr als Einflussfaktor in die Analysen einbezogen. Dies könnte unter Umständen an der fehlenden Datengrundlage bzw. aufwendigen Erhebung des Merkmals liegen. Aufgrund der statistischen Unsicherheit des Einflusses ergänzen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit den bereits vorhandenen Wissensstand nur bedingt. Es wird vermutet, dass eine vollumfängliche Erhebung der Merkmale nötig wäre, um einen gesicherten Beitrag zur Betrachtung des Einflusses zu leisten.

Eine **zulässige Höchstgeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs** von bis zu 30 km/h übt insgesamt einen positiven Einfluss auf die Routenwahl aus. Der Korrelationskoeffizient der Variable von 0,131 zeigt auf, dass das Vorhandensein von Streckenabschnitten, auf denen der Kfz-Verkehr nicht schneller als 30 km/h fahren darf, die Routenwahl der Radfahrenden jedoch nur sehr schwach positiv beeinflusst. Ein steigender Anteil von derartigen Streckenabschnitten entlang der Route führt also nur zu einer leicht höheren Auswahlwahrscheinlichkeit. Dieses Ergebnis wirkt mit Blick auf die deskriptiven Auswertungen zunächst überraschend. Es wird insgesamt aber als intuitiv erklärbar und gut interpretierbar angesehen. Zunehmende Geschwindigkeiten des motorisierten Verkehrs könnten bei den Radfahrenden ein sinkendes Sicherheitsempfinden hervorrufen, da die Differenzgeschwindigkeit zwischen den Radfahrenden und dem fließenden Verkehr mit zunehmender Geschwindigkeit des Kfz-Verkehrs steigt. Ähnliche Ergebnisse wurden zudem in anderen Forschungsarbeiten (siehe bspw. Casello und Usyukov 2014, Khatri et al. 2016 und Chen et al. 2017). Der Einfluss ist statistisch jedoch nicht gesichert ($p\text{-value} = 0,540$). Es kann also nicht von einem statistisch signifikanten Einfluss der Variable auf die Routenwahl ausgegangen werden.

In der multivariaten Analyse konnte insgesamt kein wesentlicher Einfluss der durchschnittlichen **Kraftfahrzeugverkehrsstärke** entlang einer Route auf die Routenwahl nachgewiesen werden. Die Variable weist einen Korrelationskoeffizienten von nahezu 0 auf (-0,0000668) und beeinflusst die Routenwahl demzufolge nicht bzw. infinitesimal negativ. Die Variable spielt nachweisbar keine Rolle bei der Routenwahl, da eine Erhöhung/Verringerung des durchschnittlichen DTV_{Kfz} entlang der Route zu keiner Änderung von deren Auswahlwahrscheinlichkeit führt. Der (nicht vorhandene) Einfluss der Variable ist zudem statistisch signifikant ($p\text{-value} = 0,000$) und wird durch die Odds Ratio von 1,000 bestätigt. Es kann demnach von keinem signifikant positiven/negativen Einfluss der unabhängigen Variable auf die Routenwahl ausgegangen werden. Dass die Routenwahl der Radfahrenden in der Stichprobe nicht durch den DTV_{Kfz} beeinflusst wird, wurde bereits anhand der Ergebnisse der deskriptiven Analyse vermutet. Es zeigte sich bereits an dieser Stelle, dass die Unterschiede des DTV_{Kfz} zwischen Routen und Alternativen sehr gering sind. Insofern überrascht das Ergebnis mit Blick auf die Daten nicht, obwohl ein Einfluss des DTV_{Kfz} auf die Routenwahl durchaus denkbar ist. Höhere Kraftfahrzeugstärken gehen meist mit höheren Lärm- und Schadstoffemission einher und werden von Radfahrenden meist als negativ empfunden. Offensichtlich wählten die Radfahrenden in der Stichprobe jedoch ihre Routen nicht vorrangig anhand des Kriteriums eines geringen DTV_{Kfz} . Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit decken sich teils mit Resultaten anderer Forschungsarbeiten. Hood et al. 2011 fanden bspw. im Rahmen ihrer Studie ebenso keinen Effekt der

Verkehrsstärken des motorisierten Verkehrs auf die Routenwahl. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Casello und Usyukov 2014, aus deren Analysen sich kein nennenswerter Einfluss der Kraftfahrzeugverkehrsstärke auf die Routenwahlwahrscheinlichkeit ableiten ließ. Die Resultate anderer Arbeiten (siehe Broach et al. 2012, Kang und Fricker 2013, Khatri et al. 2016 und Zimmermann et al. 2017) stehen diesen Ergebnissen jedoch entgegen. Sie kommen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass Radfahrende Straßen mit hohen Kraftfahrzeugverkehrsstärken des Kfz-Verkehrs meiden. Dass der DTV_{Kfz} in der vorliegenden Arbeit keinen Einfluss auf die Routenwahl ausübt, könnte auch mit den Proband*innen der Stichprobe zusammenhängen, die insgesamt als eher erfahrene Radfahrer*innen eingeschätzt werden. Aufgrund dieser Tatsache könnte der Einfluss der Kraftfahrzeugverkehrsstärke derart gering ausfallen.

Die Analyseergebnisse zeigen, dass das Vorhandensein von lediglich einem **Richtungsfahrstreifen** für den motorisierten Verkehr einen wesentlichen Einfluss auf die Routenwahl hat. Der Korrelationskoeffizient von 1,880 weist auf einen positiven Zusammenhang zwischen der Variable und der Routenwahl hin. Steigt der Anteil von Streckenabschnitten einer Route, entlang derer dem Kfz-Verkehr ein Richtungsfahrstreifen zur Verfügung steht, so steigt der Nutzen und damit auch die Auswahlwahrscheinlichkeit dieser Route an. Der Einfluss der Variable ist zudem signifikant ($p\text{-value} = 0,000$; Odds Ratio = 6,554). Die Ergebnisse offenbaren also eine klare Präferenz der Radfahrenden. Es kann insgesamt also von einem signifikant positiven Einfluss der Variable auf die Routenwahl ausgegangen werden. Das Ergebnis der multivariaten Analyse ist damit eindeutiger, als es die Auswertung der deskriptiven Statistik erscheinen ließ. Zudem ist es intuitiv interpretierbar. So ist bspw. denkbar, dass Radfahrende nicht die Infrastruktur an sich – also das Vorhandensein nur eines Richtungsfahrstreifens – als vorteilhaft beurteilen, sondern vielmehr die mit ihr verbunden Eigenschaften gegenüber mehrstreifigen Straßen (wie bspw. geringere Lärm- und Schadstoffemissionen). Die Korrelationsanalyse wies keine signifikant hohen Korrelation mit anderen Variablen aus, sodass der Einfluss tatsächlich auf die Variable „Fahrstreifen“ zurückgeht. Tatsächlich könnten sich hinter der Variable jedoch anderen Einflussparameter verbergen, für die die Variable „Fahrstreifen“ eher eine Art Indikator bzw. Stellvertretervariable darstellt.

Die **Radverkehrsstärke** entlang einer Route, die im Datensatz durch die Variable „ $DTV_{Rad} > 500$ “ repräsentiert ist und das Vorhandensein weiterer Radfahrender abbildet, übt im analysierten Datensatz einen starken und signifikanten Einfluss auf die Routenwahl aus. Der Korrelationskoeffizient der Variable „ $DTV_{Rad} > 500$ “ ist mit 2,410 im Vergleich zu den Koeffizienten anderer Variablen sehr hoch. Die Variable beeinflusst die Routenwahl demzufolge stark positiv. Ein steigender Anteil von Streckenabschnitten entlang der Route, auf denen der $DTV_{Rad} > 500$ ist, führt zu einer ansteigenden Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route. Die Variable ist mit einer Signifikanz von 0,000 ($p\text{-value}$) zudem hochsignifikant. Die Signifikanz und Stärke wird zudem durch den sehr hohen Wert der Odds Ratio (11,134) bestätigt, der einen signifikanten und stark positiven Zusammenhang anzeigt. Ein derartiges Ergebnis wurde auf Basis der deskriptiven Auswertung erwartet. Der stark positive Einfluss der Radverkehrsstärken auf die Routenwahl ließe sich u.a. damit erklären, dass ein *Mehr an Radfahrenden* entlang einer Route für ein Mehr an Sichtbarkeit des Radverkehrs selbst sorgt und so evtl. auch zu einer Steigerung des subjektiven Sicherheitsempfindens der Radfahrenden führen könnte (*safety in numbers effect*). Aufgrund der Tatsache, dass andere Forschungsarbeiten (siehe Abschnitt 2.2) bisher nur selten den Einfluss der Radverkehrsstärken auf die Routenwahl analysiert haben, können die vorliegenden Ergebnisse lediglich den Ergebnissen einer Forschungsarbeit gegenübergestellt werden. Aus der Studie von Koh und Wong 2013 ging ebenfalls hervor, dass Radfahrende Routen bevorzugen, auf denen weitere Radfahrende präsent sind.

Die deskriptive Analyse ließ vermuten, dass Radfahrende Routen mit geringeren **Fußverkehrsichten** präferieren. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse können diese Vermutung jedoch nicht stützen. Geringe Fußverkehrsichten entlang einer Route üben im analysierten Datensatz einen signifikant negativen Einfluss auf die Routenwahl aus. Der Korrelationskoeffizient der Variable von -1,290 weist sogar einen starken negativen Einfluss der Variable aus. Die Wirkung der Variable ist zudem signifikant ($p\text{-value} = 0,010$). Signifikanz und Stärke werden durch die Odds Ratio (0,275) bestätigt. Ein steigender Anteil von Streckenabschnitten entlang der Route, auf denen eine geringe Fußverkehrsichte vorliegt, führt entsprechend zu einer geringeren Auswahlwahrscheinlichkeit. Ein derartiges Ergebnis wurde auf Basis der deskriptiven Auswertung nicht erwartet – auch wenn die deskriptive

Statistik keine großen Unterschiede bzgl. der Ausprägungen ausweist. In anderen Forschungsarbeiten (siehe Abschnitt 2.2) liegt bisher keine Betrachtung des Einflussfaktors vor. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass Radfahrende eher Routen mit einem „lebendigen Umfeld“ wählen. Dieses ist eher entlang von Geschäftsstraßen usw. aufzufinden. Da der Ansatz zur Ableitung der Fußverkehrsdichte auf den POI basiert, ist das Ergebnis auf Grundlage der genutzten Datenbasis gut interpretierbar.

Knotenpunkte besitzen, in Abhängigkeit von deren Art der Regelung (rechts-vor-links vs. LSA), einen schwachen, aber wesentlichen Einfluss auf die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route. Es kann zunächst festgehalten werden, dass Knotenpunkte der Regelungsart „rechts-vor-links“ einen schwach positiven Einfluss auf die Routenwahl ausüben. Dies wird zum einen an dem Korrelationskoeffizienten der Variable (0,138) deutlich. Die Signifikanz ($p\text{-value} = 0,000$) zeigt, dass der gefundene Zusammenhang statistisch gesichert ist. Ein derartiges Ergebnis wurde aufgrund der sehr ähnlichen Ausprägungen der Variable (siehe deskriptive Statistik) nicht ausgeschlossen. Eine größere Häufigkeit von LSA-geregelten Knotenpunkten entlang einer Route wirkt sich ebenso signifikant positiv auf die Wahl einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient der Variable ist 0,270. Dementsprechend steigen Nutzen und Wahlwahrscheinlichkeit einer Route leicht an, wenn mehr durch LSA geregelte Knotenpunkte auf einer Route liegen. Die Signifikanz von 0,000 zeigt zudem, dass der Einfluss der Variable signifikant ist. Die Odds Ratio von OR = 1,310 bestätigt den signifikant positiven Zusammenhang.

Der leicht positive Einfluss von rechts-vor-links geregelten Knotenpunkten könnte damit zusammenhängen, dass Radfahrende generell das Fahren im Nebennetz bevorzugen und dort zwangsläufig mehr dieser Knotenpunkte existieren. Rechts-vor-links geregelte Knotenpunkte kommen zudem sehr häufig im Stadtgebiet vor und es ist für Radfahrende nahezu unmöglich, derartige Knotenpunkte nicht zu passieren. Zudem entstehen an Knotenpunkten, die nicht durch LSA oder durch vorfahrtregelnde Verkehrszeichen geregelt sind, keine zusätzlichen Wartezeiten, wenn es die Verkehrssituation zulässt. An Knotenpunkten mit LSA ist es hingegen möglich, dass vergleichsweise höhere Wartezeiten entstehen. Dies gab vor der Analyse Grund zur Annahme, dass LSA geregelte Knotenpunkte einen negativen Einfluss auf die Routenwahl ausüben könnten, weil sich dadurch die Reisezeit erhöhen kann. Aus dieser Perspektive wäre ein negativer Einfluss zu erwarten gewesen. Der positive Einfluss ließe sich damit erklären, dass Lichtsignalanlagen bspw. die Querung von Hauptverkehrsstraßen erleichtern und damit zu einer Steigerung der (subjektiven) Sicherheit führen können. Dies könnte die Präferenz zur Nutzung von LSA-geregelten Knotenpunkten erklären, die sich bereits in der deskriptiven Datenauswertung angedeutet hatte.

Dass der Einfluss von Knotenpunkten unterschiedlich ausgeprägt sein und interpretiert werden kann, zeigt auch ein Blick in vorhandene Studienergebnisse. So fanden bspw. Menghini et al. 2010 heraus, dass eine Zunahme LSA geregelter Knotenpunkte die Routenwahl negativ beeinflusst. Ähnliche Ergebnisse erzielten Ton et al. 2017, Ghanayim und Bekhor 2018 und Broach, Dill und Gliebe 2012, in deren Studien jeweils ein negativer Einfluss einer zunehmenden Anzahl zu passierender Knotenpunkte entlang der Routen beobachtet werden konnte. Diesen Resultaten stehen wiederrum die Resultate der Arbeiten von Khatri et al. 2016 entgegen. In ihrer Studie wirkte sich eine steigende Anzahl von LSA geregelten Knotenpunkten entlang der Route positiv auf die Routenwahl aus. Die Autoren interpretieren dies als ein Indiz für die Erhöhung der Sicherheit durch die Nutzung von LSA beim Queren von Straßen. Auch Broach et al. 2012 betonen, dass LSA geregelte Knotenpunkte in ihrer Studie durchaus einen positiven Einfluss auf die Routenwahl ausüben (z.B. beim Linksabbiegen oder Queren von Straßen mit hohen Verkehrsstärken des motorisierten Verkehrs).

Sowohl die Unfallhäufigkeit (objektive Sicherheit) als auch die Anzahl kritischer Situationen (subjektive Sicherheit) üben einen marginalen Einfluss auf die Routenwahl der Radfahrenden der Stichprobe aus. Die **Unfallhäufigkeit** entlang einer Route wirkt sich leicht negativ auf die Wahl einer Route aus. Der Korrelationskoeffizienten der Variable ist -0,004. Steigt die Unfallhäufigkeit entlang einer Route, so sinken Nutzen und Auswahlwahrscheinlichkeit dieser Route kaum. Der analysierte Einfluss der Variable ist statistisch gesichert ($p\text{-value} = 0,000$). Es kann daher von einem signifikanten negativen, wenngleich recht schwachen, Einfluss der unabhängigen Variable auf die Routenwahl ausgegangen werden. Die **Häufigkeit kritischer Situationen** beeinflusst die Routenwahl schwach positiv. Steigt die Anzahl kritischer Situationen entlang der Route, so steigt

auch die Auswahlwahrscheinlichkeit leicht an. Dies wird bei der Betrachtung des Korrelationskoeffizienten der Variable deutlich (0,037). Der gefundene Zusammenhang ist zudem signifikant ($p\text{-value} = 0,000$).

Die Ergebnisse der Analyse sind überraschend. Vor allem der positive Einfluss von Punkten kritischer Situationen wurde in dieser Form nicht erwartet. Der Einfluss der Unfallhäufigkeit wurde als eher gering bzw. nicht existent angenommen. Die Annahme war, dass, wenn überhaupt, nur wenige Radfahrende die Unfallorte innerhalb des Stadtgebiets bei ihrer Routenwahl berücksichtigen. Darüber hinaus geschehen an Stellen mit höheren Verkehrsmengen statistisch gesehen mehr Unfälle (Alrutz et al. 2015), sodass als Resultat eher ein positiver Zusammenhang zwischen Routenwahl und Unfallhäufigkeit vermutet wurde. Im Hinblick auf den Einfluss kritischer Situation wurde zu Beginn der Arbeit ein negativer Zusammenhang vermutet. Es wurde angenommen, dass Radfahrende Orte meiden, an denen vermehrt kritische Situationen entstehen. Der positive Einfluss der subjektiven Sicherheit wurde in dieser Form nicht erwartet. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass kritische Situationen in den Mobilitäts-Berichten vermehrt dort entstanden und berichtet wurden, wo viel (Rad-)Verkehr stattfand. Da dies vermutlich eher im Hauptverkehrsnetz der Fall ist, werden diese Punkte beim Fahren durch die Stadt zwangsläufig häufiger passiert, wenn sich Radfahrende bei ihren Fahrten durch die Stadt bspw. am Hauptverkehrsnetz orientieren. Unter diesen Annahmen ließe sich der positive Einfluss auf die Routenwahl erklären. Zudem stammen die berichteten kritischen Situationen von den Proband*innen, die auch die Routen aufgezeichnet haben, sodass die Situationen zwangsläufig an deren genutzten Strecken liegen. Die Stichprobe war in diesem Punkt evtl. zu klein, damit sich die Gesamtheit aller berichteten Situationen überlagern und aussagekräftige Ergebnisse liefern.

Die **Umfeldnutzung** entlang einer Route übt teilweise einen wesentlichen Einfluss auf die Routenwahl der Radfahrenden aus. Ein hoher **Grünflächenanteil** entlang der Route wirkt stark positiv. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist mit 1,600 vergleichsweise hoch. Dementsprechend stark wirkt sich ein hoher Grünflächenanteil entlang einer Route positiv auf den Nutzen der Route für die Radfahrer*innen und die Auswahlwahrscheinlichkeit aus. Die Signifikanz ($p\text{-value} = 0,000$) weist zudem auf einen statistisch signifikanten Einfluss der Variable hin. Die Odds Ratio von $OR = 4,953$ bestätigt einen signifikant positiven Zusammenhang zwischen der Variable und der Routenwahl. Die deskriptive Auswertung der Daten zeigte bereits auf, dass die gewählten Routen durchschnittlich größere Grünflächenanteile aufwiesen. Ein derart starker positiver Zusammenhang wurde aufgrund der deskriptiven Analyse jedoch nicht erwartet. Die Betrachtung der Flächennutzung „Wohnen“ zeigt auf, dass höhere Anteile von **Wohngebieten** entlang der Route ebenfalls eine positive Wirkung auf die Routenwahl ausüben. Der Zusammenhang ist zwar nicht so stark ausgeprägt wie bei den Grünflächen, der Korrelationskoeffizient von 0,492 deutet aber dennoch auf einen mittelstarken positiven Zusammenhang hin. Es zeigt sich jedoch auch, dass der gefundene Zusammenhang nicht signifikant ($p\text{-value} = 0,080$) ist und daher statistisch als nicht gesichert angesehen werden kann.

Die Ergebnisse der Analyse bestätigen damit weitgehend die Zusammenhänge, die vor der Analyse vermutet wurden. Dass Wohnflächen einen positiven, aber nicht signifikanten Einfluss auf die Routenwahl haben, könnte „datenbedingt“ sein, da sich die Start- und Zielpunkte der Routen in Wohngebieten befinden und Fahrten damit zwangsläufig durch Wohngebiete führen. Der stark positive Einfluss hoher Grünflächenanteile entlang der Route ist dagegen deutlich intuitiver zu interpretieren. Grünflächen ermöglichen ein durchweg angenehmes Radfahren, das auf unterschiedliche Faktoren zurückzuführen ist. Entlang von Grünflächen herrschen andere Mikroklima und im Sommer (= Zeitraum der Datenerhebung) bspw. kühlere Umgebungstemperaturen, die das Radfahren deutlich angenehmer gestalten. Darüber hinaus bieten Grünflächen meist eine Szenerie, die allgemein als ästhetisch reizvoll und angenehm empfunden werden könnte (z.B. entlang des Elberadweges). Zudem ist auf einem Großteil der städtischen Grünflächen meist kein motorisierter Verkehr zugelassen, mit dem meist erhöhte Lärm- und Schadstoffemission einhergehen. Der gefundene Zusammenhang geht in ähnlichem Maße aus der Arbeit von Koh und Wong 2013 hervor. Sie konstatieren, dass Radfahrende Routen mit einer als schön empfundenen Szenerie präferieren und ordnen diesen Einfluss vor allem dem Komfortempfinden der Radfahrenden zu. Chen et al. 2017 kommen in ihrer Arbeit zu einem ähnlichen Ergebnis. In ihren Studienergebnissen wirken sich das Vorhandensein von Straßenbegleitgrün, das im weitesten Sinne als Grünfläche interpretiert werden kann, und die Nähe einer Route zu Grün- und Wasserflächen positiv auf die Auswahl einer Route aus. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit

werden ebenso durch die Studienergebnisse von Ghanayim und Bekhor 2018 gestützt, die einen positiven Einfluss von Strecken in Wohngebieten, Parks und entlang der Küste feststellten.

Neben Richtung und Stärke der unterschiedlichen Einflussfaktoren ist vor allem interessant, welchen Erklärungsgehalt die einzelnen Variablen besitzen bzw. zum Gesamtmodell beitragen. Zur Beantwortung dieser Frage kann das McFadden-R² (siehe folgende Abschnitte zur Modellgüte) genutzt werden, indem es nach jeder zusätzlichen Aufnahme einer Variable berechnet wird. Über die Differenz zum McFadden-R² zum vorigen Modell (ohne die aufgenommene Variable) kann schließlich der Beitrag jeder einzelnen Variable zur Modellgüte, und damit zur Erklärung der Routenwahl, bestimmt werden. In Abbildung 57 ist der Beitrag der einzelnen Variablen zur Gesamt-Modellgüte (finales McFadden-R²) – kurz: der Erklärungsgehalt – dargestellt.

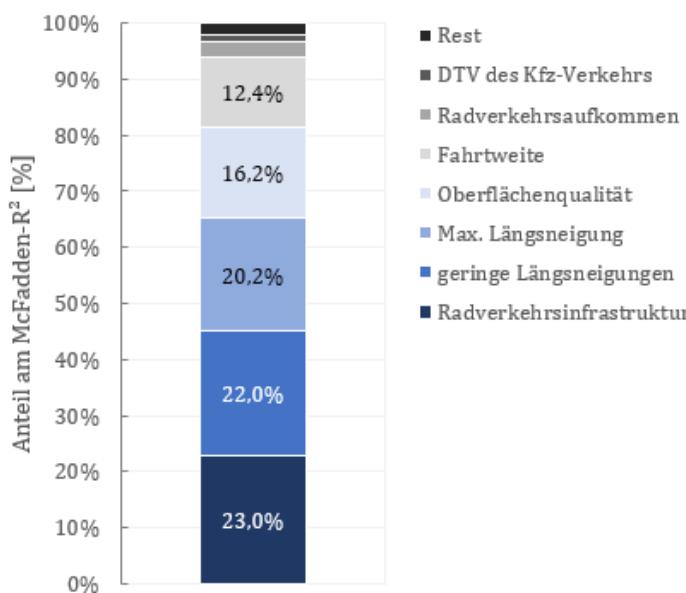


Abbildung 57 Erklärungsgehalt der einzelnen Variablen

Es wird deutlich, dass wenige Variablen einen Großteil der Modell-Güte ausmachen und damit die Routenwahl erklären. Das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur (23 %), geringe (22 %) und maximale Längsneigungen (20 %) sowie die Oberflächenqualität (16 %) entlang einer Route und die Fahrtweite (12 %) tragen zusammen rund 94 % zur Modellgüte bei. Der Beitrag der restlichen Variablen fällt mit einstelligen Anteilen (wie bspw. beim Radverkehrsaufkommen mit 2,8% oder DTV_{KFZ} mit 1,2 %) sehr gering aus.

Modellgüte

In dem vorherigen Abschnitt wurden die einzelnen Einflussfaktoren betrachtet und deren Einfluss auf die Routenwahl anhand unterschiedlicher Maße quantifiziert. In den folgenden Abschnitten wird auf die Modellgüte insgesamt eingegangen. Die Bestimmung der Gütemaße folgt den in Abschnitt 3 beschriebenen Vorschriften.

Log-Likelihood

Um einen ersten Eindruck von der Modellgüte zu bekommen, werden die -2LL des resultierenden Gesamtmodells der -2LL eines Null-Modells (Modell ohne Prädiktor-Variablen) gegenübergestellt. Die -2LL des geschätzten Modells ist $-2LL_{Mod} = 4.434,69$. Die -2LL eines Null-Modells ist $-2LL_{Null} = 8.760,33$. Der Vergleich der beiden Werte zeigt, dass der Wert des Null-Modells deutlich über dem Wert des Gesamtmodells liegt. Das bedeutet, dass der Einbezug der Prädiktor-Variablen zu einer höheren Modellgüte führt.

Likelihood-Ratio-Test

Der Likelihood-Ratio-Test ist ein wichtiger Test zur Prüfung der Modellgüte, weil sein Ergebnis Auskunft über die Signifikanz des Gesamtmodells gibt. Die Likelihood-Ratio (Berechnung siehe Abschnitt 3) beträgt im vorliegenden Fall LLR = 4.325,65.

Der χ^2 -Wert für $\alpha = 0,01$ und 20 Freiheitsgrade ist laut χ^2 -Tabelle $\chi^2 = 37,57$. Der χ^2 -Wert des Modells liegt mit $\chi^2_{\text{ges}} = 4.325,65$ deutlich über dem bestimmten Wert ($4.325 > 37,57$), weshalb die Nullhypothese abgelehnt und das Modell kann als statistisch signifikant angesehen werden. Damit gilt das Modell als hochsignifikant.

Abbildung 58 verdeutlicht die Entwicklung der LLR sowie LL_{Model} und stellt sie der LL_{Null} gegenüber. Es wird deutlich, dass mit der Aufnahme der ausgewählten Variablen der Erklärungsgehalt des Modells sukzessive ansteigt. Es kann insgesamt geschlussfolgert werden, dass das Gesamtmodell signifikant ist und der Einbezug der Variablen und der geschätzten Korrelationskoeffizienten einen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Zusammenhänge liefert.

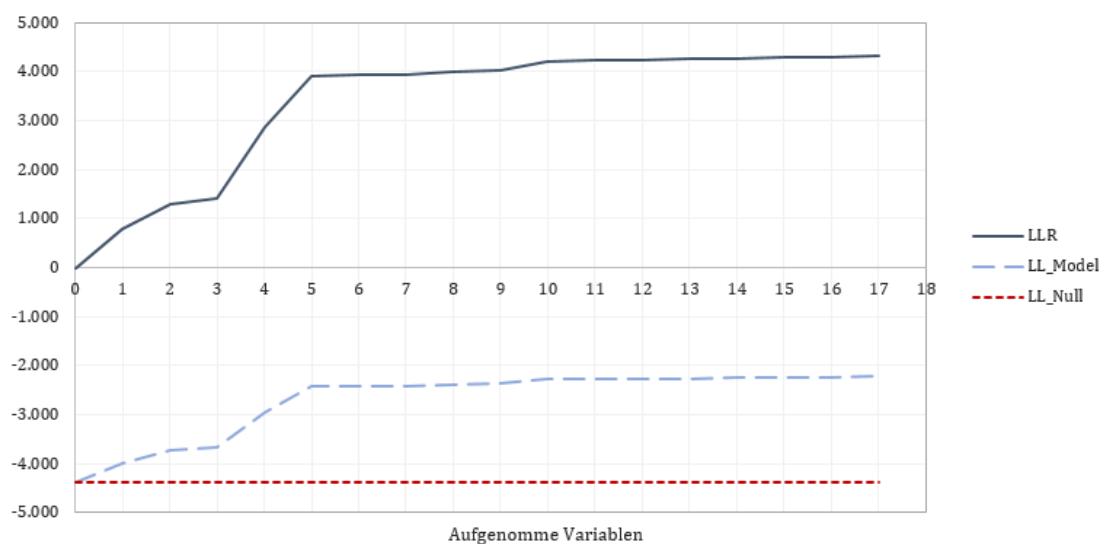
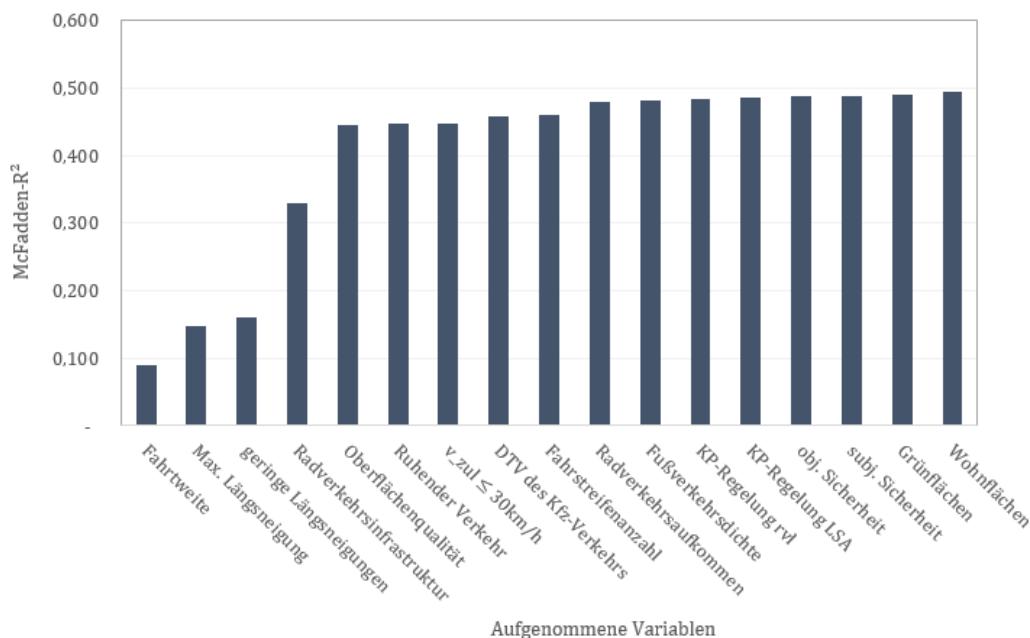


Abbildung 58 Entwicklung der LLR und der LL_{Model} mit der sukzessiven Aufnahme der Variablen

Pseudo-R²-Statistiken

In Abschnitt 3 wurden unterschiedliche Pseudo-R-Statistiken (McFadden-R², Cox&Snell-R²2, Nagelkerke's-R²) beschrieben, die für die Einschätzung der Modellgüte genutzt werden können.

Das **McFadden-R²** des vorliegenden Modells beträgt McF-R² = 0,494. Wie bereits in Abschnitt 3 beschrieben, liegen die Werte des McF-R² in der Praxis deutlich niedriger als beim R² von Modellen der linearen Regression. Eine perfekte Anpassung, also ein Erreichen eines McF-R² = 1, gilt bei realen Daten allgemeinhin als nahezu unmöglich. Nach Backhaus et al. (2016) deuten bereits Werte zwischen 0,2 und 0,4 auf eine gute Modellanpassung hin. Abbildung 59 zeigt die Entwicklung des McFadden-R² mit der sukzessiven Aufnahme der ausgewählten Variablen. Es wird deutlich, dass mit der Aufnahme der Variablen die Güte des Modells (McFadden-R²) ansteigt. Mit einem McF-R² = 0,494 wird ein final recht hoher Wert erreicht. Damit kann von einer sehr hohen Modellgüte ausgegangen werden.

Abbildung 59 Entwicklung des McFadden-R² mit der sukzessiven Aufnahme der Variablen

Als weiteres Gütemaß kann das in Abschnitt 3 beschriebene **Cox&Snell-R²** bestimmt werden. Das Cox&Snell-R² kann selbst bei einer perfekten Anpassung nur Werte kleiner eins annehmen, wodurch der resultierende Wert schwer zu interpretieren ist. Nichtsdestotrotz kann das Cox&Snell-R² Hinweise auf die Modellgüte geben. In der Regel deckt das Cox&Snell-R² einen Wertebereich zwischen 0 und 0,75 ab. Werte nahe Null entsprechen einer geringen Modellgüte. Für das vorliegende Modell wurde ein Wert von Cox&Snell-R² = 0,662 berechnet. Damit kann von einer hohen Güte des vorliegenden Modells ausgegangen werden.

Das **Nagelkerke's-R²** ist ein weiteres Maß zur Bestimmung der Modellgüte (siehe Abschnitt 3). Im Gegensatz zum Cox&Snell-R² kann es auch einen Maximalwert von eins erreichen. Daher sind die Werte des Cox&Snell-R² ähnlich wie das R² bei der linearen Regressionsanalyse oder dem McF-R² zu interpretieren. Für das vorliegende Modell wurde ein Nagelkerke's-R² = 0,745 bestimmt. Damit besitzt das Modell eine hohe bis sehr hohe Güte.

Klassifikationsstatistik

Die Klassifikationsstatistik ist ein weiteres Maß, dass zur Beurteilung der Modellgüte herangezogen werden kann. Sie gibt Auskunft darüber, wie exakt das geschätzte Modell die Wahl für die vorliegenden Fälle – also die Wahl/Ablehnung der Routen/Alternativen – prognostiziert, indem die Beobachtungen den Vorhersagen in der sog. Confusion Matrix gegenübergestellt werden. Die Klassifikationsstatistik des vorliegenden Modells ist in Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 38 Klassifikationsstatistik des Modells

		Vorhergesagt		korrekt
		Ja (y=1)	Nein (y=0)	
Beobachtet	Ja (y=1)	2.972	1.016	74,5%
	Nein (y=0)	1.016	6.960	87,3%
				83,0%

Die Berechnung der Wahl/Ablehnung einer Route erfolgt über die berechnete Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route. Diese werden in Abhängigkeit der Eigenschaften der Routen/Alternativen unter Nutzung des erstellten

Routenwahlmodells (siehe Formel 14 und Tabelle 37) berechnet. Aus den Vorhersagen wurden anschließend die in Abschnitt 3 beschriebenen Gütemaße berechnet.

Vom Modell werden 2.972 von insgesamt 3.988 beobachteten Fällen, in denen eine Route gewählt wurde, korrekt erkannt bzw. prognostiziert (true positives). Dies entspricht einem Prozentsatz von rund 74,5 % und zugleich der sog. true positive rate (bzw. recall). Den korrekt erkannten Fällen stehen 1.016 Fälle gegenüber, in denen nicht die korrekte Route erkannt wurde. Deren Wahl wird vom Modell nicht prognostiziert, sondern abgelehnt, obwohl die Routen von den Radfahrenden gewählt wurden. Diese false negatives machen damit einen Anteil von 25,5 % aus.

Der Anteil der true negatives – also der korrekt prognostizierten Ablehnungen von Routen – liegt mit 87,3 % über dem Anteil der true positives. Dies zeigt an, dass das Modell die Ablehnung einer Route etwas präziser prognostiziert als die Wahl einer Route. Insgesamt werden 6.960 der 7.976 nicht gewählten Routen korrekt vom Modell prognostiziert. Dieser Anteil entspricht der sog. true negative rate (bzw. correct rejection rate). Demgegenüber prognostiziert das vorliegende Modell für 1.016 Routen eine Wahl, die nicht von den Radfahrenden durchgeführt wurden. Der Anteil dieser false positives liegt damit bei rund 12,7%.

Die Accuracy gibt den Prozentsatz der vom Modell insgesamt korrekt erkannten Entscheidungen an. Sie beträgt für das vorliegende Modell 83,0 % und ist damit als hoch einzuschätzen. Die Precision gibt das Vertrauensniveau der als positiv klassifizierten Fälle an und bezieht alle als positiv klassifizierten Instanzen mit ein. Das vorliegende Modell weist für die Precision einen Wert von 74,5 % auf. Das F-Maß, das die zuvor genannten Maße (Accuracy, Recall) kombiniert (siehe Abschnitt 3) weist ebenfalls einen Wert von 74,5 % auf. Die berechneten Maße zeigen, dass das resultierende Modell eine durchgängig hohe Güte aufweist.

Spezifische Routenwahlmodelle

Um zu analysieren, welchen Einfluss weitere Parameter der Fahrten (z.B. Wegezweck) bzw. der Proband*innen (z.B. Geschlecht) auf die Routenwahl ausüben, wurden weitere dezidierte Routenwahlmodelle erstellt (siehe Tabelle 13). Zur besseren Interpretation werden die Ergebnisse der deskriptiven Auswertung und der multivariaten Analyse für jedes der Modelle gemeinsam dargestellt.

Geschlechter-spezifische Routenwahl

In der Stichprobe wurden 2.232 Fahrten von Männern und 1.701 Fahrten von Frauen aufgezeichnet. Auch wenn das Fahrtenaufkommen demnach leicht ungleich verteilt ist (56,8 % und 43,2 %), liegen dennoch genügend Fahrten vor, um Aussagen über die Routenwahl tätigen zu können. Die Routenwahl der Geschlechter zeigt deutliche Unterschiede. Dies wird in den folgenden Abschnitten deutlich, in denen jeweils die unterschiedlichen Einflussfaktoren beschrieben werden.

Die von Frauen zurückgelegten Wege waren mit 2,65 km **Fahrtweite** durchschnittlich (Median) rund 19,7 % kürzer als die Fahrten der Männer (3,3 km). Dies deutet auf eine hohe Distanzempfindlichkeit bei der Routenwahl von Frauen ggü. der von Männern hin, die in der multivariaten Analyse bestätigt wird (siehe Tabelle 39). Der Korrelationskoeffizient der Fahrtweite ist mit 0,138 im Vergleich zu dem der Männer (0,371) deutlich kleiner (siehe Tabelle 40). Dies zeigt, dass die Bereitschaft von Frauen, längere Routen zu wählen, im Vergleich zu den Männern in der Stichprobe deutlich geringer ausfällt. Die Korrelationskoeffizienten von beiden Gruppen sind statistisch signifikant.

Unterschiede sind auch bei der durchschnittlich auftretenden maximalen **Längsneigung** entlang der Routen festzustellen. Sie liegt bei den Radfahrerinnen mit 4,56 % etwa 21,6 % unter dem Wert der Radfahrer. Dies könnte auf eine höhere Sensibilität von Frauen in Bezug auf die maximal zu überwindende Steigung auf einer Route hindeuten. Die Betrachtung der multivariaten Analyseergebnisse bestätigt diese Vermutung. Sie zeigt jedoch auch auf, dass die Unterschiede nicht sehr stark ausgeprägt sind. Mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,085 wirkt sich die maximal vorhandene Längsneigung entlang einer Route bei Frauen nur etwas stärker negativ auf die Auswahl einer Route aus, als dies bei den Männern (Korrelationskoeffizient = -0,071) der Fall ist.

Der mittlere Streckenanteil der Routen, auf denen keine bzw. nur geringe Längsneigungen überwunden wurden (LN < 2 %) ist mit rund 87,3 % (Männer) und 90,2 % (Frauen) ähnlich groß. Die von den Frauen gewählten Routen

enthielten etwas mehr Streckenabschnitte mit geringen Längsneigungen (+ 3,3 %). Dies könnte auf eine leicht höhere Präferenz von Frauen hindeuten, Routen mit möglichst großen Anteilen geringer Längsneigungen zu bevorzugen. Diese Präferenz wird auch durch die Ergebnisse der multivariaten Analyse bestätigt. Der Vergleich der Korrelationskoeffizienten zeigt, dass sich hohe Anteile geringer Längsneigungen bei der Routenwahl von Radfahrerinnen deutlich stärker positiv wirken (Koeffizient = 1,300) als bei Radfahrern (Koeffizient = 0,869). Der Einfluss der Variable ist (bei den Männern noch) statistisch gesichert und damit signifikant.

Deutliche Unterschiede ergeben sich bei der Nutzung von **Radverkehrsinfrastruktur**. Auf den von den Radfahrern gewählten Routen beträgt der Streckenanteil, auf dem Radverkehrsinfrastruktur vorhanden ist, durchschnittlich 29,4 %. Entlang den von den Radfahrerinnen gewählten Routen ist dieser Anteil mit 26,5 % etwas geringer. Dass die unterschiedlichen Anteile jedoch nicht auf die Präferenzen der Radfahrenden zurückzuführen sind, zeigen die Ergebnisse der multivariaten Analyse. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 6,030 hat das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur entlang einer Route sogar einen deutlich höheren Einfluss auf die Routenwahl der Radfahrerinnen als auf die der Radfahrer (Korrelationskoeffizient = 5,600). Der Einfluss der Variable ist bei beiden Gruppen statistisch signifikant.

Die **Oberflächenbeschaffenheit** hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Routenwahl beider Gruppen. Durchschnittlich waren auf den Routen der Männer rund 57,7 % der Oberflächen mit Asphalt gedeckt. Bei den Frauen beträgt dieser sogar Anteil 60,3 %. Die allgemeine Präferenz der Radfahrenden, asphaltgedeckte Oberflächen zu nutzen, ist bei den Frauen etwas stärker ausgeprägt als bei den Männern. Dies wird durch den höheren Korrelationskoeffizienten (3,090) der Variable bei der Routenwahl der Frauen ggü. der von Männern (2,890) deutlich. Beide Koeffizienten sind statistisch gesichert (signifikant).

Tabelle 39 Durchschnittswerte der geschlechter-spezifischen Modelle im Vergleich

Merkmale	Durchschnittswerte (Median)		
	Global-Modell	Geschlechter-Modelle	
		Männer	Frauen
Fahrtweite [km]	3,025	3,297	2,647
Maximale Längsneigung [%]	5,3	5,8	4,6
Längsneigung ≤ 2% [%]	88,6%	87,3%	90,2%
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	27,7%	29,4%	26,5%
Asphaltoberfläche [%]	58,7%	57,7%	60,3%
RV - Längsaufstellung [%]	18,8%	17,4%	20,9%
v_zul ≤ 30km/h [%]	18,4%	17,7%	19,5%
Durchschnittlicher DTV entlang einer Route [Kfz/Tag]	5.083	5.139	4.810
1 Richtungsfahrstreifen [%]	46,1%	45,3%	47,3%
DTV > 500 Rad/Tag [%]	41,6%	43,8%	38,4%
Geringe Fußverkehrsdichte [%]	4,4%	4,7%	4,1%
KP-Regelung RVL [n/km]	2,86	2,81	2,98
KP-Regelung durch LSA [n/km]	0,82	0,79	0,85
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	67	68	66
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	6	6	7
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	29,2%	27,7%	31,2%
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	9,9%	11,6%	8,4%

Werte im Vergleich:  größer ,  kleiner

Auch bei dem **ruhenden Verkehr** zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den von Männern und Frauen gewählten Routen. So liegt der Anteil von ruhendem Verkehr (Längsaufstellung) entlang der Route bei Frauen (20,9 %) gut 20% über dem Anteil auf den von Männern gewählten Routen (17,4%). Die multivariate Analyse zeigt

zwar unterschiedliche Einflüsse des ruhenden Verkehrs auf die Routenwahl von Männern und Frauen auf (positiver Einfluss auf die Routenwahl von Männern; negativer Einfluss bei Frauen), doch sind diese Ergebnisse statistisch nicht (Frauen) bzw. nur knapp (Männer) gesichert (siehe Tabelle A 11-3 und Tabelle A 11-4). Es konnte demnach kein signifikanter Einfluss des ruhenden Verkehrs nachgewiesen werden.

Unterschiede ergeben sich ebenfalls bei Streckenanteilen, entlang derer die **maximal zulässige Geschwindigkeit des motorisierten Verkehrs** $\leq 30 \text{ km/h}$ ist. Auf den von den Radfahrern gewählten Routen fällt dieser Anteil mit durchschnittlich 17,7 % geringer aus als entlang der Routen der Radfahrerinnen (19,5 %). Die von den Frauen gewählten Routen führten im Durchschnitt also häufiger entlang von Strecken, auf denen der motorisierte Verkehr eine maximal zulässige Geschwindigkeit von 30 km/h realisieren darf. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen jedoch, dass die unterschiedlichen Anteile nicht auf die Präferenzen der Radfahrenden zurückzuführen sind. Das ist weniger auf die unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten (siehe Tabelle 40) und den positiven (Frauen) bzw. negativen (Männer) Einfluss zurückzuführen als vielmehr auf den Fakt, dass der Einfluss der Variable sowohl bei Radfahrern als auch bei den Radfahrerinnen statistisch nicht signifikant ist.

Die von Radfahrern und Radfahrerinnen gewählten Routen unterscheiden sich bzgl. des durchschnittlichen **DTV_{Kfz}** entlang der Routen. Entlang der von Frauen gewählten Routen lag der DTV im Mittel bei rund 4.810 Kfz/Tag und damit etwa 6,5 % unter dem Wert entlang der von den Männern gewählten Routen. Dass diese Werte jedoch nicht auf die Präferenzen von Männern und Frauen zurückgehen, zeigen die Ergebnisse der multivariaten Analyse. Für beide Gruppen ist zwar ein statistisch signifikanter negativer Einfluss feststellbar. Dieser ist jedoch sowohl für die Radfahrer (Korrelationskoeffizient = -0,0000604) als auch für die Radfahrerinnen (Korrelationskoeffizient = -0,0000781) so gering, dass daraus insgesamt kein nennenswerter Einfluss für die Routenwahl der beiden Gruppen ableitbar ist.

Tabelle 40 Modellkoeffizienten der geschlechter-spezifischen Modelle im Vergleich

Merkmal	Korrelationskoeffizient		
	Global-Modell	Geschlechter-Modelle	
		Männer	Frauen
Konstante	0,789	0,860	▲ 0,738
Fahrtweite	0,255	0,371	▲ 0,138
Maximale Längsneigung	-0,076	-0,071	▼ ▼ -0,085
Längsneigung $\leq 2\%$	1,090	0,869*	▲ ▲ 1,300*
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	5,720	5,600	▲ ▲ 6,030
Asphaltoberfläche	2,860	2,890	▲ ▲ 3,090
RV – Längsaufstellung	0,382*	0,938(*)	▲ ▼ -0,203*
v_zul $\leq 30 \text{ km/h}$	0,131*	-0,174*	▼ ▲ 0,551*
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route	-0,000	-0,000	■ ■ -0,000
1 Richtungsfahrstreifen	1,880	1,810	▲ ▲ 1,550
DTV > 500 Rad/Tag	2,410	2,920	▲ ▲ 1,910
Geringe Fußverkehrsdichte	-1,290	0,037*	▲ ▼ -2,800
KP-Regelung RVL	0,138	0,189	▲ ▲ 0,091*
KP-Regelung durch LSA	0,270	0,115*	▲ ▲ 0,427
Unfallhäufigkeit gesamt	-0,004	-0,004	▼ ▼ -0,006
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	0,037	0,018	▲ ▲ 0,057
Umfeldnutzung Wohngebiet	0,492*	1,090	▲ ▲ 1,810
Umfeldnutzung Grünfläche	1,600	-0,042*	▼ ▲ 0,903

Werte im Vergleich: ▲ positiv (größer), △ positiv (kleiner), ■ kein Einfluss, ▼ negativ (kleiner), ▽ negativ (größer)

* statistisch nicht signifikant ($p\text{-value} \geq 0,05$)

Die Routen der Radfahrerinnen weisen im Vergleich mit den Routen der Radfahrer im Durchschnitt höhere Streckenanteile auf, auf denen dem MV nur ein **Richtungsfahrstreifen** zur Verfügung steht. Die Unterschiede sind

jedoch nur leicht ausgeprägt (Frauen: 47,3 %; Männer: 45,3%). Es kann insgesamt zunächst festgehalten werden, dass hohe Streckenanteile mit nur einem Richtungsfahrstreifen für den MV einen starken positiven Einfluss auf die Routenwahl von Männern und Frauen ausüben. Die Stärke des Einflusses unterscheidet sich zw. Männern (Korrelationskoeffizient = 1,810) und Frauen (Korrelationskoeffizient = 1,550) im Verhältnis zur Stärke des Gesamteinflusses geringfügig.

Das Vorhandensein anderer Radfahrender entlang der Strecken hat sowohl einen positiven Einfluss auf die Routenwahl von Männern als auch auf die von Frauen. Die Streckenanteile, auf denen der $DTV_{Rad} > 500$ Rad/Tag ist, betrug bei den Radfahrern rund 43,8 %. Entlang der von den Radfahrerinnen gewählten Routen fiel dieser Anteil mit 38,4 % etwas geringer aus. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen, dass der DTV_{Rad} auf die Routenwahl der Männer stärker positiv wirkt (Korrelationskoeffizient = 2,920) als auf die der Frauen (Korrelationskoeffizient = 1,910).

Geringe **Fußverkehrsdichten** wirken sich sehr unterschiedlich auf die Routenwahl von Männern und Frauen aus. Auf die Routenwahl der Radfahrer hat die Variable nahezu keine Wirkung. Der Korrelationskoeffizient (0,037) ist nahe Null. Zudem ist der gefundene Zusammenhang statistisch nicht signifikant. Auf die Routenwahl der Radfahrerinnen üben geringe Fußverkehrsdichten hingegen einen signifikant negativen Einfluss aus (Korrelationskoeffizient = -2,800). Es ist jedoch diskutabel, inwiefern die Unterschiede tatsächlich durch unterschiedliches Verhalten zustande kommen oder ob diese nicht eher durch andere Faktoren (Verortung der Proband*innen im Stadtgebiet oder den POI-Ansatz) beeinflusst werden. Ein Hinweis darauf geben die Anteile der Streckenabschnitte mit geringer Fußverkehrsdichte, die sowohl bei den Männern (4,7 %) als auch bei den Frauen (4,1 %) sehr gering ausfallen. Dies könnte zu einer Verzerrung der Modellergebnisse geführt haben. Die Ergebnisse sollten in diesem Kontext hinterfragt werden.

Bzgl. der Anzahl **rechts-vor-links geregelter Knotenpunkte** sind die Unterschiede entlang der gewählten Routen von Männern und Frauen nur marginal. Radfahrer passierten durchschnittlich 2,8 Knotenpunkte und Radfahrerinnen rund 3,0. Eine zunehmende Anzahl rechts-vor-links geregelter Knotenpunkte entlang einer Routen wirkt sich sowohl bei Männern als auch bei Frauen positiv auf die Routenwahl aus. Dies könnte auf die geringeren Wartezeiten ggü. LSA geregelten Knotenpunkten zurückzuführen sein. Allerdings beeinflusst die Variable die Routenwahl der Männer stärker positiv (Korrelationskoeffizient = 0,189) als die der Frauen (Korrelationskoeffizient = 0,091). Darüber hinaus ist der Einfluss der Variable auf die Routenwahl der Radfahrerinnen statistisch nicht gesichert.

Die Betrachtung der durch **LSA geregelten Knotenpunkte** offenbart ein umgekehrtes Bild. Durchschnittlich passierten Männer und Frauen auf ihren Routen zwar etwa gleich viele LSA-Knotenpunkte (Männer: 0,80; Frauen: 0,85) und eine ansteigende Anzahl der auf einer Route befindlichen LSA-Knotenpunkte beeinflusst die Routenwahl beider Geschlechter positiv. Allerdings beeinflusst die Variable die Routenwahl der Radfahrerinnen deutlich stärker (Korrelationskoeffizient = 0,472) als die der Radfahrer (Korrelationskoeffizient = 0,115). Zudem ist nur die Wirkung der Variable auf die Routenwahl der Frauen statistisch gesichert und damit signifikant. Der positive Einfluss könnte vor allem auf die zusätzliche Sicherheit beim Queren von Straßen mit hohen Verkehrsstärken zurückzuführen sein.

Der Einfluss der **objektiven und subjektiven Sicherheit** zeigt im Vergleich zwischen Männern und Frauen (sowie dem Gesamtmodell) kaum Unterschiede. Die Unfallhäufigkeit unterscheidet sich entlang der Routen von Radfahrerinnen und Radfahrern kaum (siehe Tabelle 39) und übt sowohl auf die Routenwahl der Männer als auch auf die der Frauen nur einen sehr schwachen negativen Einfluss aus (siehe Tabelle 40). Die subjektive Sicherheit (Punkte kritischer Situationen entlang der Route) zeigt, so wie das Gesamtmodell auch, einen schwachen positiven Einfluss auf die Routenwahl der unterschiedlichen Geschlechter. Der Einfluss der Variable ist bei Frauen ähnlich schwach ausgeprägt (Korrelationskoeffizient = 0,057) wie bei Männern (Korrelationskoeffizient = 0,018). Alle gefundenen Zusammenhänge sind signifikant, also als statistisch gesichert zu betrachten. Eine mögliche Interpretation des Einflussfaktors folgt der des Gesamtmodells.

Die **Umfeldnutzung** beeinflusst die Routenwahl von Männern und Frauen in unterschiedlichem Maße. Die deskriptive Statistik der von Radfahrerinnen und Radfahrer gewählten Routen ließe zunächst keine großen Unterschiede in der Routenwahl vermuten. Rund 27,7 % Strecken entlang der von Männern gewählten Routen

führen durch Wohngebiete. Bei den Frauen ist dieser Anteil mit rund 31,2 % leicht erhöht. Bei der Umfeldnutzung „Grünflächen“ sind die Unterschiede mit 11,6 % (Männer) und 8,4 % etwas stärker ausgeprägt. Insgesamt waren die Anteile der Wohngebietsflächen entlang der Routen bei Frauen also etwas größer und die Grünflächenanteile geringer. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen, dass die Umfeldnutzung „Wohngebiet“ auf beide Geschlechter einen positiven Einfluss ausübt (siehe Tabelle 40). Der Einfluss der Variable ist bei Radfahrerinnen noch stärker ausgeprägt (Korrelationskoeffizient = 1,810) als bei Männern (Korrelationskoeffizient = 1,090). Führen Routen durch Wohngebiete, so steigt die Wahrscheinlichkeit der Wahl dieser Routen bei Frauen deutlich stärker als bei Männern. Der Einfluss ist für beide Geschlechter statistisch gesichert. Bei der Umfeldnutzung „Grünfläche“ zeigt die Analyse der Routenwahl deutliche Unterschiede zwischen den Geschlechtern. Ansteigende Grünflächenanteile der Routen von Männern würden demnach zu einer sehr leichten Verringerung der Auswahlwahrscheinlichkeit führen (Korrelationskoeffizient = -0,042). Dieser Zusammenhang verwundert und wird vom Modell zudem als statistisch nicht gesichert angeben. Der Einfluss von Grünflächenanteilen bei der Routenwahl von Frauen wiederum ist signifikant und beeinflussen die Routenwahl stark positiv (Korrelationskoeffizient = 0,903). Die vollständigen Tabellen zur deskriptiven Statistik und den Modellkoeffizienten aller Einflussfaktoren können Anlage 11 entnommen werden.

Es kann resümiert werden, dass sich die Routenwahl von **Männern** und **Frauen** in vielen Fällen unterscheidet. Frauen reagieren in ihrer Routenwahl sensibler auf Steigungen, würden aber verhältnismäßig längere Wege in Kauf nehmen, wenn die Eigenschaften der Routenalternativen vorteilhaft sind. Dies können bspw. eine gute Oberflächenbeschaffenheit und das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur sein, die die Routenwahl von Frauen stärker positiv beeinflussen als die der Männer. Das Vorhandensein nur eines Richtungsfahrstreifens des MV sowie das Vorhandensein anderer Radfahrender beeinflussen die Routenwahl beider Geschlechter positiv – die der Männer etwas stärker. Die Unfallhäufigkeit sowie die Anzahl von Punkten kritischer Situationen spielen eine untergeordnete Rolle in der Routenwahl. Beträchtliche Unterschiede sind bei dem Einfluss der Umfeldnutzung zu beobachten. Es muss jedoch festgehalten werden, dass die Unterschiede der Einflussfaktoren nicht immer sehr stark ausgeprägt sind. In den Fällen, in denen große Unterschiede festzustellen sind (z.B. Fußverkehrsdichten oder ruhender Verkehr), sind die Zusammenhänge statistisch oft nicht gesichert. Ursachen dafür könnten die Stichprobengröße oder der Umfang der vorliegenden Sekundärdaten sein. Es wird jedoch vermutet, dass andere Faktoren, wie bspw. der Wegezweck oder die Erfahrung für die Routenwahl maßgeblich sind. Diese Faktoren werden in den folgenden Abschnitten untersucht.

Wegezweck-spezifische Routenwahl

In der Stichprobe wurden unterschiedliche viele Fahrten für die drei angegebenen Wegezwecke aufgezeichnet. Mit 2.036 Fahrten (51,8 %) wurden am häufigsten Arbeitswege erhoben. Darüber hinaus wurden 560 Wege des Zwecks „Einkaufen“ (14,2 %) und 1.337 Freizeitfahrten (34,0 %) erfasst. Die folgenden Abschnitte werden aufzeigen, dass Unterschiede bei der Wahl einer in Route in Abhängigkeit des Wegezwecks bestehen.

Die auf Arbeitswegen zurückgelegten Fahrten waren mit 3,98 km **Fahrtweite** durchschnittlich (Median) am längsten. Auf Freizeitfahrten wurde im Durchschnitt rund 2,76 km zurückgelegt. Die kürzesten Fahrten konnten mit durchschnittlich 1,76 km bei Einkaufswegen aufgezeichnet werden. Dies könnte auf eine Distanzempfindlichkeit bei Einkaufswegen hindeuten. Sie wird in der multivariaten Analyse bestätigt. Auf Einkaufswegen ist die Bereitschaft, vom kürzesten Weg abzuweichen, am geringsten (die Konstante ist von allen Wegezwecken am höchsten). Eine steigende Distanz wirkt sich negativ auf die Routenwahl aus (Korrelationskoeffizient = -0,033). Im Vergleich dazu sind die Korrelationskoeffizienten von Arbeits- und Freizeitwegen mit 0,185 und 0,370 größer. Obwohl auf diesen Wegen größere Distanzen zurückgelegt werden, ist die Bereitschaft, von der kürzesten Route abzuweichen, stärker ausgeprägt. Es ist jedoch zu beachten, dass nur der Korrelationskoeffizient der Freizeitfahrten statistisch gesichert gilt.

Leichte Unterschiede sind bei der durchschnittlich auftretenden maximalen **Längsneigung** festzustellen. Sie ist bei Arbeits- und Freizeitwegen zwar sehr ähnlich ausgeprägt ($5,53^\circ$ bzw. $5,32^\circ$), liegt bei Einkaufsfahrten mit $4,10^\circ$ aber deutlich unter dem globalen Durchschnitt ($5,29^\circ$). Dies könnte auf eine höhere Sensibilität bei Einkaufsfahrten

in Bezug auf die maximal zu überwindende Steigung auf einer Route hindeuten. Die Betrachtung der multivariaten Analyseergebnisse bestätigt dies, zeigt jedoch auch auf, dass die Unterschiede nicht sehr stark ausgeprägt sind. Mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,108 wirkt sich die maximal vorhandene Längsneigung entlang einer Route bei Einkaufswegen am stärksten negativ auf die Routenwahl aus, als auf Arbeitswegen (Korrelationskoeffizient = -0,079) oder Freizeitwegen (Korrelationskoeffizient = -0,064). Der Einfluss der Variable ist bei allen Wegezwecken statistisch gesichert und damit signifikant.

Der Streckenanteil der Routen, auf denen keine bzw. nur geringe Längsneigungen überwunden wurden ($LN < 2\%$) unterscheidet sich durchschnittlich nur leicht zwischen den Wegezwecken (siehe Tabelle 41). Der Anteil geringer Längsneigungen ist mit 91,0 % auf Einkaufswegen besonders groß. Bei Arbeits- und Freizeitwegen fallen die Anteile mit 87,5 % (Arbeit) und 89,0 % (Freizeit) etwas geringer aus. Dies könnte auf eine leicht höhere Präferenz hindeuten, auf Einkaufswegen Routen mit möglichst großen Anteilen geringer Längsneigungen zu nutzen. Diese Präferenz wird auch durch die Ergebnisse der multivariaten Analyse bestätigt. Der positive Einfluss einer geringen Längsneigung ist auf Einkaufswegen am stärksten ausgeprägt (Koeffizient = 2,860). Einen positiven Einfluss, wenngleich nicht so stark ausgeprägt, hat eine geringe Längsneigung auch auf die Routenwahl bei Freizeitwegen (Koeffizient = 1,680). Der Einfluss der Variable ist bei diesen beiden Wegezwecken statistisch gesichert. Auf Arbeitswegen wirken sich hohe Anteile geringer Längsneigungen hingegen negativ aus (Koeffizient = -0,314) – allerdings ist der Einfluss der Variable statistisch nicht gesichert und damit nicht als signifikant anzusehen.

Tabelle 41 Medianwerte der Wegezweck-spezifischen Modelle im Vergleich

Merkmal	Durchschnittswerte (Median)			
	Global-Modell	Wegezweck-Modelle		
		Arbeit	Einkauf	Freizeit
Fahrtweite [km]	3,03	3,98	1,76	2,76
Maximale Längsneigung [%]	5,29	5,53	4,10	5,32
Längsneigung $\leq 2\% [%]$	88,6%	87,5%	91,0%	89,0%
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	27,7%	33,6%	17,1%	22,6%
Asphaltoberfläche [%]	58,7%	59,6%	59,6%	57,2%
RV - Längsaufstellung [%]	18,8%	19,0%	21,4%	16,9%
v_zul $\leq 30\text{km/h} [%]$	18,4%	17,3%	21,3%	19,5%
Durchschnittlicher DTV entlang einer Route [Kfz/Tag]	5.083	5.898	4.216	4.245
1 Richtungsfahrstreifen [%]	46,1%	45,2%	52,0%	44,9%
DTV > 500 Rad/Tag [%]	41,6%	48,5%	22,9%	33,3%
Geringe Fußverkehrsdichte [%]	4,4%	4,5%	3,6%	4,7%
KP-Regelung RVL [n/km]	2,9	2,8	3,4	2,8
KP-Regelung durch LSA [n/km]	0,8	0,9	0,6	0,7
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	66	92	33	51
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	6	9	2	4
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	29,2%	27,6%	33,6%	29,9%
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	9,9%	11,2%	6,8%	10,0%

Werte im Vergleich: gering, mittel, hoch

Sehr deutliche Unterschiede ergeben sich bei der Nutzung von **Radverkehrsinfrastruktur**. Der Streckenanteil, auf dem Radverkehrsinfrastruktur vorhanden ist, beträgt auf Arbeitswegen durchschnittlich 33,6 % und liegt damit sogar deutlich über dem des Gesamtmodells (27,7 %). Dies könnte auf eine Präferenz der Radfahrende zurückzuführen sein, tägliche Wege möglichst sicher, schnell und komfortabel – also auf geeigneter Infrastruktur – zurückzulegen. Bei Einkaufswegen sinkt der Anteil auf 17,1 % ab, was vermutlich darauf zurückgeht, dass Fahrten zu Einkaufsgelegenheiten eher im Nebennetz stattfinden (die zeigt auch die Tendenz zum Best-Weg). Auf Freizeitwegen beträgt der 22,6 %. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse stützen die vermuteten Präferenzen

aus der deskriptiven Statistik. Das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur entlang einer Route hat bei allen Wegezwecken einen starken positiven Einfluss auf die Wahl einer Route. Die Zusammenhänge sind zudem bei allen Wegezwecken statistisch gesichert. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 8,050 hat das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur entlang einer Route den höchsten Einfluss bei der Routenwahl auf Arbeitswegen. Der Einfluss der Variable ist auf Einkaufswegen (Koeffizient = 4,320) und Freizeitwegen (Koeffizient = 4,080) zwar nicht so stark wie auf Arbeitswegen. Das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur übt dennoch einen stark positiven Einfluss auf die Routenwahl dieser Wegezwecke aus.

Die **Oberflächenbeschaffenheit** hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Routenwahl aller Wegezwecke. Durchschnittlich waren auf den Routen der Wegezwecke „Arbeit“ und „Einkaufen“ etwa 59,6 % der Oberflächen mit Asphalt gedeckt. Auf Routen von Freizeitwegen liegt der Anteil mit 57,2 % leicht darunter. Die multivariate Analyse zeigt auf, dass sich das Vorhandensein einer guten Oberfläche unterschiedlich stark auf die Routenwahl ausübt (siehe Tabelle 42). Sie bestätigt jedoch insgesamt, dass die allgemeine Präferenz der Radfahrenden, asphaltgedeckte Oberflächen zu nutzen, auf Fahrten bei allen Wegezwecken stark ausgeprägt ist. Die ermittelten Präferenzen sind statistisch gesichert und damit signifikant.

Bei dem **ruhenden Verkehr** zeigen sich ebenfalls Unterschiede bei den unterschiedlichen Wegezwecken. Der durchschnittliche Anteil von ruhendem Verkehr (Längsaufstellung) entlang der Routen beträgt bei Arbeitswegen 19,0 %. Bei Einkaufsfahrten steigt der Anteil auf 21,4 % und fällt bei Freizeitfahrten auf 16,9 % ab. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen, dass hohe Anteile von ruhendem Verkehr entlang einer Route einen negativen Einfluss auf die Routenwahl bei Freizeitfahrten (Koeffizient = -0,298) und Einkaufsfahrten (Koeffizient = -0,047) ausübt. Diese Ergebnisse sind statistisch jedoch nicht gesichert (siehe Tabelle 42). Darüber hinaus scheint das Vorhandensein von ruhendem Verkehr die Routenwahl auf Arbeitswegen positiv zu beeinflussen (Koeffizient = 1,230). Dieses Ergebnis ist durchaus überraschend und könnte evtl. darauf zurückzuführen sein, dass Arbeitswege vor allem im Hauptnetz durchgeführt werden und dort, auch wenn ruhender Verkehr vorhanden ist, nicht von bestimmten Routen abgewichen wird. Zur Klärung bedarf es an dieser Stelle weitere Arbeiten und vertiefte Analysen.

Unterschiede ergeben sich ebenfalls bei Streckenanteilen, entlang derer die **maximal zulässige Geschwindigkeit des motorisierten Verkehrs** $\leq 30 \text{ km/h}$ ist. Auf Arbeitswegen fällt dieser Anteil mit durchschnittlich 17,3 % am geringsten aus. Auf Freizeitwegen war der Anteil mit 21,3 % im Durchschnitt am höchsten; auf Einkaufswegen betrug er 19,5 %. Dies lässt vermuten, dass reduzierte Geschwindigkeiten des motorisierten Verkehrs vor allem bei Freizeit- und Einkaufsfahrten eine Rolle spielen. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse scheinen dies zu bestätigen. Die unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten (siehe Tabelle 42) zeigen, dass sich hohe Anteile von Streckenabschnitten mit einer maximal zulässigen Geschwindigkeit des MV $\leq 30 \text{ km/h}$ negativ auf die Routenwahl auf Arbeitswegen auswirkt. Im Gegensatz wirken sie positiv bei der Routenwahl auf Einkaufs- und Freizeitwegen. Ein Grund für die unterschiedliche Wirkung könnte sein, dass Arbeitswege vor allem im Hauptnetz durchgeführt werden und dort meist höhere Geschwindigkeiten für den MV zulässig sind. Da Arbeitswege weniger im Nebennetz zurückgelegt werden, in dem meist reduzierte Geschwindigkeiten vorkommen, wirkt sich dieser Einfluss im Modell negativ auf die Routenwahl aus. Zur Interpretation des positiven Einflusses auf die Routenwahl bei Einkaufs- und Freizeitfahrten kann entsprechend invers argumentiert werden. Es ist jedoch zu beachten, dass der Einfluss der Variable bei allen Wegezwecken statistisch nicht gesichert ist.

Entlang der auf Arbeitswegen gewählten Routen lag der **DTV_{Kfz}** im Mittel bei rund 5.898 Kfz/Tag und damit fast um 1.600 Kfz/Tag höher als auf Einkaufs- oder Freizeitwegen (jeweils ca. 4.200 Kfz/Tag). Dies lässt zunächst vermuten, dass ein hoher durchschnittlicher DTV_{Kfz} entlang auf Routen der Arbeitswege weniger relevant ist bzw. eher Routen im Hauptverkehrsnetz gewählt werden, in dem der DTV_{Kfz} zwangsläufig höher ist. Andererseits könnte ein niedriger DTV_{Kfz} gerade entlang von Routen bei Freizeitwegen wichtig für die Radfahrenden sein. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen, dass der DTV_{Kfz} bei allen Wegezwecke einen infinitesimal geringen, aber negativen, Einfluss auf die Routenwahl ausübt. Die Korrelationskoeffizienten sind zwar jeweils negativ, aber so gering (Arbeit = -0,0001100; Einkauf = -0,0000294, Freizeit = -0,0000511), dass sie bei der Routenwahl nahezu keine Rolle spielen. Der analysierte Zusammenhang ist bei Arbeits- und Freizeitwegen statistisch gesichert – bei Einkaufswegen (vermutlich aufgrund der geringen Fahrtenanzahl) nicht.

Tabelle 42 Modellkoeffizienten der Wegezweck-spezifischen Modelle im Vergleich

Merkmal	Korrelationskoeffizient						
	Globalmodell	Wegezweck-Modelle					
		Arbeit		Einkauf		Freizeit	
Konstante	0,789	0,760		0,826		0,734	
Fahrtweite	0,255	0,158*		-0,033*		0,370	
Maximale Längsneigung	-0,076	-0,079		-0,108		-0,064	
Längsneigung ≤ 2%	1,090	-0,314*		2,860		1,680	
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	5,720	8,050		4,320		4,080	
Asphaltoberfläche	2,860	2,600		3,370		3,530	
RV – Längsaufstellung	0,382*	1,230		-0,047*		-0,208*	
v_zul ≤ 30km/h	0,131*	-0,492*		0,803*		0,495*	
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route	-0,000	-0,000		-0,000*		-0,000	
1 Richtungsfahrstreifen	1,880	2,730		0,892*		1,440	
DTV > 500 Rad/Tag	2,410	2,940		1,980		1,930	
Geringe Fußverkehrsdichte	-1,290	-0,929*		-1,650*		-0,894*	
KP-Regelung RVL	0,138	0,213		0,197		0,048*	
KP-Regelung durch LSA	0,270	0,484		0,054*		0,200*	
Unfallhäufigkeit gesamt	-0,004	-0,006		-0,003*		-0,002*	
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	0,037	0,041		0,045		0,023	
Umfeldnutzung Wohngebiet	0,492*	1,880		1,750		0,848*	
Umfeldnutzung Grünfläche	1,600	1,240		0,526*		-0,451*	

Werte im Vergleich: positiv (größer), positiv (kleiner), kein Einfluss, negativ (kleiner), negativ (größer)

* statistisch nicht signifikant ($p\text{-value} \geq 0,05$)

Die Routen der Einkaufswege weisen mit 52,0 % im Vergleich mit den anderen Wegezwecken im Durchschnitt höhere Streckenanteile auf, auf denen dem MV nur ein **Richtungsfahrstreifen** zur Verfügung steht. Die Unterschiede zwischen den anderen Wegezwecken sind mit 45,2 % (Arbeitswege) und 44,9 % (Freizeitwege) minimal. Die multivariate Analyse zeigt auf, dass hohe Streckenanteile mit nur einem Richtungsfahrstreifen für den MV einen starken positiven Einfluss auf die Routenwahl aller Wegezwecke hat (siehe Tabelle 42). Die Stärke des Einflusses unterscheidet sich zw. den Wegezwecken. Am größten ist der Einfluss der Variable auf die Routenwahl bei Arbeits- und Freizeitwegen. Der vergleichsweise geringe positive Einfluss auf die Routenwahl bei Einkaufsfahrten ist zudem statistisch nicht gesichert.

Das Vorhandensein anderer Radfahrender entlang der Strecken hat einen starken positiven Einfluss auf die Routenwahl bei allen Wegezwecken. Die Streckenanteile, auf denen der **DTV_{Rad} > 500 Rad/Tag** ist, betrug bei den Arbeitswegen 48,5 %, bei Einkaufswegen 22,9 % und bei Freizeitwegen 33,3 %. Die Unterschiede kommen vermutlich durch die geringeren Verkehrsstärken im Nebennetz bei Einkaufs- und Freizeitfahrten zustande. Nichtsdestotrotz ist bei allen Wegezwecken ein stark positiver Einfluss auf die Routenwahl zu erkennen. Die Analyse ergibt für alle Wegezwecke hohe positive Korrelationskoeffizienten (siehe Tabelle 42), die alle statistisch gesichert sind. Der Einfluss gilt damit als signifikant.

Geringe **Fußverkehrsdichten** wirken sich bei allen Wegezwecken negativ auf die Routenwahl aus. Die deskriptive Statistik zeigt bereits, dass entlang der Routen bei allen Wegezwecken sehr geringe Anteile der Variable vorhanden sind (siehe Tabelle 41). Die Anteile der Streckenabschnitte mit geringer Fußverkehrsdichte fallen für die Wegezwecke „Arbeit“ (4,5 %), „Einkauf“ (3,6 %) und „Freizeit“ (4,7 %) sehr gering aus. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen, dass geringe Fußverkehrsdichten einen starken negativen Einfluss auf die Routenwahl aller Wegezwecke ausüben (siehe Tabelle 42). Es ist jedoch zu beachten, dass der gefundene Zusammenhang statistisch nicht gesichert ist. Zudem lässt sich der gefundene Zusammenhang schwer

interpretieren. Vermutlich sind die Ergebnisse eher Resultat der Datenaufbereitung (gewählter POI-Ansatz) als der tatsächlichen Routenwahlpräferenzen. Die Ergebnisse müssen in diesem Kontext hinterfragt werden.

Bzgl. der Anzahl **rechts-vor-links geregelter Knotenpunkte** sind die Präferenzen entlang der gewählten Routen leicht unterschiedlich. Auf Arbeits- und Freizeitwegen passierten die Radfahrenden durchschnittlich 2,8 Knotenpunkte pro km. Bei Einkaufsfahrten lag der Durchschnitt mit 3,4 KP/km etwas höher. Dies könnte vor allem auf Fahrten im Nebennetz zurückzuführen sein, die beim Wegezweck „Einkaufen“ häufiger vorkommen als z.B. auf Arbeitswegen. Eine zunehmende Anzahl rechts-vor-links geregelter Knotenpunkte entlang einer Routen wirkt sich jedoch bei allen Wegezwecken positiv auf die Routenwahl aus. Der Einfluss ist bei Arbeitswegen (Korrelationskoeffizient = 0,213) und Einkaufswegen (Korrelationskoeffizient = 0,197) am größten und bei Freizeitwegen nur minimal ausgeprägt. Dies könnte auf die vergleichsweise geringeren Wartezeiten ggü. LSA geregelten Knotenpunkten zurückzuführen sein, die bei Alltagswegen vermutlich entscheidender sind als auf Gelegenheits- bzw. Freizeitwegen. Es ist jedoch auch zu beachten, dass der identifizierte Einfluss bei Freizeitwegen im Gegensatz zu Arbeits- und Einkaufswegen statistisch nicht gesichert ist (siehe Tabelle 42).

Durch **LSA geregelte Knotenpunkte** haben bei allen Wegezwecken einen positiven, wenngleich nicht immer signifikanten, Einfluss auf die Routenwahl. Durchschnittlich wurden am meisten LSA-Knotenpunkte auf Arbeitswegen (0,9 KP/km) passiert. Auf Einkaufs- und Freizeitwegen waren es etwas weniger (siehe Tabelle 41). Eine ansteigende Anzahl der auf einer Route befindlichen LSA-Knotenpunkte beeinflusst die Routenwahl auf allen Wegezwecken positiv. Der Einfluss ist auf Arbeitswegen am stärksten ausgeprägt (Korrelationskoeffizient = 0,472) und signifikant. Bei den anderen Wegezwecken fällt der Einfluss weniger stark aus (Korrelationskoeffizient von 0,054 bzw. 0,200). Der Einfluss von LSA geregelten Knotenpunkten auf die Routenwahl bei Einkaufs- und Freizeitwegen ist zudem statistisch nicht gesichert (siehe Tabelle 42).

Die **objektive und subjektive Sicherheit** beeinflusst die Routenwahl kaum und zeigen im Vergleich mit dem Gesamtmodell sowie zwischen den unterschiedlichen Wegezwecken kaum Unterschiede im Einfluss auf. Zwar unterscheiden sich die Kennwerte zu Unfallhäufigkeiten und kritischen Situationen deutlich zwischen den Wegezwecken (siehe Tabelle 41). Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen jedoch, dass die Einflüsse minimal sind. Die Unfallhäufigkeit übt auf allen Wegen einen sehr schwachen negativen Einfluss aus (Korrelationskoeffizienten zw. -0,002 und -0,006). Die Wirkung ist nur auf Arbeitswegen signifikant. Die subjektive Sicherheit (Punkte kritischer Situationen entlang der Route) zeigt insgesamt einen schwachen positiven Einfluss auf die Routenwahl bei allen Wegezwecken. Die gefundenen Zusammenhänge sind zudem signifikant, also statistisch gesichert. Der Einfluss der Variable ist mit Korrelationskoeffizienten zwischen 0,023 und 0,045 jedoch bei allen Wegezwecken verhältnismäßig gering ausgeprägt (siehe Tabelle 42).

Die **Umfeldnutzung** übt einen unterschiedlichen Einfluss auf die Routenwahl bei den verschiedenen Wegen aus. Die deskriptive Statistik lässt zunächst nur geringe Unterschiede in der Routenwahl vermuten. Rund 27,6 % der Strecken entlang der bei Arbeitswegen gewählten Routen führen durch Wohngebiete. Bei den anderen Wegezwecken fällt dieser Anteil mit 33,6 % (Einkaufsfahrten) und 29,9 % (Freizeitfahrten) höher aus. Bei der Umfeldnutzung „Grünflächen“ sind die Unterschiede mit 11,2 % (Arbeitswege) sowie 6,8 % (Einkaufswege) und 10,0 % (Freizeitwege) invers verteilt. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen, dass die Umfeldnutzung „Wohngebiet“ bei allen Wegezwecken einen positiven Einfluss ausübt (siehe Tabelle 41). Der Einfluss der Variable ist bei Arbeits- und Einkaufswegen am stärksten ausgeprägt. Der Korrelationskoeffizient ist auf den Wegen nahezu doppelt so groß wie auf Freizeitwegen (siehe Tabelle 42). Insgesamt steigt die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer Route also an, wenn sie durch Wohngebiete führt. Der Einfluss der Variable ist jedoch nur für Arbeits- und Einkaufswege statistisch gesichert. Bei der Umfeldnutzung „Grünfläche“ zeigt die Analyse der Routenwahl deutliche Unterschiede zwischen den Wegezwecken. Sie üben vor allem bei Arbeitswegen einen signifikanten und stark positiven Einfluss auf die Routenwahl aus (Korrelationskoeffizient = 1,240). Die Wirkung fällt bei Einkaufsfahrten nicht ganz so stark positiv aus (Korrelationskoeffizient = 0,526) und ist bei Freizeitwegen sogar negativ. Dieser Zusammenhang verwundert und wird vom Modell zudem als statistisch nicht gesichert angeben. Die vollständigen Tabellen zur deskriptiven Statistik und den Modellkoeffizienten aller Einflussfaktoren können Anlage 11 entnommen werden.

Die Analyseergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Die Routenwahl wird auf Arbeitswegen durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren signifikant beeinflusst (insgesamt 13 von 17). Das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur sowie anderer Radfahrender entlang der Route, schmale Querschnitte (ein Richtungsfahrstreifen) für den motorisierten Verkehr und eine gute Oberflächenbeschaffenheit (Asphalt) wirken sich am stärksten positiv auf die Routenwahl aus. Signifikant negative Einflüsse bestehen vor allem in einen großen maximalen Längsneigung sowie einer ansteigenden Unfallhäufigkeit – auch wenn deren Wirkung sehr gering ist. Für die Routenwahl auf Einkaufswegen konnten insgesamt acht signifikante Einflussfaktoren identifiziert werden (rund 47 % aller Variablen). Das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur und eine gute Oberflächenbeschaffenheit (Asphalt) sowie geringe Längsneigungen und das Vorhandensein anderer Radfahrender entlang der Route wirken sich am stärksten positiv auf die Routenwahl aus. Ein signifikant negativer Einfluss konnte nur für eine große maximale Längsneigungen entlang der Route nachgewiesen werden.

Für die Routenwahl auf Freizeitwegen konnten insgesamt neun signifikante Einflussfaktoren identifiziert werden (rund 53 % aller Variablen). Das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur bestimmt, in Analogie zur den anderen Wegezwecken, maßgeblich die Routenwahl. Weiter signifikant positiv wirkende Einflussfaktoren sind eine gute Oberflächenbeschaffenheit (Asphalt), das Vorhandensein anderer Radfahrender entlang der Route sowie geringe Längsneigungen und schmale Querschnitte (ein Richtungsfahrstreifen) für den motorisierten Verkehr. Ein signifikant negativer Einfluss konnte nur für eine große maximale Längsneigungen entlang der Route nachgewiesen werden.

Die Resultate der unterschiedlichen Modelle zeigen, dass nicht für alle Einflussfaktoren statistisch gesicherte Zusammenhänge festgestellt werden können. Dies ist vermutlich auf die Fahrtenanzahl für die unterschiedlichen Wegezwecke zurückzuführen. Die Ergebnisse sind daher differenziert zu betrachten.

Radfahr-Typ-spezifische Routenwahl

Die vier unterschiedlichen Radfahrtypen (ambitioniert, funktionell, passioniert, pragmatisch) der Stichprobe zeigen bzgl. ihrer Fahrteneigenschaften und Routenwahlpräferenzen deutliche Unterschiede auf. Mit 759 Fahrten (19,3 %) wurden am wenigsten Fahrten vom „ambitionierten“ Typ aufgezeichnet. Die Radfahrenden des „funktionellen“ Typs (955 Fahrten) und des „pragmatischen“ Typs (1.065 Fahrten) zeichneten deutlich mehr Fahrten auf. Am meisten Fahrten wurden von den „passionierten“ Typen erfasst (1.154 Fahrten).

Die von den ambitionierten Typen zurückgelegten Fahrten waren mit 4,44 km **Fahrtweite** durchschnittlich am längsten. Die funktionellen Typen legten mit 2,72 km im Durchschnitt die kürzesten Wege zurück. Der pragmatisch und passionierte Typ liegt mit 3,14 km und 2,87 km dazwischen (siehe Tabelle 43). Die Werte lassen zunächst eine vergleichsweise höhere Distanzempfindlichkeit der funktionellen Radfahrenden sowie Distanzunempfindlichkeit der ambitionierten Typen vermuten. Dies lässt sich durch die multivariate Analyse jedoch nicht bestätigen. Es kann sogar gegensätzliches festgestellt werden: Die Radfahrenden des funktionellen Typs halten weniger stark an dem kürzesten Weg fest (Konstante = 0,662) und sind eher bereit, Umwege in Kauf zu nehmen. Demgegenüber zeigen die passionierten und pragmatischen Typen eine vergleichsweise hohe Persistenz zur Nutzung der kürzesten Route (Konstante = 0,840 bzw. 0,822). Die Bereitschaft, größere Distanzen zurückzulegen und von der kürzesten Route abzuweichen ist vor allem bei diesen Typen relativ kleiner ausgeprägt. Die Korrelationskoeffizienten der Fahrtweite (siehe Tabelle 44) sind bei allen Typen statistisch gesichert.

Unterschiede sind auch bei der durchschnittlich auftretenden maximalen **Längsneigung** festzustellen. Sie ist bei dem ambitionierten Typ mit 7,59 % am höchsten und bei den anderen Typen deutlich geringer ausgeprägt (siehe Tabelle 43). Dies könnte auf eine geringe Sensibilität des ambitionierten Typen in Bezug auf die maximal zu überwindende Steigung auf einer Route hindeuten. Die Betrachtung der multivariaten Analyseergebnisse bestätigt dies nur bedingt. Die maximal auftretende Längsneigung zeigt bei allen Radfahrtypen eine leicht negative Wirkung auf die Routenwahlwahrscheinlichkeit, die sich zwischen den Typen jedoch nur geringfügig unterscheidet (siehe Tabelle 44). Mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,103 wirkt sich die maximal vorhandene Längsneigung entlang einer Route bei dem pragmatischen Typ am stärksten negativ auf die Routenwahl aus, als bspw. bei dem passionierten Radfahr-Typ (Korrelationskoeffizient = -0,052). Der Einfluss der Variable ist bei allen Typen statistisch gesichert und damit signifikant.

Der Streckenanteil der Routen, auf denen nur geringe Längsneigungen überwunden wurden ($LN < 2\%$) unterscheidet sich rein deskriptiv nicht deutlich zwischen den unterschiedlichen Typen. Der Anteil geringer Längsneigungen ist bei den funktionellen und passionierten Radfahrer*innen mit 90,0 % bzw. 97,7 % am höchsten. Auf Routen der ambitionierten und pragmatischen Typen liegen diese Anteile darunter (siehe Tabelle 43). Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen, dass geringe Längsneigungen bei allen Typen positiv auf die Routenwahl wirken. Am stärksten ist der Einfluss beim funktionellen Typ (Korrelationskoeffizient = 1,360). Am schwächsten fällt die Wirkung beim pragmatischen Typ aus (Korrelationskoeffizient = 0,717). Der positive Einfluss der Variable ist allerdings nur bei dem passionierten Typ statistisch gesichert (siehe Tabelle 44).

Tabelle 43 Medianwerte der Typen-spezifischen Modelle im Vergleich

Merkmal	Durchschnittswerte (Median)				
	Global-modell	Radfahrtyp-Modelle			
		ambitioniert	funktionell	passioniert	pragmatisch
Fahrtweite [km]	3,03	4,44	2,72	2,87	3,14
Maximale Längsneigung [%]	5,29	7,59	4,52	4,75	5,51
Längsneigung ≤ 2% [%]	88,6%	85,1%	90,0%	90,7%	87,3%
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	27,7%	25,0%	32,0%	26,8%	28,0%
Asphaltoberfläche [%]	58,7%	53,3%	61,1%	59,6%	60,3%
RV - Längsaufstellung [%]	18,8%	12,9%	20,3%	19,2%	21,8%
v_zul ≤ 30km/h [%]	18,4%	15,3%	19,5%	17,6%	20,4%
Durchschnittlicher DTV entlang einer Route [Kfz/Tag]	5.083	5.827	4.650	5.116	4.665
1 Richtungsfahrstreifen [%]	46,1%	44,9%	46,1%	46,7%	47,6%
DTV > 500 Rad/Tag [%]	41,6%	34,6%	42,1%	43,1%	46,5%
Geringe Fußverkehrsdichte [%]	4,4%	3,7%	4,2%	5,4%	4,1%
KP-Regelung RVL [n/km]	2,9	2,4	3,0	2,9	3,0
KP-Regelung durch LSA [n/km]	0,8	0,6	0,7	0,9	0,9
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	66,5	57,0	59,0	75,0	72,0
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	6,0	5,0	5,0	7,0	6,0
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	29,2%	25,5%	31,2%	32,2%	26,5%
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	9,9%	10,7%	12,3%	7,2%	11,4%

Werte im Vergleich: gering, mittel, hoch

Bei der Nutzung von **Radverkehrsinfrastruktur** ergeben sich ebenfalls Unterschiede zwischen den Radfahrtypen. Entlang der Routen der ambitionierten Typen waren die Streckenanteile mit Radverkehrsinfrastruktur am geringsten und die funktionellen Typen waren auf Routen unterwegs, auf denen durchschnittlich am meisten Infrastruktur vorhanden war (siehe Tabelle 43). Dies könnte auf eine stärkere Präferenz der funktionellen ggü. den anderen Radfahrtypen hinweisen, Routen mit Radverkehrsinfrastruktur zu wählen. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen jedoch, dass die Präferenz bei den ambitionierten Typen am stärksten und beim passionierten Typ am schwächsten ausgeprägt ist (siehe Tabelle 44). Der Einfluss der Radverkehrsinfrastruktur ist jedoch bei allen Typen sehr stark (Korrelationskoeffizienten zw. 4,640 und 6,970) und damit der wichtigste Einflussfaktor bei allen Typen. Das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur entlang einer Route hat also bei allen Typen einen stark positiven Einfluss auf die Wahl einer Route. Die Zusammenhänge sind zudem bei allen Typen statistisch gesichert.

Die **Oberflächenbeschaffenheit** hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Routenwahl aller Radfahrtypen. Durchschnittlich waren auf den Routen der funktionellen, passionierten und pragmatischen Typen etwa ähnlich große Anteile der Oberflächen mit Asphalt gedeckt (siehe Tabelle 43). Entlang der Routen des ambitionierten Typs liegt der Anteil mit 53,3 % deutlich niedriger. Die multivariate Analyse zeigt auf, dass sich das Vorhandensein einer guten Oberfläche über alle Radfahrtypen hinweg stark positiv auf die Routenwahl ausübt.

Eine gute Oberflächenbeschaffenheit wirkt beim funktionellen Typ am stärksten positiv auf die Auswahl einer Route (Korrelationskoeffizient = 3,510). Bei den anderen Typen fällt der Einfluss etwas schwächer aus (siehe Tabelle 44). Es ist also insgesamt eine starke Präferenz der Radfahr-Typen zu beobachten, asphaltgedeckte Oberflächen zu nutzen. Die Präferenzen der unterschiedlichen Typen sind zudem statistisch gesichert und damit signifikant.

Bei dem **ruhenden Verkehr** zeigen sich Unterschiede bei den Radfahr-Typen. Der durchschnittliche Anteil von ruhendem Verkehr entlang der Routen beträgt bei allen Typen um die 20 % (siehe Tabelle 43). Eine Ausnahme sind die ambitionierten Typen, entlang derer Routen der ruhende Verkehr durchschnittlich nur etwa 13 % beträgt. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen jedoch, dass hohe Anteile von ruhendem Verkehr entlang einer Route bei den verschiedenen Typen einen unterschiedlichen Einfluss auf die Wahl einer Route ausüben (siehe Tabelle 44). Allerdings sind die Ergebnisse für alle Typen statistisch nicht gesichert, wodurch keine gesicherten Aussagen zum Einfluss des ruhenden Verkehrs auf die Routenwahl unterschiedlicher Radfahr-Typen getroffen werden können. Zur Klärung bedarf es an dieser Stelle weitere Arbeiten und vertiefte Analysen.

Unterschiede der verschiedenen Radfahr-Typen ergeben sich ebenfalls bei den Routenanteilen, entlang derer die **maximal zulässige Geschwindigkeit des motorisierten Verkehrs** $\leq 30 \text{ km/h}$ ist. Entlang der Routen der funktionellen und pragmatischen Typen lag dieser Anteil bei rund 20 %. Der Anteil jener Streckenabschnitte fällt bei den ambitionierten und passionierten Typen mit 15,3 % und 17,6 % noch deutlich niedriger aus. Dies könnte ein Indiz sein, dass vor allem die funktionellen und pragmatischen Typen Routen mit geringeren Geschwindigkeiten des fließenden Verkehrs bevorzugen. Die Ergebnisse der multivariaten Analyse bestätigen dies für den pragmatischen Radfahr-Typ. Der Korrelationskoeffizient von 1,010 zeigt, dass sich höhere Streckenanteile mit einer maximal zulässigen Geschwindigkeit des motorisierten Verkehrs $\leq 30 \text{ km/h}$ stark positiv auf die Routenwahl auswirken. Der Zusammenhang ist statistisch gesichert und damit signifikant. Zu dem Einfluss der Variable auf die Routenwahl der anderen Typen (ambitioniert, funktionell, passioniert) kann keine statistisch gesicherte Aussage getroffen werden (siehe Tabelle 44). Dort wirkt sich die Variable negativ auf die Routenwahl aus, ist aber statistisch nicht signifikant.

Der **DTV_{Kfz}** ist entlang der gewählten Routen unterschiedlich ausgeprägt. Im Mittel lag er bei dem ambitionierten Typ mit 5.827 Kfz/Tag am höchsten, was auf eine höhere Toleranz diesen Typs ggü. hohen Kraftfahrzeugverkehrsstärken oder eine starke Orientierung am Hauptverkehrsnetz zurückzuführen sein könnte. Mit rund 4.650 Kfz/Tag ist der durchschnittliche DTV_{Kfz} entlang der Routen vom funktionellen Radfahr-Typ am niedrigsten. Dies könnte auf eine geringe Toleranz hoher Kraftfahrzeugverkehrsstärken entlang der Routen durch diesen Typ hindeuten. Dass die Werte der deskriptiven Statistik (siehe Tabelle 43) keine kausalen Zusammenhänge zu Ursache haben, wird aus der multivariaten Analyse deutlich. Sie zeigt auf, dass der DTV_{Kfz} bei allen Radfahr-Typen einen kaum feststellbaren, geringen negativen Einfluss auf die Routenwahl ausübt. Die Korrelationskoeffizienten liegen nahe Null (siehe Tabelle 44), sodass sie bei der Routenwahl nahezu keine Rolle spielen. Der analysierte Zusammenhang ist zudem bei allen Typen statistisch gesichert.

Höhere Streckenanteile, auf denen dem MV nur ein **Richtungsfahrstreifen** zur Verfügung steht, üben bei allen Radfahr-Typen einen positiven Einfluss auf die Routenwahl aus. Die Streckenanteile bewegen sich bei allen Typen auf einem ähnlich hohen Niveau – abgesehen von den ambitionierten Typen, deren Anteile mit 44,9 % leicht unterdurchschnittlich ausfallen (siehe Tabelle 43). Die multivariate Analyse zeigt, dass hohe Streckenanteile mit nur einem Fahrstreifen für den MV einen starken positiven Einfluss auf die Routenwahl aller Typen hat (siehe Tabelle 44). Die Stärke und Signifikanz des Einflusses unterscheidet sich jedoch zw. den unterschiedlichen Typen. Am stärksten ist der Einfluss der Variable auf die Routenwahl des pragmatischen und des passionierten Typs. Sie übt auch einen positiven Einfluss auf die Routenwahl der ambitionierten und funktionellen Radfahrenden aus – der Einfluss auf die Routenwahl ist jedoch statistisch nicht gesichert.

Tabelle 44 Modellkoeffizienten der Typen-spezifischen Modelle im Vergleich

Merkmal	Korrelationskoeffizient							
	Globalmodell	Radfahrtyp-Modelle						
		ambitioniert	funktionell	passioniert	Pragmatisch			
Konstante	0,789	0,731		0,662		0,840		0,822
Fahrtweite	0,255	0,371		0,497		0,125		0,129*
Maximale Längsneigung	-0,076	-0,083		-0,073		-0,052		-0,103
Längsneigung ≤ 2%	1,090	1,360*		1,540*		1,260		0,717*
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	5,720	6,970		6,530		4,640		5,840
Asphaltoberfläche	2,860	3,030		3,510		2,960		3,060
RV – Längsaufstellung	0,382	0,262*		0,913*		-0,006*		0,810*
v_zul ≤ 30km/h	0,131	-0,231*		-0,207*		-0,354*		1,010
Durchschnittlicher DTV des Kfz-Verkehrs entlang einer Route	-0,000	-0,000		-0,000		-0,000		-0,000
1 Richtungsfahrstreifen	1,880	0,340*		0,492*		2,000		2,430
DTV > 500 Rad/Tag	2,410	4,040		2,050		2,250		2,720
Geringe Fußverkehrsdichte	-1,290	-0,188*		-1,400*		-1,170*		-0,683*
KP-Regelung RVL	0,138	0,382		0,241		0,100*		0,012*
KP-Regelung durch LSA	0,270	0,122*		0,338*		0,223*		0,356
Unfallhäufigkeit	-0,004	-0,003*		-0,005		-0,004		-0,007
Häufigkeit kritischer Situationen	0,037	0,039		0,013*		0,079		0,006*
Umfeldnutzung Wohngebiet	0,492	0,540*		0,615*		1,760		2,360
Umfeldnutzung Grünfläche	1,600	0,070*		0,147*		1,630		-0,757*

Werte im Vergleich: positiv (größer), positiv (kleiner), kein Einfluss, negativ (kleiner), negativ (größer)

* statistisch nicht signifikant ($p\text{-value} \geq 0,05$)

Das Vorhandensein anderer Radfahrender entlang der Strecken hat einen starken positiven Einfluss auf die Routenwahl aller Radfahr-Typen. Die Streckenanteile, auf denen der $DTV_{Rad} > 500 \text{ Rad/Tag}$ ist, war bei allen Typen etwa gleich groß. Lediglich die ambitionierten Radfahr-Typen nutzten häufiger Routen, entlang derer weniger andere Radfahrende unterwegs waren (siehe Tabelle 43). Nichtsdestotrotz hat das Vorhandensein anderer Radfahrender entlang der Route bei allen Typen einen sehr starken positiven Einfluss auf die Routenwahl. Die multivariate Analyse ergibt für alle Radfahr-Typen hohe positive Korrelationskoeffizienten (siehe Tabelle 44), die alle statistisch gesichert sind. Der Einfluss gilt damit als signifikant.

Geringe Fußverkehrsdichten wirken sich bei der Routenwahl aller Radfahr-Typen negativ auf die Auswahlwahrscheinlichkeit aus. Die deskriptive Statistik zeigt bereits, dass entlang der Routen aller Typen im Mittel sehr geringe Anteile der Variable vorhanden sind (siehe Tabelle 43). Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen, dass geringe Fußverkehrsdichten einen unterschiedlich starken negativen Einfluss auf die Routenwahl der verschiedenen Radfahr-Typen ausüben (siehe Tabelle 44), dieser Einfluss jedoch für alle Typen statistisch nicht gesichert und damit nicht signifikant ist. Vermutlich sind die Ergebnisse, wie bereits in den vorigen Abschnitten angedeutet, stark durch die genutzten Daten (gewählter POI-Ansatz) beeinflusst.

Die durchschnittliche Anzahl **rechts-vor-links geregelter Knotenpunkte** unterschiedet sich zwischen dem funktionellen, dem passionierten und dem pragmatischen Radfahr-Typ nur marginal (siehe Tabelle 43). Sie passierten im Mittel rund 3,0 Knotenpunkte/km. Entlang der Routen des ambitionierten Typs konnten durchschnittlich deutlich weniger rechts-vor-links geregelte Knotenpunkte (2,4) beobachtet werden. Eine zunehmende Anzahl rechts-vor-links geregelter Knotenpunkte entlang einer Routen wirkt sich jedoch bei allen Wegezwecken positiv auf die Routenwahl aus. Der Einfluss ist beim ambitionierten (Korrelationskoeffizient = 0,382) und funktionellen Typ (Korrelationskoeffizient = 0,241) jedoch stärker ausgeprägt als bspw. beim passionierten Radfahr-Typ. Die Routenwahl des pragmatischen Typs wird kaum durch die Variable beeinflusst. Es ist jedoch

auch zu beachten, dass der identifizierte Einfluss nur beim ambitionierten sowie funktionellen Typ statistisch nicht gesichert ist (siehe Tabelle 44).

LSA geregelte Knotenpunkte haben auf die Routenwahl aller Radfahr-Typen einen positiven, wenngleich nicht immer signifikanten, Einfluss. Durchschnittlich wurden am meisten LSA-Knotenpunkte auf den Routen der passionierten und pragmatischen Radfahrenden passiert (0,9 KP/km). Dieser Wert lag bei dem ambitionierten und funktionellen Typen mit 0,6 KP/km und 0,7 KP/km etwas niedriger. Eine ansteigende Anzahl der auf einer Route befindlichen LSA-Knotenpunkte beeinflusst insgesamt die Routenwahl aller Typen positiv (siehe Tabelle 44). Der Einfluss ist jedoch nur für die Routenwahl des pragmatischen Typs signifikant und für die anderen Typen statistisch nicht gesichert.

Bzgl. der **objektiven und subjektiven Sicherheit** ergibt sich ein sehr fragmentiertes Bild. Die Variablen beeinflussen die Routenwahl nur marginal und zeigen sowohl im Vergleich mit dem Global-Modell als auch untereinander kaum Unterschiede auf. Zwar unterscheiden sich die Kennwerte der deskriptiven Statistik zu Unfallhäufigkeiten und kritischen Situationen deutlich zwischen den Typen (siehe Tabelle 43). Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen jedoch, dass die Einflüsse nur minimal und partiell statistisch gesichert sind. Die Unfallhäufigkeit übt insgesamt bei der Routenwahl aller Typen einen sehr schwachen negativen Einfluss aus (siehe Tabelle 44). Der analysierte Zusammenhang ist, außer für den ambitionierten Typ, für alle Typen signifikant. Die subjektive Sicherheit zeigt insgesamt einen schwachen positiven Einfluss auf die Routenwahl aller Typen. Die gefundenen Zusammenhänge sind jedoch nur für den ambitionierten und passionierten Typen signifikant, also statistisch gesichert.

Die Umfeldnutzung beeinflusst die Routenwahl der verschiedenen Typen unterschiedlich. Die Routen der funktionellen und passionierten Typen zeigen durchschnittlich höhere Anteile der Umfeldnutzung „Wohnen“ auf (31,2 % bzw. 32,2 %) als die Routen der ambitionierten (25,5 %) oder pragmatischen (26,5 %) Radfahr-Typen. Bei der Umfeldnutzung „Grünflächen“ sind die Unterschiede nicht so stark ausgeprägt (siehe Tabelle 43). Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen, dass die Umfeldnutzung „Wohnen“ insgesamt, also über alle Typen hinweg, einen positiven Einfluss auf die Routenwahl ausübt (siehe Tabelle 44). Der Einfluss der Variable ist bei den passionierten und pragmatischen Radfahrenden am stärksten ausgeprägt (Korrelationskoeffizient von 1,760 bzw. 2,360) und nur bei diesen Typen auch statistisch gesichert. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit bei der Routenwahl dieser beiden Typen an, wenn die Routen durch Wohngebiete führen. Bei der Umfeldnutzung „Grünfläche“ zeigt die Analyse der Routenwahl deutliche Unterschiede zwischen den Typen aus (siehe Tabelle 44). Grünflächen üben auf die Routenwahl der ambitionierten, funktionellen und pragmatischen Typen unterschiedlichen, aber insgesamt jeweils keinen signifikanten Einfluss aus. Demgegenüber führen ansteigende Anteile von Grünflächen entlang von Routen der passionierten Radfahr-Typen einen signifikanten und stark positiven Einfluss auf die Routenwahl aus (Korrelationskoeffizient = 1,630).

Die vollständigen Tabellen zur deskriptiven Statistik und den Modellkoeffizienten aller Einflussfaktoren können der Anlage 11 entnommen werden.

Die Analyseergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Die Routenwahl des **ambitionierten Radfahr-Typs** wird durch 8 von 17 Einflussfaktoren signifikant beeinflusst. Das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur sowie anderer Radfahrender entlang der Route und eine gute Oberflächenbeschaffenheit (Asphalt) wirken sich stark positiv auf die Routenwahl aus. Signifikant negative Einflüsse bestehen vor allem in einem großen maximalen Längsneigung sowie einer zunehmenden Distanz (Präferenz zur Nutzung der kürzesten Route).

Für die Routenwahl des **funktionellen Typs** konnten insgesamt ebenfalls acht signifikante Einflussfaktoren identifiziert werden (8 von 17 Variablen). Das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur, eine gute Oberflächenbeschaffenheit (Asphalt) sowie das Vorhandensein anderer Radfahrender entlang der Route wirken sich – ebenso wie beim ambitionierten Typ – stark positiv auf die Routenwahl aus. Ein signifikant negativer, wenngleich sehr schwacher, Einfluss konnte nur für eine große maximale Längsneigungen sowie die Unfallhäufigkeit entlang der Route nachgewiesen werden.

Die Routenwahl des **passionierten Radfahr-Typs** wird durch 12 von 17 Einflussfaktoren signifikant beeinflusst. Für diesen Typ spielen geringe Längsneigungen, das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur, eine gute Oberflächenqualität, eine geringe Anzahl von Richtungsfahrstreifen für den MV, das Vorhandensein anderer Radfahrender entlang der Route sowie Wohn- und Grünflächen im Umfeld der Route eine besondere Rolle. All diese Faktoren beeinflussen die Routenwahl dieses Typs signifikant und stark positiv. Auf ansteigende Fahrtweiten reagieren passionierte Radfahrende offenbar sensibler als die vorher beschriebenen Typen, da sie eine noch stärkere Präferenz zur Nutzung der kürzesten Route aufzeigen. Die maximal Längsneigung sowie eine höhere Unfallhäufigkeit entlang der Route wirken sich negativ auf deren Routenwahl aus.

Für die Routenwahl des **pragmatischen Typs** konnten insgesamt zehn signifikante Einflussfaktoren identifiziert werden (10 von 17). Eine starke und signifikant positive Wirkung üben die folgenden Variablen auf die Routenwahl dieses Typs aus: das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur, eine gute Oberflächenqualität, geringe zugelassene Maximalgeschwindigkeiten des Kfz-Verkehrs, das Vorhandensein von anderen Radfahrenden und nur einem Richtungsfahrstreifen für dem MV sowie Wohngebiet im Umfeld der Route. Ein signifikant negativer Einfluss konnte nur für eine große maximale Längsneigung sowie eine hohe Unfallhäufigkeit entlang der Route nachgewiesen werden.

Die Resultate der unterschiedlichen Modelle sind differenziert zu betrachten. Sie zeigen, dass nicht für alle Einflussfaktoren statistisch gesicherte Zusammenhänge festgestellt werden können. Dies ist vermutlich auf die Anzahl der Fahrten zurückzuführen, die von den unterschiedlichen Radfahr-Typen erhoben wurden. Zum anderen kann hinterfragt werden, ob die in der Studie RadVerS identifizierten Radfahr-Typen für die Analyse der Routenwahl geeignet sind oder ob sich anhand der Routenwahl nicht viel mehr eigene Typen bilden ließen.

6.2 Vereinfachte Modelle für Dresden, Darmstadt und München

Ausgehend von den vorigen Ergebnissen werden für die vereinfachten Modelle nur die entscheidenden Variablen in die Analyse aufgenommen. Aus Abbildung 57 ist ersichtlich, dass die folgenden Variablen den Großteil der Routenwahl erklären:

- Radverkehrsinfrastruktur
- geringe Längsneigungen ($\leq 2\%$)
- Max. Längsneigung
- Oberflächenqualität
- Fahrtweite
- Radverkehrsaufkommen
- DTV_{Kfz}

Die aufgelisteten Variablen erklären zusammen rund 97,8% der Routenwahl (in Dresden) und sollen daher für die vereinfachten Modelle berücksichtigt werden. Die Variable DTV_{Kfz} wird aus dem Sample herausgenommen (daher leicht ausgegraut) und nicht weiter berücksichtigt, weil sie in den bisherigen Modellen zwar einen signifikanten Einfluss auf die Routenwahl ausübte, der Einfluss jedoch durchgängig etwa Null beträgt. Darüber hinaus ist die Erhebung flächendeckender Daten zum DTV_{Kfz} für die meisten Kommunen nur selten zu realisieren. Die für die vereinfachten Modelle verbleibenden Variablen sind hingegen relativ einfach zu erheben (Radverkehrsinfrastruktur, Oberflächenqualität), aus bestehenden Quellen wie bspw. [OpenStreetMap](#), [SRTM-Höhendaten](#) oder den [MOVEBIS-Daten](#) zu exportieren (Angebotsnetz, Längsneigungen, Radverkehrsaufkommen, Oberflächen- und Infrastrukturdaten) und zu validieren oder mit gängiger Software wie QGIS, ArcGIS, VISUM usw. zu berechnen (Fahrtweite).

Dresden

Die deskriptive Statistik der gewählten Routen und deren Alternativen unterscheidet sich beim Routenwahlmodell mit dem reduzierten Variablen-Set nicht von den Beschreibungen für das differenzierte Modell für Dresden. Für die Beschreibung sei daher auf die obigen Abschnitte (siehe Abschnitt 5.1) verwiesen.

Die Ergebnisse der Analyse der Routenwahl mit dem reduzierten Variablen-Set sind in Tabelle 45 aufgeführt. Es wird deutlich, dass die Einflussfaktoren der Routenwahl im vereinfachten Analysemodell denen des differenzierten ähneln (der dedizierte Vergleich folgt später in Abschnitt 6.3).

Tabelle 45 Ergebnisse der Modellschätzung für Dresden

Parameter	Value	Std. err.	t-test	p-value	Robust Std. err.	Robust t-test	p-value
Konstante (Best-Weg)	0,807	0,049	16,540	0,000	0,050	16,140	0,000
Fahrtweite	0,253	0,039	6,550	0,000	0,039	6,440	0,000
Radverkehrsinfrastruktur	4,150	0,221	18,790	0,000	0,227	18,240	0,000
geringe Längsneigungen ($\leq 2\%$)	1,330	0,383	3,470	0,000	0,324	4,100	0,000
Max. Längsneigung	-0,073	0,007	-10,370	0,000	0,007	-10,930	0,000
Oberflächenqualität	4,680	0,196	23,860	0,000	0,202	23,160	0,000
Radverkehrsaufkommen	2,080	0,180	11,530	0,000	0,183	11,340	0,000

Die **Fahrtweite** hat in dem vorliegenden Modell einen signifikanten Einfluss auf die Routenwahl. Es zeigt sich eine Präferenz der Radfahrenden zur Nutzung der kürzesten Route (siehe positive Konstante), die statistisch signifikant ist (p-value = 0,000). Wird von der kürzesten Route abgewichen, so wirkt sich die Distanz leicht positiv auf die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient der Variable „Fahrtweite“ ist 0,253 und dessen Signifikanz ist statistisch gesichert (p-value = 0,000). Die Distanz beeinflusst die Routenwahl beim Abweichen vom kürzesten Weg demzufolge positiv. Wird einmal von der kürzesten Route abgewichen, so sind die Radfahrenden offensichtlich bereit, auch etwas weitere Wege in Kauf zu nehmen.

Das Vorhandensein von **Radverkehrsinfrastruktur** übt einen starken positiven Einfluss auf die Routenwahl aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist 4,150. Mit einem zunehmenden Anteil von Streckenabschnitten, die über Radverkehrsinfrastruktur verfügen, steigt dementsprechend deren Nutzen für die Radfahrenden und die Wahlwahrscheinlichkeit einer Route stark an. Die Signifikanz der Variable (p-value = 0,000) zeigt auf, dass der Einfluss statistisch signifikant ist.

Die **Längsneigung** entlang einer Route besitzt ebenfalls einen wesentlichen und statistisch signifikanten Einfluss auf die Routenwahl. Sowohl die maximal auftretenden Längsneigung als auch die Streckenanteile mit geringen Längsneigungen (LN $\leq 2\%$) weisen eine statistisch gesicherte Wirkung auf (p-value = 0,000). Die **maximal vorhandene Längsneigung** entlang einer Route übt sich leicht negativ auf die Auswahl einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist -0,073 und führt somit zu einer etwas geringeren Wahlwahrscheinlichkeit einer Route mit höheren maximalen Längsneigungen. Der Einfluss von Streckenabschnitten mit einer **Längsneigung < 2 %** ist hingegen deutlich stärker ausgeprägt. Höhere Routenanteile mit einer Längsneigung < 2 % üben sich positiv auf die Wahl einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist 1,330 und führt somit zu einem Anstieg des Nutzens und der Wahlwahrscheinlichkeit einer Route, wenn sich der Streckenanteil einer Route mit einer Längsneigung < 2 % erhöht. Die Längsneigung zeigt insgesamt also einen wesentlichen Einfluss auf die Routenwahl.

Die **Oberflächenbeschaffenheit** einer Route ist ein wesentlicher Einflussfaktor der Routenwahl. Höhere Anteile des Oberflächentyps „Asphalt“ entlang einer Route beeinflussen die Wahl einer Route stark positiv. Der Korrelationskoeffizient für die Variable beträgt 4,680 und führt damit zu einem sehr starken Anstieg der Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route, wenn der Anteil der Route mit asphaltgedeckten Streckenabschnitten ansteigt. Die Signifikanz (p-value = 0,000) zeigt zudem an, dass der Einfluss der Variable statistisch signifikant ist.

Die **Radverkehrsstärke** entlang einer Route, die das Vorhandensein weiterer Radfahrender abbildet, übt im analysierten Datensatz ebenfalls einen starken und signifikant positiven Einfluss auf die Routenwahl aus. Der

Korrelationskoeffizient der Variable ist mit 2,080 sehr hoch und stellt den drittstärksten Einflussfaktor der Routenwahl dar. Ein steigender Anteil von Streckenabschnitten entlang der Route, auf denen viele andere Radfahrende fahren führt zu einer ansteigenden Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route. Die Variable ist mit einer Signifikanz von 0,000 (p-value) zudem hochsignifikant.

Darmstadt

Radfahrende

Insgesamt haben 391 Proband*innen an der Datenerhebung im Rahmen der Aktion STADTRADELN in Darmstadt teilgenommen. Etwas mehr als die Hälfte der Teilnehmenden waren Männer ($n = 217$). Der Frauenanteil der Stichprobe liegt bei knapp 37 % ($n = 143$). Rund 8 % der Radfahrenden hat bei der Registrierung zur Aktion STADTRADELN kein Geschlecht angegeben (k. A.). Die Geschlechterverteilung ist in Abbildung 60 dargestellt.

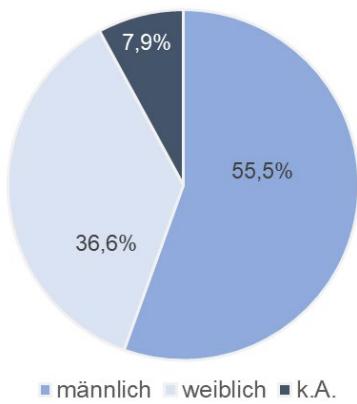


Abbildung 60 Geschlechterverteilung der Stichprobe ($n = 391$)

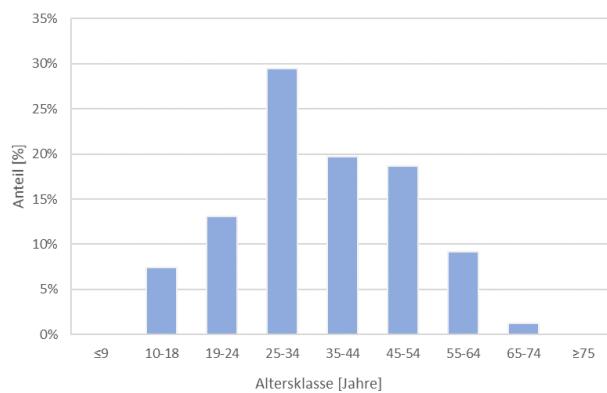


Abbildung 61 Altersverteilung der Stichprobe ($n = 391$)

Die Proband*innen haben im Rahmen der Erhebung ein Geburtsjahr angegeben, aus dem jeweils das Alter berechnet wurde. Das Durchschnittsalter der Radfahrenden in der Stichprobe beträgt 36,4 Jahre (Mittel) bzw. 34,0 Jahre (Median). Die jüngsten Teilnehmenden waren 11 Jahre alt – die ältesten Proband*innen 67 Jahre. Es ergibt sich eine Streuung des Alters von 56 Jahren. Die Standardabweichung beträgt 13,0 Jahre. Die Altersverteilung der Stichprobe in Altersklassen ist Abbildung 61 dargestellt.

Fahrten

Bei den 4.479 im Datensatz vorliegenden Fahrten wurden insgesamt rund 17.300 km zurückgelegt. Die aufgezeichneten Fahrten decken das gesamte Verkehrsnetz der Stadt Darmstadt ab. In Abbildung 62 sind die auf das Verkehrsnetz projizierten Fahrten (Verkehrsmengen) dargestellt. Sie vermittelt einen Eindruck der Abdeckung des Darmstädter Verkehrsnetzes. Es wird deutlich, dass nahezu das gesamte innerstädtische Verkehrsnetz von den Radfahrenden genutzt wurde. Die Fahrten sind dabei unterschiedlich im Verkehrsnetz verteilt. Stark frequentierte Streckenabschnitte befinden sich vor allem im Hauptverkehrsnetz und auf den Rad-Hauptrouten. Strecken im Nebennetz sind weniger stark frequentiert. Die meisten Fahrten wurden an Werktagen aufgezeichnet (rund 90%). Es ist davon auszugehen, dass dementsprechend viele Alltagsfahrten (Wegezweck: Arbeiten, Einkaufen) im Datensatz vorhanden sind.



Die **Fahrtweiten** der zurückgelegten Routen sind sehr unterschiedlich ausgeprägt. Die durchschnittliche Fahrtweite der aufgezeichneten Routen beträgt 3,9 km (Mittelwert) bzw. 2,5 km (Median). Es wurden jedoch auch sehr kurze Fahrten (min. 280 m) sowie sehr lange Fahrten (maximal 30,5 km) zurückgelegt. Dies ergibt eine Streuung von 30,2 km. Die Fahrtweitenverteilung der aufgezeichneten Radfahrten ist in Abbildung 63 dargestellt. Aus der dargestellten Fahrtweitenverteilung wird deutlich, dass die meisten Fahrten auf kurzen Distanzen zurückgelegt wurden. Am häufigsten wurden Fahrten mit einer Länge zwischen ein und zwei Kilometern zurückgelegt.

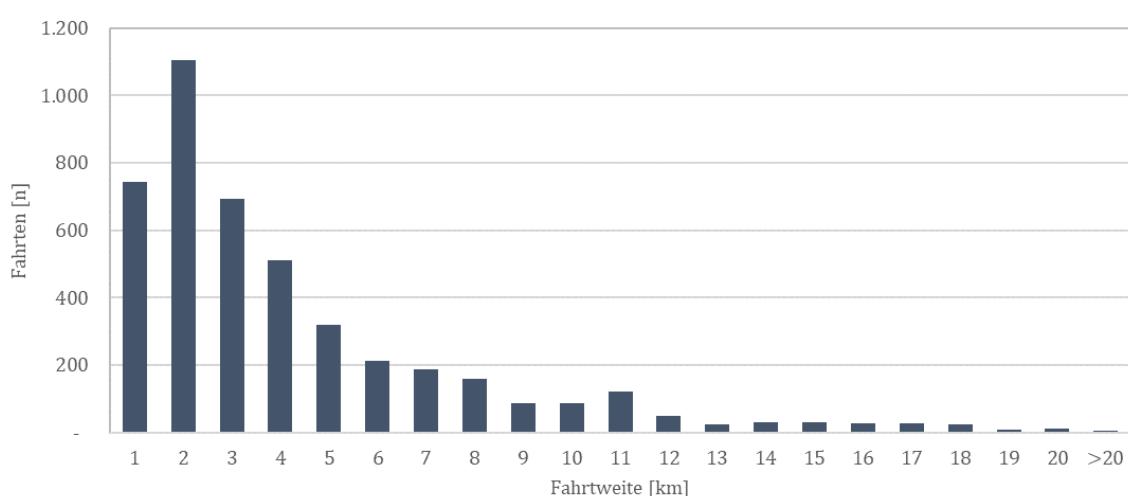


Abbildung 63 Fahrtweitenverteilung in Darmstadt

Die Proband*innen entschieden sich bei der Wahl ihrer Route offensichtlich nicht immer für die kürzest mögliche Route. Nur etwa die Hälfte aller gewählten Routen (50,5%) entsprachen gleichzeitig die kürzest mögliche Route auf einer Relation. Die Radfahrenden nutzen jedoch fast genauso häufig Routen, die nicht dem kürzesten Weg entsprachen.

Auf den von den Radfahrenden gewählten Routen verfügten im Mittel nur rund 16,4 % (Mittelwert) bzw. 12,9 % (Median) der Strecken über **Radverkehrsinfrastruktur**. Die Radfahrenden wählten auch Routen, entlang derer keine Radverkehrsinfrastruktur vorhanden war (0 %). Es konnten jedoch auch Routen beobachtet werden, auf

denen zum größten Teil Radverkehrsinfrastruktur bzw. markierte Radfahr- bzw. Schutzstreifen vorhanden waren (Maximum = 86,1 %).

Die **maximale Längsneigung**, die die Radfahrenden auf einem Teilabschnitt entlang einer Route zu überwinden hatten, beträgt im Durchschnitt rund 16,8 % (Mittelwert) bzw. 14,0 % (Median). Es konnte zudem eine maximale Längsneigung von Streckenabschnitten von rund 136 % beobachtet werden. Es handelt sich dabei aber um Einzelfälle. Die leicht erhöhten mittleren Werte der max. Längsneigung haben einen topographischen Hintergrund und sind auf das Relief zurückzuführen.

Die Betrachtung der Anteile mit einer **Längsneigungen < 2 %** entlang der Routen offenbart allgemein sehr hohe Anteile sowie eine geringe Streuung. Die durchschnittlichen Anteile von Streckenabschnitten mit geringen Längsneigungen fallen mit 85,5 % (Mittel) bzw. 86,2 % (Median) hoch aus. Es wurden auch Routen genutzt, auf denen fast die gesamte Strecke sehr geringe Längsneigungen aufwies (Max. = 99,9 %). Der Streckenanteil liegt insgesamt nie unter 50 % (Min. = 51,2 %).

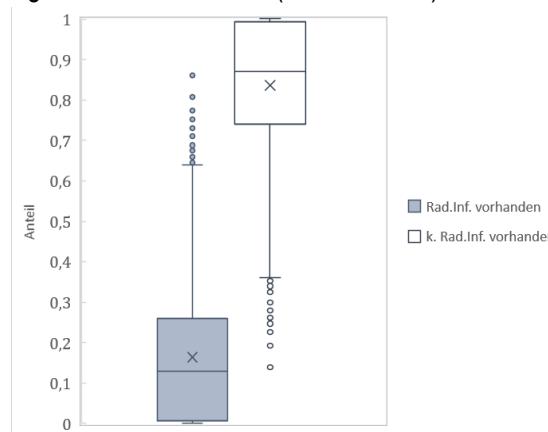


Abbildung 64 Routenanteile mit Radverkehrsinfrastruktur

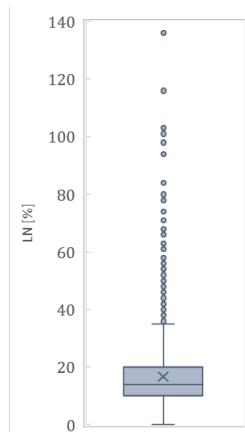


Abbildung 65 Verteilung der maximalen Längsneigung

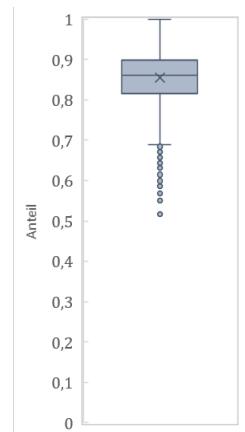


Abbildung 66 Verteilung der Längs-neigung ≤ 2%

Die **Oberflächenqualität** der genutzten Routen weist eine hohe Streuung auf. Entlang der gewählten Routen besitzen im Durchschnitt nur rund 27,3 % (Mittelwert) bzw. 21,7 % (Median) der Streckenabschnitte eine asphaltierte Oberfläche. Es existieren sowohl Routen, die gänzlich auf einer asphaltierten Oberfläche zurückgelegt wurden (Max. = 100%), als auch Routen, auf denen kein Netzabschnitt über eine derartige Oberfläche verfügte (Min. = 0%).

Die Betrachtung der **Radverkehrsstärken** zeigt eine ausgeglichene Verteilung. Im Durchschnitt lag der DTV_{Rad} auf rund 50,1 % (Mittel) bzw. 52,9 % (Median) der Strecken der gewählten Routen über 500 Radfahrende/Tag. Das bedeutet, dass die Radfahrenden Routen gewählt haben, auf denen größtenteils auch viele andere Radfahrende unterwegs waren. Es wurden jedoch ebenso Routen mit einem sehr geringen DTV_{Rad} (Min. = 0 %) sowie einem sehr hohen DTV_{Rad} (Max. = 100 %) gewählt.

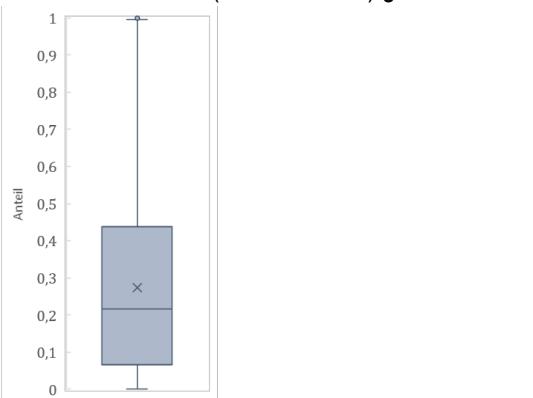


Abbildung 67 Routenanteile mit Asphaltoberfläche

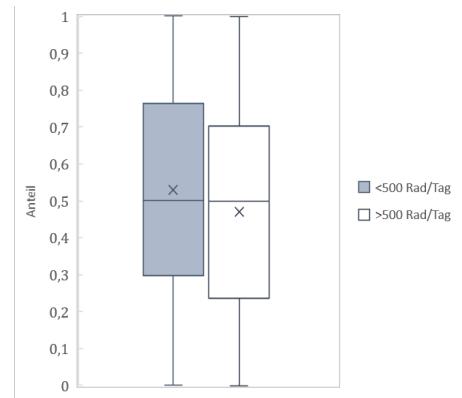


Abbildung 68 Box-Plot zum DTV_{Rad} entlang der gewählten Routen

Die Ergebnisse der multivariaten Analyse zeigen die kausalen Zusammenhänge und die Wirkung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Routenwahl in Darmstadt. Die Resultate der Modellschätzung sind in Tabelle 46 dargestellt.

Tabelle 46 Ergebnisse der Modellschätzung für Darmstadt

Parameter	Value	Std. err.	t-test	p-value	Robust Std. err.	Robust t-test	p-value
Konstante (Best-Weg)	0,893	0,045	20,040	0,000	0,045	19,940	0,000
Fahrtweite	0,750	0,054	13,980	0,000	0,049	15,300	0,000
Radverkehrsinfrastruktur	3,000	0,239	12,550	0,000	0,240	12,490	0,000
geringe Längsneigungen ($\leq 2\%$)	5,060	0,677	7,470	0,000	0,691	7,320	0,000
Max. Längsneigung	-0,028	0,004	-7,460	0,000	0,004	-7,480	0,000
Oberflächenqualität	1,410	0,157	8,980	0,000	0,160	8,770	0,000
Radverkehrsaufkommen	3,920	0,168	23,340	0,000	0,175	22,370	0,000

Die **Fahrtweite** hat in dem vorliegenden Modell einen signifikanten Einfluss auf die Routenwahl. Es zeigt sich eine Präferenz der Radfahrenden zur Nutzung der kürzesten Route (positive Konstante), die statistisch gesichert, also signifikant ist (p-value = 0,000). Wird von der kürzesten Route abgewichen, so wirkt sich eine zunehmende Distanz leicht positiv auf die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route aus. Weichen die Radfahrenden von der kürzesten Route ab, so sind sie offensichtlich bereit, auch etwas weitere Wege in Kauf zu nehmen. Der Korrelationskoeffizient der Variable „Fahrtweite“ beträgt 0,750. Der Einfluss ist zudem signifikant. (p-value = 0,000).

Das Vorhandensein von **Radverkehrsinfrastruktur** übt einen starken positiven Einfluss auf die Routenwahl aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable beträgt 3,000. Mit einem zunehmenden Anteil von Streckenabschnitten, die über Radverkehrsinfrastruktur verfügen, steigt dementsprechend deren Nutzen für die Radfahrenden und die Wahlwahrscheinlichkeit einer Route stark an. Der Einfluss der Variable ist zudem statistisch signifikant (p-value = 0,000).

Die **Längsneigung** entlang einer Route besitzt ebenfalls einen wesentlichen sowie statistisch signifikanten Einfluss auf die Routenwahl. Sowohl die maximal auftretenden Längsneigung als auch die Streckenanteile mit geringen Längsneigungen (LN $\leq 2\%$) weisen einen signifikanten Einfluss auf (p-value = 0,000). Eine Zunahme der **maximal vorhandenen Längsneigung** übt sich rudimentär negativ auf die Auswahl einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist -0,028 und führt somit zu einer etwas geringeren Wahlwahrscheinlichkeit einer Route mit höheren maximalen Längsneigungen. Der Einfluss von Streckenabschnitten mit einer **Längsneigung < 2 %** ist hingegen deutlich stärker ausgeprägt. Höhere Streckenanteile mit einer Längsneigung < 2 % üben sich stark positiv auf die Wahl einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist 5,060 und führt somit zu einem starken Anstieg des Nutzens und der Wahlwahrscheinlichkeit einer Route, wenn sich der Streckenanteil einer Route mit einer Längsneigung < 2 % erhöht. Die Längsneigung zeigt insgesamt also einen wesentlichen Einfluss auf die Routenwahl.

Die **Oberflächenbeschaffenheit** einer Route stellt ebenfalls einen wesentlichen Einflussfaktor der Routenwahl dar. Höhere Anteile des Oberflächentyps „Asphalt“ entlang einer Route beeinflussen die Wahl einer Route positiv. Dies wird bei der Betrachtung des Korrelationskoeffizienten (1,410) ersichtlich. Der Einfluss ist zudem statistisch gesichert (p-value = 0,000). Demnach erhöhen große Streckenanteile mit Asphaltdecke die Wahrscheinlichkeit der Auswahl einer Route.

Die **Radverkehrsstärke** entlang einer Route zeigt im analysierten Datensatz ebenfalls einen starken und signifikant positiven Einfluss. Der Korrelationskoeffizient der Variable ist mit 3,920 sehr hoch und stellt den zweitstärksten Einflussfaktor der Routenwahl dar. Ein steigender Anteil von Streckenabschnitten entlang der Route, auf denen weitere Radfahrende unterwegs sind, führt demnach zu einer stark ansteigenden Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route. Die Variable ist mit einer Signifikanz von 0,000 (p-value) zudem hochsignifikant.

München

Radfahrende

In München haben insgesamt 1.350 Proband*innen an der Datenerhebung im Rahmen der Aktion STADTRADELN 2019 teilgenommen. Mit 710 Teilnehmenden waren etwas mehr als die Hälfte der Radfahrenden Männer (52,6 %). Der Frauenanteil der Stichprobe liegt mit n = 592 bei rund 43,9 %. Etwa 3,6 % der Radfahrenden hat bei der Registrierung zur Aktion STADTRADELN kein Geschlecht angegeben (k. A.). Die Geschlechterverteilung ist in Abbildung 69 dargestellt.

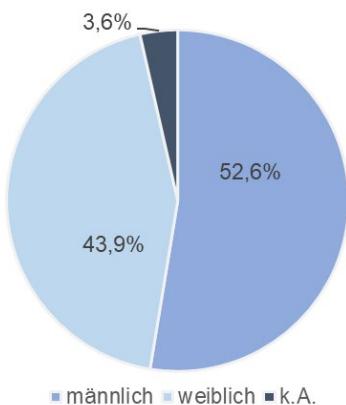


Abbildung 69 **Geschlechterverteilung der Stichprobe
(n = 1.350)**

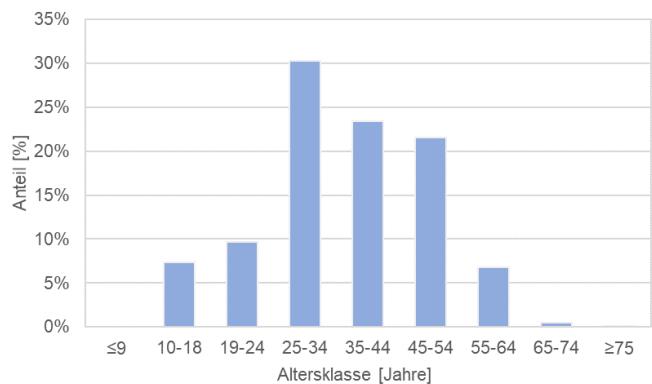


Abbildung 70 **Altersverteilung der Stichprobe (n = 1.350)**

Das Durchschnittsalter der Radfahrenden in der Stichprobe beträgt 36,5 Jahre (Mittel) bzw. 36,0 Jahre (Median). Die jüngsten Teilnehmenden waren 11 Jahre alt – die ältesten Proband*innen 75 Jahre. Es ergibt sich daraus eine Streuung des Alters von 64 Jahren. Die Standardabweichung beträgt 12,3 Jahre. Die Altersverteilung der Stichprobe in Altersklassen ist Abbildung 70 dargestellt.

Fahrten

Bei den 10.630 im Datensatz vorliegenden Fahrten wurden insgesamt rund 57.600 km zurückgelegt. In Abbildung 71 sind die auf das Verkehrsnetz projizierten Fahrten (Verkehrsmengen) dargestellt. Sie vermittelt einen Eindruck der Abdeckung des Münchener Verkehrsnetzes. Es wird deutlich, dass nahezu das gesamte städtische Verkehrsnetz von den Radfahrenden genutzt wurde. Die Fahrten sind dabei unterschiedlich im Verkehrsnetz verteilt. Stark frequentierte Streckenabschnitte befinden sich vor allem im Hauptverkehrsnetz und auf den Rad-Hauptrouten. Strecken im Nebennetz sind weniger stark frequentiert, treten aber dennoch hervor. Rund 87,7% aller Fahrten wurden an Werktagen aufgezeichnet (n = 9.320). Es ist davon auszugehen, dass dementsprechend viele Alltagsfahrten (Wegezweck: Arbeiten, Einkaufen) im Datensatz vorhanden sind.

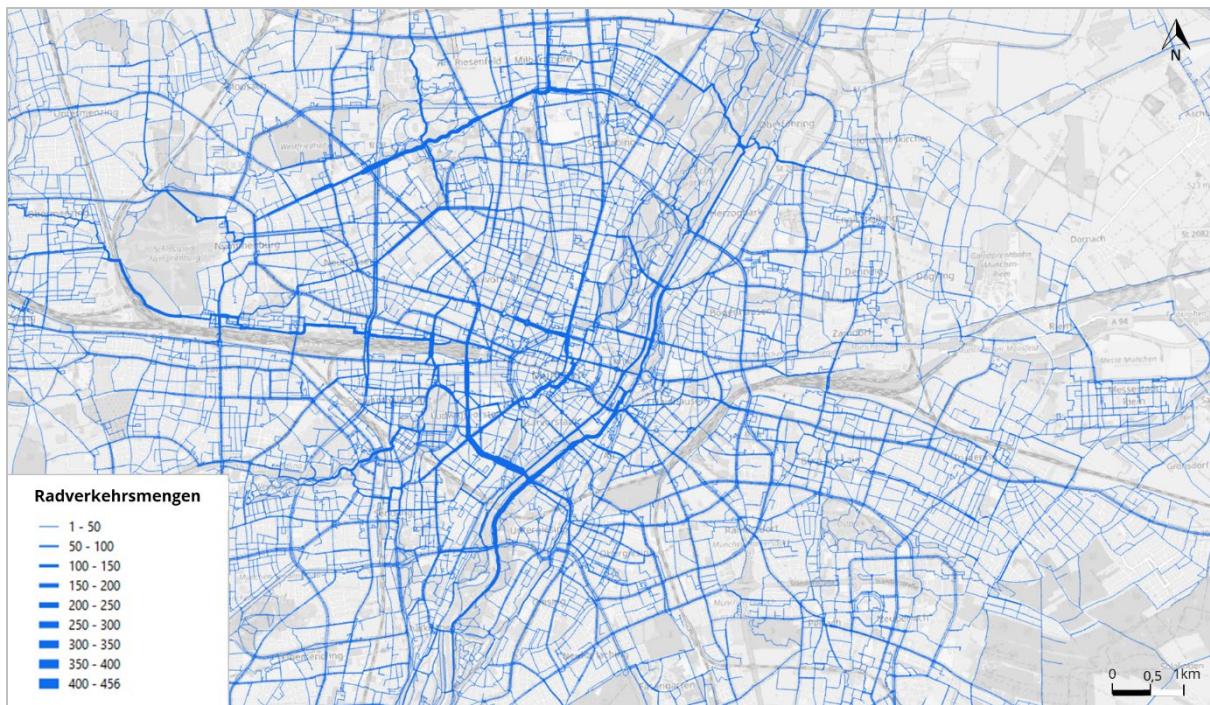


Abbildung 71 Aggregierte Fahrten (Verkehrsmengen) im Verkehrsnetz von München (N=10.630 Fahrten)

Die **Fahrtweiten** der zurückgelegten Routen sind sehr unterschiedlich ausgeprägt. Die durchschnittliche Fahrtweite der aufgezeichneten Routen beträgt 5,4 km (Mittelwert) bzw. 4,2 km (Median). Es wurden jedoch auch sehr kurze Fahrten (min. 240 m) sowie sehr lange Fahrten (max. 43,9 km) zurückgelegt. Dies ergibt eine Streuung von 43,7 km. Die Fahrtweitenverteilung der aufgezeichneten Radfahrten ist in Abbildung 72 dargestellt. Aus der dargestellten Fahrtweitenverteilung wird deutlich, dass die meisten Fahrten auf kurzen Distanzen zurückgelegt wurden. Am häufigsten wurden Fahrten mit einer Länge zwischen ein und zwei Kilometern zurückgelegt.

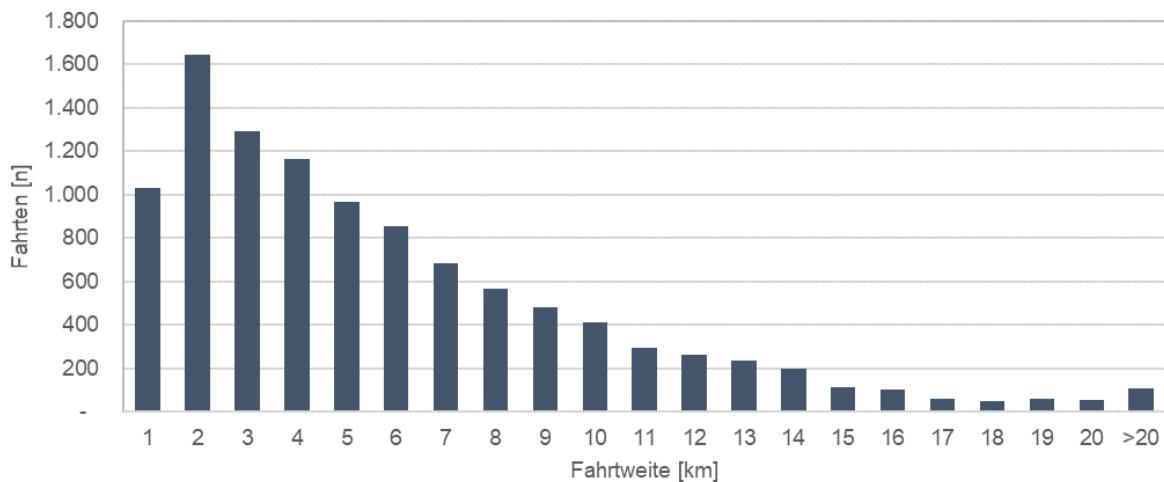


Abbildung 72 Fahrtweitenverteilung in München

Die Proband*innen entschieden sich bei der Wahl ihrer Route offensichtlich nicht immer für die kürzest mögliche Route. Nur auf 40,0 % aller Wege wurde die kürzest mögliche Route auf einer Relation gewählt. Die Radfahrenden nutzten in Summe also öfter Routen, die nicht dem kürzesten Weg entsprachen. Etwa 27,7 % der gewählten Routen stellten die zweit kürzeste Route dar. Auf 32,4 % der Wege wurde die dritt kürzeste Route genutzt.

Auf den von den Radfahrenden gewählten Routen verfügten im Mittel nur rund 37,8 % (Mittelwert) bzw. 40,5 % (Median) der Strecken über **Radverkehrsinfrastruktur**. Die Radfahrenden wählten auch Routen, entlang derer keine Radverkehrsinfrastruktur vorhanden war (Min. = 0 %). Ebenso nutzten sie Routen, entlang derer fast vollständig Radverkehrsinfrastruktur bzw. markierte Radwege vorhanden waren (Max. = 98,5 %).

Die **maximalen Längsneigung**, die die Radfahrenden auf einem Teilabschnitt entlang einer Route zu überwinden hatten, beträgt im Durchschnitt rund 18,4 % (Mittelwert) bzw. 15,0 % (Median). Es konnte zudem eine maximale Längsneigung von Streckenabschnitten von rund 104 % beobachtet werden. Es handelt sich dabei aber um Einzelfälle. Die leicht erhöhten mittleren Werte der max. Längsneigung haben einen topographischen Hintergrund und sind auf das Relief zurückzuführen.

Die Betrachtung der Anteile mit einer **Längsneigungen < 2 %** entlang der Routen offenbart allgemein sehr hohe Anteile sowie eine geringe Streuung. Die durchschnittlichen Anteile von Streckenabschnitten mit geringen Längsneigungen fallen mit 84,6 % (Mittel) bzw. 85,1 % (Median) hoch aus. Es wurden auch Routen genutzt, auf denen fast die gesamte Strecke sehr geringe Längsneigungen aufwies (Max. = 99,9 %). Der Streckenanteil liegt insgesamt nie unter 35,6 % (Minimum).

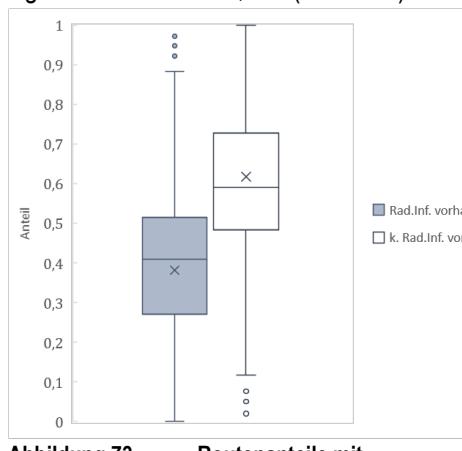


Abbildung 73

Routenanteile mit Radverkehrsinfrastruktur

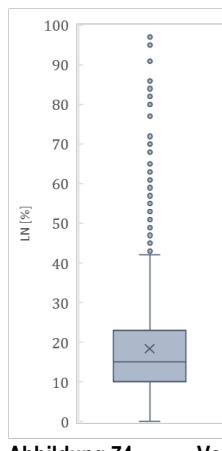


Abbildung 74

Verteilung maximalen Längsneigung

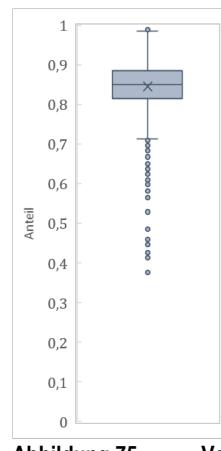


Abbildung 75

Verteilung der Längsneigung ≤ 2%

Die **Oberflächenqualität** der genutzten Routen weist eine hohe Streuung auf. Entlang der gewählten Routen besitzen im Durchschnitt rund 56,8 % (Mittelwert) bzw. 59,0 % (Median) der Streckenabschnitte eine asphaltierte Oberfläche. Es existieren sowohl Routen, die gänzlich auf einer asphaltierten Oberfläche zurückgelegt wurden (Max. = 100%), als auch Routen, auf denen kein Netzabschnitt über eine derartige Oberfläche verfügte (Min. = 0%). Die Betrachtung der **Radverkehrsstärken** zeigt eine ausgeglichene Verteilung. Im Durchschnitt lag der DTV_{Rad} auf rund 49,3 % (Mittel) bzw. 42,4 % (Median) der Strecken der gewählten Routen über 500 Radfahrende/Tag. Das bedeutet, dass die Radfahrenden Routen gewählt haben, auf denen meist auch viele andere Radfahrende unterwegs waren. Es wurden jedoch ebenso Routen mit einem sehr geringen DTV_{Rad} (Min. = 0 %) sowie einem sehr hohen DTV_{Rad} (Max. = 100 %) gewählt.

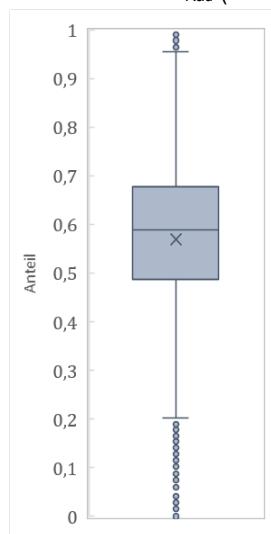


Abbildung 76

Routenanteile mit Asphaltoberfläche

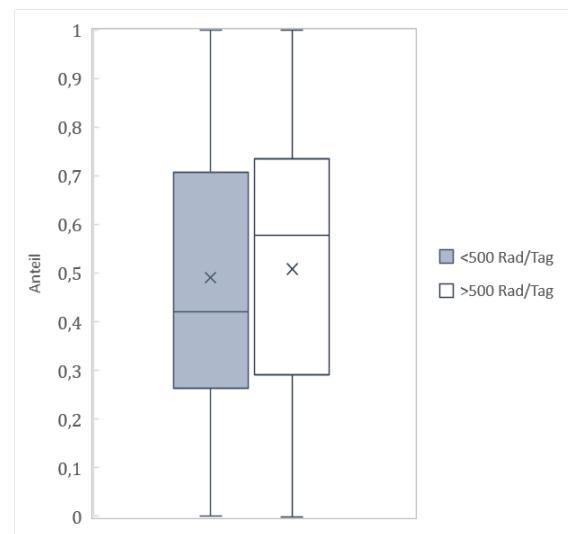


Abbildung 77

Box-Plot zum DTV_{Rad} entlang der gewählten Routen

Die Ergebnisse der multivariaten Analyse sind in Tabelle 47 dargestellt. Es zeigt sich, dass die **Fahrtweite** in dem vorliegenden Modell einen signifikanten Einfluss auf die Routenwahl ausübt. Es zeigt sich eine Präferenz der Radfahrenden zur Nutzung der kürzesten Route (siehe Konstante), die statistisch signifikant ist (p-value = 0,000). Wird von der kürzesten Route abgewichen, so wirkt sich eine zunehmende Distanz sogar leicht positiv auf die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient der Variable „Fahrtweite“ ist mit 0,939 recht hoch. Die Wirkung ist zudem statistisch gesichert (p-value = 0,000). Die Distanz beeinflusst die Routenwahl beim Abweichen vom kürzesten Weg demzufolge positiv. Wird einmal von der kürzesten Route abgewichen, so sind die Radfahrenden offensichtlich bereit, auch längere Routen zu wählen.

Tabelle 47 Ergebnisse der Modellschätzung für München

Parameter	Value	Std err	t-test	p-value	Robust Std err	Robust t-test	p-value
Konstante (Best-Weg)	0,671	0,037	18,010	0,000	0,038	17,730	0,000
Fahrtweite	0,939	0,044	21,420	0,000	0,037	25,420	0,000
Radverkehrsinfrastruktur	2,510	0,140	17,880	0,000	0,152	16,510	0,000
geringe Längsneigungen ($\leq 2\%$)	1,280	0,426	3,010	0,000	0,420	3,050	0,000
Max. Längsneigung	0,009	0,003	3,660	0,000	0,002	4,200	0,000
Oberflächenqualität	3,200	0,137	23,310	0,000	0,147	21,830	0,000
Radverkehrsaufkommen	6,970	0,132	52,680	0,000	0,149	46,770	0,000

Das Vorhandensein von **Radverkehrsinfrastruktur** übt ebenfalls einen positiven Einfluss auf die Routenwahl aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist 2,510. Mit einem zunehmenden Anteil von Streckenabschnitten, die über Radverkehrsinfrastruktur verfügen, steigt dementsprechend die Wahrscheinlichkeit einer Route stark an, von den Radfahrenden gewählt zu werden. Die Signifikanz der Variable (p-value = 0,000) zeigt zudem, dass der Einfluss statistisch signifikant ist.

Die **Längsneigung** entlang einer Route besitzt ebenfalls einen wesentlichen und statistisch signifikanten Einfluss auf die Routenwahl. Sowohl die maximal auftretenden Längsneigung als auch die Streckenanteile mit geringen Längsneigungen (LN $\leq 2\%$) weisen eine statistisch gesicherte Wirkung auf (p-value = 0,000). Die **maximal vorhandene Längsneigung** entlang einer Route übt jedoch fast keinen Einfluss auf die Routenwahl aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist 0,009 und führt somit zu einer minimalen Erhöhung der Wahlwahrscheinlichkeit einer Route mit höheren maximalen Längsneigungen. Der Einfluss von Streckenabschnitten mit einer **Längsneigung < 2 %** ist hingegen deutlich stärker ausgeprägt. Höhere Routenanteile mit einer Längsneigung < 2 % üben sich deutlich positiv auf die Wahl einer Route aus. Der Korrelationskoeffizient für die Variable ist 1,280 und führt somit zu einem Anstieg des Nutzens und der Wahlwahrscheinlichkeit einer Route, wenn sich der Streckenanteil einer Route mit einer Längsneigung < 2 % erhöht. Die Längsneigung zeigt insgesamt also einen wesentlichen Einfluss auf die Routenwahl.

Die **Oberflächenbeschaffenheit** entlang einer Route übt einen wesentlichen Einflussfaktor der Routenwahl aus. Höhere Anteile des Oberflächentyps „Asphalt“ entlang einer Route beeinflussen die Wahl einer Route stark positiv. Der Korrelationskoeffizient für die Variable beträgt 3,200 und führt damit zu einem sehr starken Anstieg der Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route, wenn der Anteil der Route mit asphaltgedeckten Streckenabschnitten ansteigt. Die Signifikanz (p-value = 0,000) zeigt zudem an, dass der Einfluss der Variable statistisch signifikant ist. Die **Radverkehrsstärke** entlang einer Route, die das Vorhandensein weiterer Radfahrender abbildet, übt im analysierten Datensatz den stärksten Einfluss auf die Routenwahl aus. Der Korrelationskoeffizient der Variable ist mit 6,970 sehr hoch ausgeprägt. Ein steigender Anteil von Streckenabschnitten entlang der Route, auf denen viele andere Radfahrende fahren, führt zu einer ansteigenden Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route. Die Variable ist mit einer Signifikanz von 0,000 (p-value) zudem hochsignifikant.

6.3 Vergleich der Modelle

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse des vereinfachten Modells für Dresden mit denen des differenzierten Modells verglichen sowie die Ergebnisse der vereinfachten Modelle untereinander gegenübergestellt. Dieser Vergleich soll einerseits Aufschluss darüber geben, inwiefern das vereinfachte Routenwahlmodell die Ergebnisse des differenzierten Modells wiedergibt. Darüber hinaus soll der Vergleich der vereinfachten Modelle untereinander die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Routenwahl in Dresden, Darmstadt und München verdeutlichen.

6.3.1 Differenziertes vs. vereinfachtes Routenwahlmodell (Dresden)

Tabelle 48 zeigt die Ergebnisse der Modellschätzung für Dresden und stellt die Werte des differenzierten Modells denen des vereinfachten Modells gegenüber. Während für das vereinfachte Modell die Schätzung aller in Tabelle 48 dargestellten Parameter erfolgte, wurden die Werte für das differenzierte Modell aus den Ergebnistabellen der komplexen Modellschätzung übernommen.

Tabelle 48 Vergleich der Modellergebnisse für Dresden

Parameter	Differenziertes Modell				Vereinfachtes Modell			
	Value	Std err	t-test	p-value	Value	Std err	t-test	p-value
Konstante (Best-Weg)	0,789	0,050	15,710	0,000	0,807	0,049	16,540	0,000
Fahrtweite	0,255	0,041	6,240	0,000	0,253	0,039	6,550	0,000
Radverkehrsinfrastruktur	5,720	0,289	19,770	0,000	4,150	0,221	18,790	0,000
geringe Längsneigungen ($\leq 2\%$)	1,090	0,397	2,740	0,010	1,330	0,383	3,470	0,000
Max. Längsneigung	-0,076	0,008	-10,120	0,000	-0,073	0,007	-10,370	0,000
Oberflächenqualität	2,860	0,282	10,120	0,000	4,680	0,196	23,860	0,000
Radverkehrsaufkommen	2,410	0,206	11,700	0,000	2,080	0,180	11,530	0,000

Der Vergleich der Analyseergebnisse zeigt zunächst, dass die Werte für nahezu alle Einflussfaktoren ähnlich ausgeprägt sind. Die Wirkrichtung (positiver oder negativer Einfluss) ist für alle Variablen identisch; lediglich die Stärke der Wirkung unterscheidet sich teils mehr oder weniger stark. Der besseren Übersicht halber sind die Werte der Koeffizienten für den Vergleich in Abbildung 78 visualisiert.

Die Tendenz zur Nutzung der kürzesten Route ist sowohl im differenzierten als auch im vereinfachten Modell vorhanden. Es sind nur sehr geringe Unterschiede bei den Modellkoeffizienten auszumachen. Dies gilt in gleichem Maße für die Bereitschaft, Umwege in Kauf zu nehmen (Einflussfaktor „Distanz“).

Die Präferenz der Radfahrenden zur Nutzung von Radverkehrsinfrastruktur ist im differenzierten Modell etwas stärker ausgeprägt. Der Koeffizient ist im vereinfachten Modell mit 4,150 geringer als im differenzierten Modell (5,720). Er stellt jedoch in beiden Modellen einen der stärksten Einflussfaktoren dar und zeigt damit, dass beide Modelle eine starke Präferenz der Radfahrenden zur Nutzung von Radverkehrsinfrastruktur ausgeben.

Die entlang einer Route maximal auftretende Längsneigung übt in beiden Modellen nahezu den identischen Einfluss auf die Routenwahl aus. Die Modellkoeffizienten unterscheiden sich kaum ($value_{diff} = -0,076$ vs. $value_{einf} = -0,073$). So führt ein Anstieg der maximalen Längsneigung entlang einer Route in beiden Modellen zu einer leichten Verringerung der Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route.

Leichte Unterschiede ergeben sich auch bei der Wirkung von Streckenabschnitten mit einer geringen Längsneigung ($LN \leq 2\%$). Diese Streckenanteile weisen im vereinfachten Routenwahlmodell einen etwas stärkeren positiven Einfluss auf die Wahl einer Route aus als im differenzierten Modell.

Die Oberflächenqualität wirkt sich im vereinfachten Modell hingegen deutlich stärker positiv auf die Wahl einer Route aus als im differenzierten Modell. Der Modellkoeffizient ist mit 4,680 deutlich höher als der im differenzierten Modell (2,860). Dieser Einflussfaktor stellt den stärksten Modellkoeffizienten im vereinfachten Modell – dicht gefolgt von dem Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur. Dies überrascht vor allem im Vergleich mit dem

differenzierten Modell, in dem das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur den stärksten Einfluss auf die Routenwahl ausübt.

Das Radverkehrsaufkommen übt in beiden Modellen einen mittelgroßen positiven Einfluss auf die Routenwahl aus. Die Modellkoeffizienten unterscheiden sich mit 2,410 (differenziertes Modell) und 2,080 (vereinfachtes Modell) geringfügig.

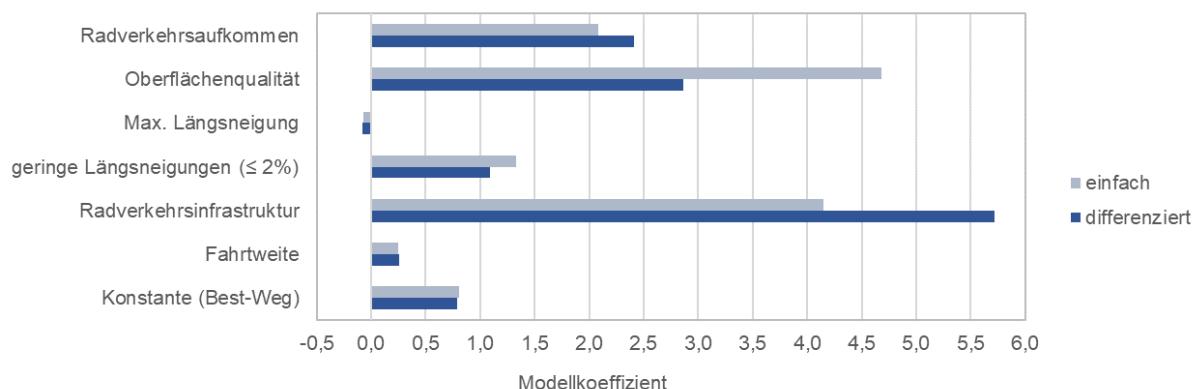


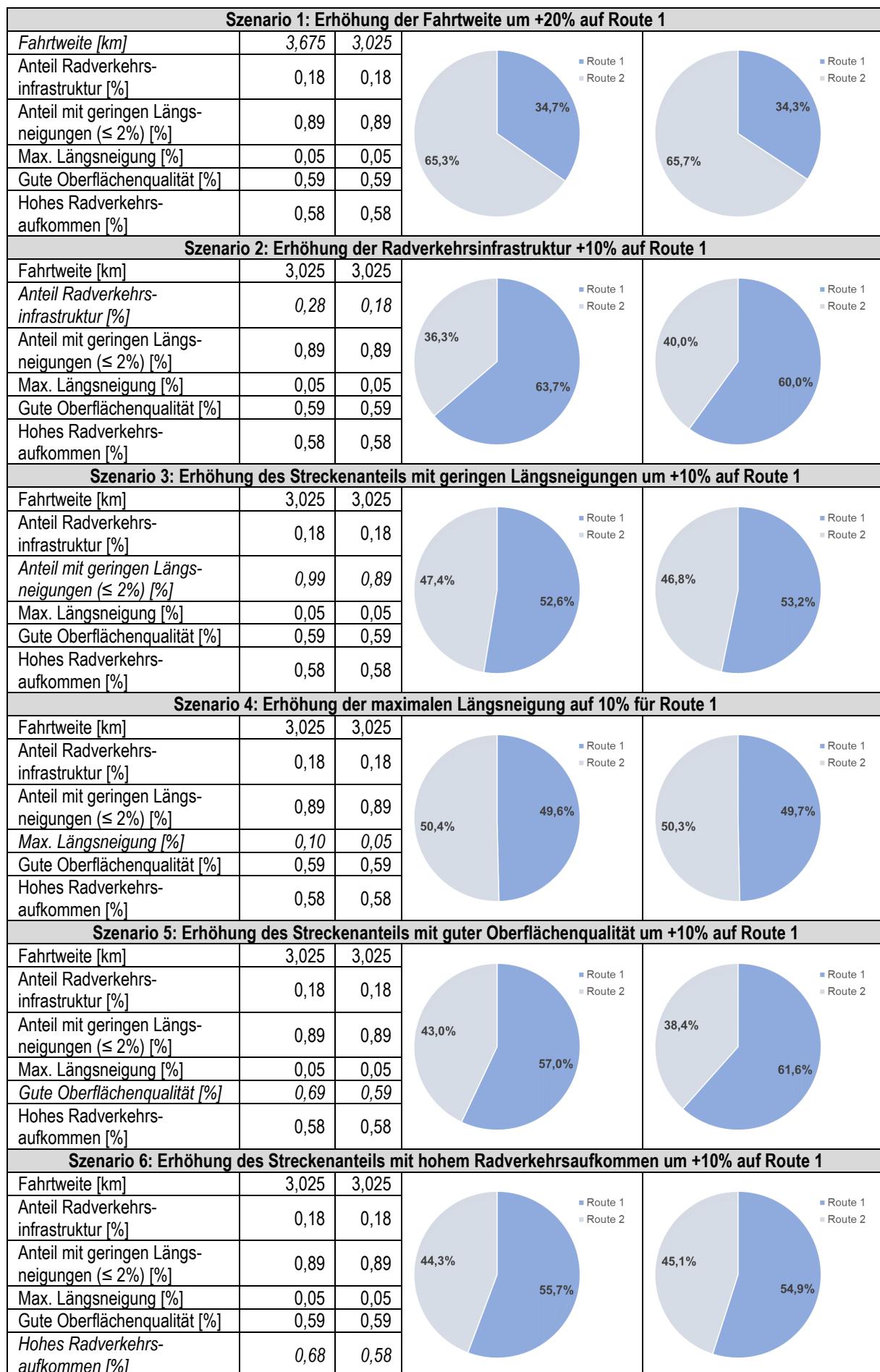
Abbildung 78 Visualisierung der Modellkoeffizienten zu Vergleichszwecken

Insgesamt wird deutlich, dass die Koeffizienten des vereinfachten Modells zum größten Teil mit denen des komplexeren bzw. differenzierten Modells übereinstimmt. Dies trifft vor allem auf die Einflussfaktoren Distanz (Konstante + Fahrtweite), die geringe Längsneigung ($LN \leq 2\%$) und der maximalen Längsneigung sowie der Präsenz anderer Radfahrender (Radverkehrsaufkommen) zu. Unterschiede bestehen vor allem in der Stärke der Wirkung der Oberflächenqualität und dem Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur.

Wie stark oder schwach die unterschiedlichen Koeffizienten auf die Wahlwahrscheinlichkeit wirken, kann jedoch nicht direkt an den Koeffizienten abgelesen werden. Für die Veranschaulichung wurden daher beide Modelle umgesetzt und die Wahrscheinlichkeiten für eine „typische Route“ sowie die Modellreaktion auf die Änderung der Routeneigenschaften berechnet. Dazu wurden zwei Routen mit identischen Eigenschaften (mittlere Werte für alle Ausprägungen der Einflussvariablen) gegenübergestellt und nacheinander die Ausprägung eines jeden Einflussfaktors einzeln verändert, um die Reaktionen der beiden Modelle auf diese Änderung zu bestimmen. Die übrigen Einflussfaktoren wurden konstant gehalten, sodass sich sechs Szenarien ergeben – ein jedes pro Einflussfaktor. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 49 dargestellt. Es wird deutlich, dass sich Wahlwahrscheinlichkeiten beider Routenwahlmodelle in den sechs Szenarien nur geringfügig unterscheiden (siehe Tabelle 49). Erwartungsgemäß sind die größten Unterschiede in Szenario 2 und Szenario 5 auszumachen. Die Differenzen der Wahlwahrscheinlichkeiten zw. dem vereinfachten und dem differenzierten Modell fallen jedoch mit 3,7% (Szenario 2) und 4,4% vergleichsweise gering aus.

Tabelle 49 Vergleich der Wahlwahrscheinlichkeiten für die beiden Modelle und sechs Szenarien

Einflussfaktoren	Ausprägung		Auswahlwahrscheinlichkeit	
	Route 1	Route 2	Differenziertes Modell	Vereinfachtes Modell
NUL-Fall: Identische Eigenschaften zweier Routen				
Fahrtweite [km]	3,025	3,025	50,3%	49,7%
Anteil Radverkehrsinfrastruktur [%]	0,18	0,18	50,2%	49,8%
Anteil mit geringen Längsneigungen ($\leq 2\%$) [%]	0,89	0,89		
Max. Längsneigung [%]	0,05	0,05		
Gute Oberflächenqualität [%]	0,59	0,59		
Hohes Radverkehrsaufkommen [%]	0,58	0,58		



Aus den oben beschriebenen Abschnitten wurde deutlich, dass auch vereinfachte Modelle für die Analyse (und Modellierung) herangezogen werden können, da sich die Modellkoeffizienten und die Modellreaktionen nicht wesentlich zwischen vereinfachten und komplexeren Modellen unterscheiden. In einem letzten Schritt wird die Güte des vereinfachten Modells bestimmt und der des differenzierten Modells gegenübergestellt. Dies zeigt, inwiefern sich die Modellgüte unterscheidet und ob das vereinfachte Modell eine ausreichend oder ähnlich hohe Modellgüte besitzt.

Zur Bestimmung der Modellgüte wurden die bereits genutzten Gütemaße herangezogen. Die Kennziffern der Modellschätzung sind in Tabelle 50 für die beiden Modelle gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass das vereinfachte Modell eine ähnlich hohe Güte erreicht wie das differenzierte Modell. Dies wird neben der *log likelihood* und dem *likelihood ratio test* vor allem am McFadden-R² deutlich. Das McFadden-R² = 0,463 deutet auf eine hohe Modellgüte des vereinfachten Modells hin. Der Wert liegt zudem nur etwa 0,031 unter dem McFadden-R² des differenzierten Modells. Der Unterschied ist also sehr gering.

Tabelle 50 Vergleich der Modellgüte

Kennziffer	Differenziertes Modell	Vereinfachtes Modell
Number of observations	3.987	3.987
Null log likelihood	-4.380,167	-4.380,167
Final log likelihood	-2.217,344	-2.353,525
Likelihood ratio test	4.325,646	4.053,284
Rho-square (McFadden-R ²)	0,494	0,463

Die Untersuchung hat aufgezeigt, dass (für den Fall Dresden) auch das vereinfachte Modell einen Einblick in das Routenwahlverhalten gibt. Die Einflussfaktoren wirken in sehr ähnlichem Maße auf die Routenwahlentscheidung wie in dem differenzierten Modell und die Modellgüte ist nahezu ähnlich hoch. Dies ist besonders in Anbetracht des deutlich geringeren Dateninputs zu würdigen.

6.3.2 Vergleich der vereinfachten Modelle (Dresden, Darmstadt und München)

Der Vergleich der vereinfachten Modelle untereinander kann Hinweise auf Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Routenwahl in Dresden, Darmstadt und München aufzeigen. Die deskriptive Auswertung der genutzten Routen zeigt zunächst, dass Unterschiede zwischen den Städten vorhanden sind (siehe Tabelle 51). Unabhängig von der Stichprobengröße (sie schwankt u.a. aufgrund der Bevölkerungszahl in den Städten), wurde ein Großteil der Fahrten in allen Städten an Werktagen durchgeführt (85% bis 88%), sodass die meisten Fahrten auf Alltagswegen aufgezeichnet wurden.

Größere Unterschiede treten hingegen bei den Fahrtweiten auf. Während in Dresden und Darmstadt rund 50% aller gewählten Routen dem kürzesten Weg entsprachen, traf dies in München lediglich auf 40% der Fahrten zu. Dies spiegelt sich auch in den unterschiedlichen durchschnittlichen Fahrtweiten wider, die jedoch auch durch die unterschiedlichen Stadtgrößen und die damit bedingten längeren Wege (z.B. in München ggü. Darmstadt) zusammenhängen können.

Die Routenanteile mit einer Längsneigung < 2% weisen hingegen kaum Unterschiede auf. Die Radfahrenden wählten in allen Städten Routen, entlang derer der Großteil der Route geringe Längsneigungen aufwies (85% – 86%). Demgegenüber treten deutliche Unterschiede bei den maximal vorhandenen Längsneigungen auf. Während in Dresden die maximal auftretende Längsneigung im Mittel rund 7% betrug, war diese in Darmstadt (17%) und München (18%) deutlich höher. Dies hängt vermutlich mit dem Relief zusammen, das den Radfahrenden in Darmstadt und München stärkere kurze Anstiege verschafft (der Großteil der Dresdener Innenstadt befindet sich in der flachen Elbtalweitung, während in Darmstadt und München innerstädtisch starke Unterschiede im Relief zu finden sind).

Die von den Radfahrenden in Dresden und München gewählten Routen verfügten zu rund einem Drittel über Radverkehrsinfrastruktur. Dieser Anteil fällt in Darmstadt mit rund 16% deutlich geringer aus und ist nur etwa halb so groß wie in München und Dresden. Dass dieses Verhältnis bei der Oberflächenqualität ähnlich ausfällt (rund ½),

könnte auf die vorhandenen Sekundärdaten zurückzuführen sein. In Dresden und München verfügte im Mittel mehr als die Hälfte einer Route über Streckenabschnitte mit einer guten Oberflächenqualität (Asphalt). In Darmstadt lag dieser Anteil nur etwa halb so hoch.

In allen drei Städten wurden von den Radfahrenden Routen gewählt, entlang derer andere Radfahrende präsent waren. Dies wird bei der Betrachtung des Radverkehrsaufkommens entlang der Route deutlich. In allen Städten liegt der mittlere Anteil der Routen, entlang derer der $DTV_{Rad} > 500$ Rad/Tag lag, bei mindestens 50 %.

Der Vergleich der Routenwahlmodelle zeigt, inwiefern die kausalen Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Entscheidungsverhalten der Radfahrenden zu der Ausprägung der oben geschilderten Routencharakteristika beigetragen haben. Die Modellkonstante zeigt an, dass in allen drei Städten in ähnlichem Maße am kürzesten Weg festgehalten wird (siehe: Konstante). Allerdings sind die Radfahrenden in München und Darmstadt in deutlich größerem Maße bereit, Umwege für eine geeignete Route in Kauf zu nehmen (siehe: Fahrtweite). Unterschiede ergeben sich auch bzgl. des Einflussfaktors „Radverkehrsinfrastruktur“. Das Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur übt zwar auch in München und Darmstadt einen positiven Einfluss auf die Routenwahl aus, dieser ist in den beiden Städten jedoch nicht so stark ausgeprägt wie in Dresden. Große Streckenabschnitte mit einer möglichst geringen Längsneigung wirken hingegen in Darmstadt deutlich stärker positiv auf die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route als in Dresden oder München (die in etwa ähnlich hohe Modellkoeffizienten der Variable aufweisen). Die maximal auftretende Längsneigung übt hingegen in allen drei Städten nur einen marginalen Einfluss auf die Routenwahl aus. Größere Unterschiede sind hingegen bei dem Einfluss der Oberflächenqualität feststellbar. Sie hat in Dresden einen besonders starken Einfluss und wirkt sich auch in München in hohem Maße positiv auf die Routenwahl aus. Das Vorhandensein anderer Radfahrender entlang der Routen übt in allen Städten einen positiven Einfluss auf die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route aus. Der Einfluss ist in München besonders stark ausgeprägt. Zur besseren Verdeutlichung der Unterschiede sind die Koeffizienten in der nachfolgenden Abbildung noch einmal visualisiert.

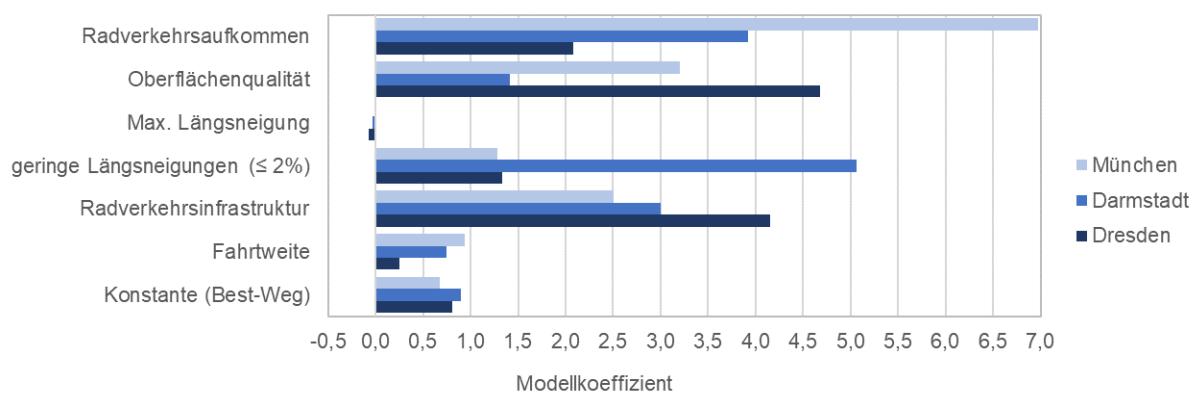


Abbildung 79 Visualisierung der Modellkoeffizienten zu Vergleichszwecken

Tabelle 51 Kennwerte der deskriptiven Statistik für die vereinfachten Modelle

Eigenschaften		Stadt		
		Dresden	Darmstadt	München
Fahrten	Anzahl [n]	3.988	4.479	10.630
	davon	werktags	86,9%	85,2%
		nicht werktags	13,1%	14,8%
		Kürzester Weg	52,7%	50,5%
		2. kürzester Weg	27,8%	27,0%
		3. kürzester Weg	19,5%	22,5%
Fahrtweite [km]	Minimum	0,339	0,282	0,242
	Median	3,025	2,479	4,166
	Mittel	4,429	3,866	5,415
	Maximum	60,409	30,508	43,990
	Streuung	60,070	30,226	43,748
Maximale Längsneigung [%]	Minimum	0,0%	0,0%	0,0%
	Median	5,3%	14,0%	15,0%
	Mittel	6,8%	16,8%	18,4%
	Maximum	112,0%	136,0%	104,0%
	Streuung	112,0%	136,0%	104,0%
Routenanteil mit einer Längsneigung < 2% [%]	Minimum	0,0%	51,7%	35,6%
	Median	88,6%	86,2%	85,1%
	Mittel	84,9%	85,5%	84,6%
	Maximum	100,0%	99,9%	99,9%
	Streuung	100,0%	48,2%	64,3%
Routenanteil mit Radverkehrsinfrastruktur [%]	Minimum	0,0%	0,0%	0,0%
	Median	27,7%	12,9%	40,5%
	Mittel	28,6%	16,4%	37,8%
	Maximum	100,0%	86,1%	98,5%
	Streuung	100,0%	86,1%	98,5%
Streckenanteil mit Asphaltoberfläche [%]	Minimum	0,0%	0,0%	0,0%
	Median	58,7%	21,7%	59,0%
	Mittel	53,7%	27,3%	56,8%
	Maximum	99,7%	100,0%	100,0%
	Streuung	99,7%	100,0%	100,0%
Streckenanteil mit einem DTV _{Rad} > 500 Rad/Tag [%]	Minimum	0,0%	0,0%	0,0%
	Median	58,5%	50,1%	42,4%
	Mittel	59,3%	52,9%	49,3%
	Maximum	100,0%	100,0%	100,0%
	Streuung	100,0%	100,0%	100,0%

6.4 Zusammenfassung

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Wirkung der Einflussfaktoren auf Routenwahl der Radfahrenden eindeutige Richtungen und Effektstärken aufzeigen. Es zeigt sich, dass Radfahrende kürzere Routen mit geringeren Längsneigungen und dem Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur präferieren. Das

Vorhandensein weiterer Radfahrender entlang einer Route sowie eine gute Oberflächenbeschaffenheit werden ebenso bevorzugt.

Die Wirkung der Einflussfaktoren ist mehr oder minder auch bei der Routenwahl spezifischer Gruppen (Geschlecht, Wegezweck, Radfahr-Typ) zu beobachten. In vielen Fällen konnten Analogien in der Routenwahl der unterschiedlichen Gruppen beobachtet werden (z.B. der signifikant positive Einfluss von Radverkehrsinfrastruktur, einer guten Oberfläche oder geringen Steigungen). Es existieren partiell jedoch auch spezifische Unterschiede (z.B. bei der Steigungsempfindlichkeit von Frauen ggü. Männern oder bei dem Einfluss der Umfeldnutzung). Die Resultate der unterschiedlichen Modelle zeigen, dass nicht für alle Einflussfaktoren statistisch gesicherte Zusammenhänge festgestellt werden können. Dies ist vermutlich auf die Stichprobengröße (Fahrtanzahl für die unterschiedlichen Gruppen) zurückzuführen. Die Ergebnisse der spezifischen Modelle sind daher differenziert zu betrachten.

Obwohl teilweise eine Abweichung bei der Wirkstärke der Einflussfaktoren zwischen den unterschiedlichen Modellen (Dresden differenziert, Dresden vereinfacht, Darmstadt und München) festgestellt werden konnte, so sind diese Einflussfaktoren und deren Richtung für die Routenwahl in allen Modellen nachweisbar. Ein besonders aufschlussreiches Ergebnis ist, dass ein Großteil der Routenwahl offensichtlich durch wenige aber für die Attraktivität einer Route besonders relevante Variablen erklärt wird: Radverkehrsinfrastruktur, Längsneigung, Oberflächenqualität, Fahrtweite und Radverkehrsaufkommen. Dies scheinen die entscheidenden Determinanten der Routenwahl zu sein, auch wenn weitere Faktoren in die Entscheidung einfließen.

7 EINFLUSS DER VERKEHRSSICHERHEIT AUF DIE ROUTENWAHL

7.1 Rückkopplung des Einflusses der Verkehrssicherheit auf die Routenwahl

Da die Betrachtung der Anzahl der Unfälle auf den zurückgelegten Strecken auf die Routenwahl keinen bzw. nur einen minimalen Einfluss gezeigt hat (siehe Tabelle 37), soll abschließend noch einmal der Einfluss des Sicherheitspotenzials (SiPo) auf die Routenwahl geprüft werden. Das SiPo vereint dabei Aspekte der objektiven und subjektiven Verkehrssicherheit, indem es Orte mit hohen Unfallzahlen in Relation zu den für den Radverkehr erwartbaren Unfallzahlen darstellt. Orte, die aufgrund ihrer Komplexität, Unübersichtlichkeit oder auch hohen Verkehrsstärken des motorisierten Verkehrs hohe Unfallzahlen aufweisen, werden mittels SiPo auch unsicher bewertet. Auf Basis der Ergebnisse in Abschnitt 6 wird vermutet, dass Radfahrende eher ein Empfinden für den Zusammenhang der verkehrlichen und infrastrukturellen Eigenschaften und ihrem Sicherheitsempfinden herstellen als zwischen historischen Unfalldaten (über das die Radfahrenden i. d. R. keine Informationen haben) und dem Sicherheitsempfinden. Der Einfluss des SiPo aus die Routenwahl soll somit als Indikator für Orte mit hoher subjektiver und objektiver Unsicherheit geprüft werden.

Das SiPo wurde auf Basis der berechneten Modelle nach der folgenden Methodik ermittelt und mit der konventionellen SiPo Berechnung abgeglichen. Beide Berechnungen wurden ohne Monetarisierungsansätze vorgenommen, da auch in der Modellermittlung nicht nach Unfallschwere differenziert wurde.

Das konventionelle SiPo wurde (angelehnt an FGSV (2003)) wie folgt ermittelt:

$$SIPo_{konv} = UD_{beobachtet} - gUD_{konv} \quad \text{Formel 19}$$

Die Ermittlung der Grundunfalldichte (gUD) wurde zuerst die Unfallrate (UR) der Einzelemente nach Formel 20 für Knotenpunkte und Formel 21 für Streckenabschnitte ermittelt:

$$UR = 1000 * \frac{U(P, S)}{365 * DTV_{Rad} * t} \quad \text{Formel 20}$$

$$UR = 1000 * \frac{U(P, S)}{365 * DTV_{Rad} * t * L} \quad \text{Formel 21}$$

Anschließend wird angelehnt an Bark et al. (2017) die Grundunfallrate gUR als 30 %-Perzentil der beobachteten UR ermittelt und mittels Verkehrsstärke zur gUD berechnet nach:

$$gUD_{konv} = \frac{gUR * DTV_{Rad}}{365 * 1000} \quad \text{Formel 22}$$

Analog wird das auf Basis der Modelle ermittelte SiPo analog nach der folgenden Formel berechnet.

$$SIPo_{Modell} = UD_{beobachtet} - gUD_{Mod_I} \quad \text{Formel 23}$$

Zur Ermittlung der gUD wurde hier für die Elemente die prognostizierte Unfallzahl durch das jeweilige Unfallmodell (jeweils Endmodell, U(P,S), siehe Tabelle 15, Tabelle 19, & Tabelle 24) auf Basis des konstanten Terms und der Radverkehrsstärke ermittelt. Für die Knotenpunkte wurde zusätzlich der Term Verkehrsregelung (LSA = ja/nein) einbezogen, da diese Eigenschaft maßgeblich auf die Unfallanzahl wirkt. Diese Methode schätzt die gUD am besten ab, da alle infrastrukturellen und betrieblichen Einflüsse ausgeschlossen werden. Folgende Modelle wurden angewendet:

Infrastruktur I	Modell
Knotenpunkt KP	$gUD_{Mod_KP} = U = e^{-10,72} * DTV_{Rad}^{0,62} * e^{LSA*-0,47}$ Mit LSA = 1, wenn Verkehrsregelung LSA; LSA = 0, wenn Verkehrsregelung \neq LSA
Strecke St	$gUD_{Mod_St} = U = e^{-3,79} * DTV_{Rad}^{0,54}$
Selbstständiger Weg	$gUD_{Mod_Weg} = U = e^{-7,57} * DTV_{Rad}^{0,75}$

Der Vergleich der Methoden zeigt zuerst den Nachteil der konventionellen Berechnung: da sowohl an den Strecken mit straßenbegleitenden Radverkehrsführungen als auch insbesondere an selbstständigen Wegen ein hoher Anteil unfallfreier Strecken vorliegt (ca. 40% unfallfrei Strecken, ca. 75 % unfallfrei selbstständige Wege), wird die gUD an diesen Infrastrukturen mit Null ermittelt, womit das SiPo für jedes Element der beobachteten Unfalldichte entspricht. Die Beobachtung des Anteils unfallfreier selbstständigen Wege wird auch in Hantschel et al. (2020) getroffen (ca. 80 % der Abschnitte unfallfrei). Für die Strecken im Kfz-Verkehrsnetz liegt keine Referenz vor. Als möglicher Ansatz zur Spezifizierung der Streckenkategorien zur Ermittlung eines aussagekräftigen SiPos wurden die Strecken in Hauptverkehrs- und Nebennetzstrecken differenziert sowie in Klassen der Radverkehrsstärke, wobei auch diese Differenzierung keine gUD über Null ermittelt. Abschließend ist keine Bewertung der Streckenabschnitte mit konventionellem SiPo möglich.

Ein tatsächlicher Vergleich der Sicherheitsbewertung ist daher nur für die Knotenpunkte umsetzbar. Für den Vergleich der SiPo werden die Werte SiPo_konv. vs. SiPo_Modell verglichen. Der Vergleich in Abbildung 80 zeigt, dass die im Modell ermittelten SiPo tendenziell höher liegen als im konventionellen SiPo. Die Aussage welches der ermittelten SiPo näher an der Realität liegt, kann im Rahmen der Untersuchung nicht ermittelt werden. Im Sinne der Konsistenz werden die modellbasiert ermittelten SiPo zur Ermittlung von deren Einfluss auf die Routenwahl überprüft, da diese für Strecken und Knotenpunkte vorliegen. Dass sich hier rechnerisch auch negative Werte für die SiPo ergeben, ist mathematisch sachlogisch. Inhaltlich können Potentiale jedoch keinen negativen Wert aufweisen. Dennoch wurden die Werte auch mit negativen Vorzeichen an die Routenwahlmodelle übergeben.

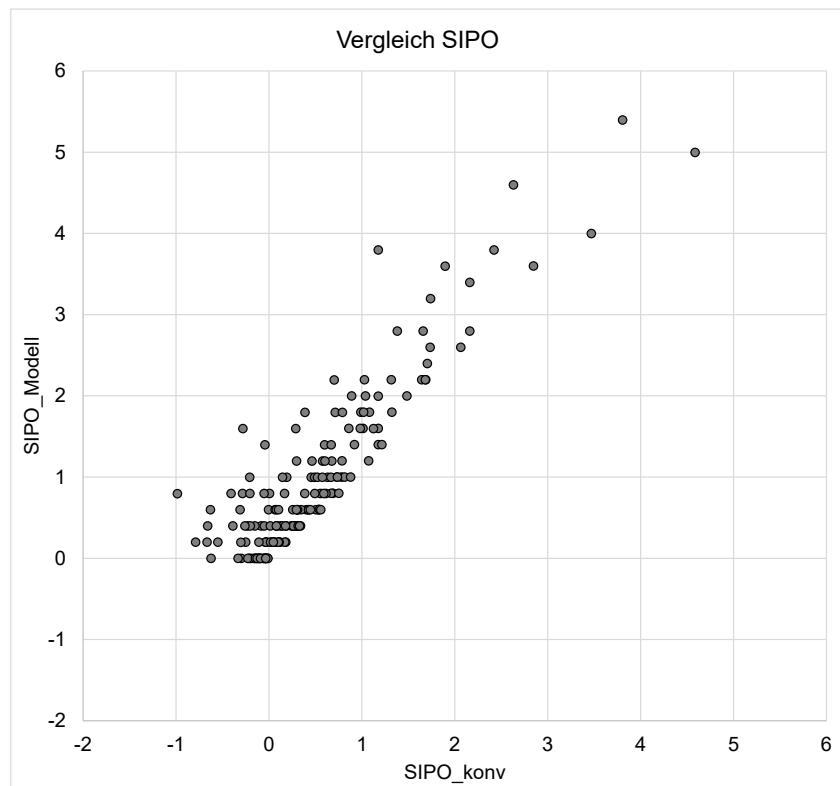


Abbildung 80 Vergleich der ermittelten SiPo

Die ermittelten SiPo sind in Abbildung 81 für den Innenstadtausschnitt Dresden dargestellt.

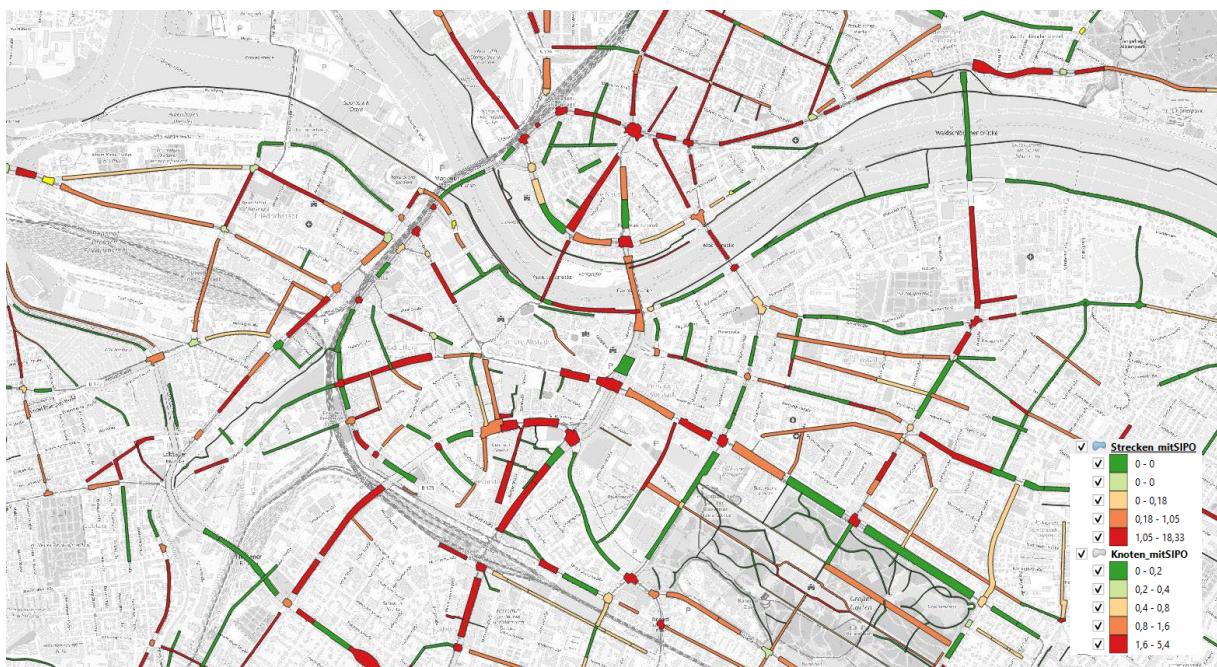


Abbildung 81 SiPo Dresden (Ausschnitt Innenstadt)

Um die Eingangsthese dieses Abschnitts (SiPo als Indikator für Orte mit hoher subjektiver und objektiver Unsicherheit) zu prüfen, wurden anschließend die auf den Infrastrukturelementen ermittelten SiPos mit auf den Elementen gemeldeten kritischen Situationen überlagert (Gegenüberstellung SiPo/Anzahl kritische Situationen je Strecke bzw. Knoten). Die beiden Variablen zeigen dabei keinen Zusammenhang. Dabei kann der fehlende statistische Zusammenhang nicht zwangsläufig inhaltlich interpretiert werden, da die Zahl der kritischen Situationen auf den in der Analyse enthaltenen Elementen relativ klein ist (167 kritische Situationen auf 84 Strecken – 866 Strecken ohne kritische Situation; 86 kritische Situationen auf 52 Knotenpunkten – 124 Knotenpunkte ohne kritische Situation). Die weitere Interpretation der Eingangsgröße soll auf Basis des Einflusses auf die Routenwahl untersucht werden.

Zur Untersuchung des Einflusses des SiPo auf die Routenwahl wurden die SiPo für Strecken und Knotenpunkte als Variable aufgenommen und die statistische Schätzung des differenzierten Routenwahlmodells für Dresden erneut durchgeführt. Im Ergebnis wird deutlich, dass das SiPo nur einen marginalen Einfluss auf die Routenwahl hat – wenngleich er stärker ist als der Einfluss der Unfallhäufigkeit oder der Einfluss kritischer Situationen. Die Modellergebnisse dieser Rückkopplung können aus Tabelle 52 entnommen werden. Es wird ersichtlich, dass ein hohes SiPo eine Verringerung der Wahlwahrscheinlichkeit einer Route zur Folge hat. Dies trifft unterschiedlich stark auf das SiPo an Knotenpunkten und Strecken zu. Ein hohes SiPo an Strecken übt einen mittelstarken negativen Einfluss (Koeff. = -0,317) auf die Routenwahl aus. Ein hohes SiPo an Knotenpunkten einen schwachen negativen Einfluss (Koeff. = -0,190). Beide Einflussfaktoren beeinflussen die Routenwahl signifikant (siehe Tabelle 52).

Der Vergleich mit den Ergebnissen des differenzierten Modells ohne SiPo zeigt, dass die Hinzunahme des SiPo zwar zu keiner grundlegenden Änderung der Routenwahl führt, es aber zu einer leichten Verschiebung der Wirkung der Einflussfaktoren kommt. Bei der Betrachtung der wichtigsten Einflussfaktoren wird deutlich, dass bspw. die Relevanz des kürzesten Wegs abnimmt und die Bereitschaft zur Wahl längerer Routen steigt. Dem Vorhandensein von Radverkehrsinfrastruktur kommt nach wie vor die stärkste Wirkung zu, allerdings nimmt auch dieser Einfluss leicht ab. Ähnliches ist bei den Variablen Längsneigung, Asphaltoberfläche und Radverkehrsaufkommen zu beobachten. Die Berücksichtigung des SiPo leistet offensichtlich einen zusätzlichen Beitrag zur Erklärung der

Routenwahl. Allerdings führt die Hinzunahme der Variablen zu einer leichten Verschlechterung der Modellgüte (McFadden.R²) von 0,490 (Modell ohne SiPo) auf 0,488 (Modell inkl. SiPo). Die Güte verringert sich also minimal.

Tabelle 52 Analyseergebnisse der Routenwahl unter Einbezug des Sicherheitspotenzials

Variable	Value	Std err	t-test	p-value	Robust Std err	Robust t-test	p-value
Konstante	0,639	0,052	12,29	0,000	0,054	11,85	0,000
Fahrtweite	0,355	0,050	7,17	0,000	0,058	6,14	0,000
Maximale Längsneigung	-0,079	0,008	-10,40	0,000	0,007	-11,00	0,000
Längsneigung ≤ 2%	0,794	0,393	2,02	0,040	0,386	2,06	0,040
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	5,330	0,264	20,15	0,000	0,281	18,98	0,000
Asphaltoberfläche	2,630	0,259	10,13	0,000	0,259	10,13	0,000
RV – Längsaufstellung	0,892	0,254	3,51	0,000	0,279	3,20	0,000
v_zul ≤ 30km/h	0,459	0,200	2,29	0,020	0,208	2,20	0,030
Durchschnittlicher DTV des Kfz-Verkehrs entlang einer Route	0,000	0,000	-4,33	0,000	0,000	-4,20	0,000
1 Richtungsfahrstreifen	1,960	0,274	7,14	0,000	0,293	6,69	0,000
DTV > 500 Rad/Tag	1,690	0,184	9,23	0,000	0,188	8,99	0,000
Geringe Fußverkehrsdichte	-0,513	0,493	-1,04	0,300	0,488	-1,05	0,290
KP-Regelung RVL	0,078	0,030	2,59	0,010	0,030	2,62	0,010
KP-Regelung durch LSA	0,409	0,069	5,94	0,000	0,070	5,83	0,000
Unfallhäufigkeit	0,000	0,001	0,08	0,940	0,001	0,08	0,930
Häufigkeit kritischer Situationen	0,041	0,006	7,04	0,000	0,006	7,03	0,000
Umfeldnutzung Wohngebiet	0,173	0,267	0,65	0,520	0,267	0,65	0,520
Umfeldnutzung Grünfläche	1,940	0,309	6,30	0,000	0,319	6,09	0,000
SiPo an KP	-0,190	0,046	-4,10	0,000	0,048	-3,98	0,000
SiPo an Strecken	-0,317	0,061	-5,20	0,000	0,066	-4,84	0,000

Im Gegensatz zu dem differenzierten Modell zeigt sich bei den vereinfachten Modellen, welche nur die Variablen einschließen, die in einem signifikanten Maße zur Erklärung der Routenwahl beitragen, keine deutliche Änderung der Koeffizienten (siehe Tabelle 53). Ein hohes Sicherheitspotenzial (geringe Verkehrssicherheit) übt in dem vereinfachten Modell ebenso einen negativen Einfluss auf die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route aus. Die negative Wirkung eines hohen SiPo an Strecken ist auch in dem vereinfachten Modell stärker ausgeprägt als die des SiPo an Knotenpunkten.

Tabelle 53 Vergleich der Modellkoeffizienten des vereinfachten Modells

Variable	Ohne SiPo	Inkl. SiPo
Konstante	0,720	0,729
Fahrtweite	0,375	0,371
Maximale Längsneigung	-0,085	-0,089
Längsneigung ≤ 2%	1,370	1,390
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	5,240	5,370
Asphaltoberfläche	4,990	4,960
SiPo an KP		-0,113
SiPo an Strecken		-0,193

Im Gegensatz zum differenzierten Modell unterscheidet sich die Modellgüte kaum zwischen den beiden vereinfachten Modellen (mit und ohne SiPo). Sie steigt bei der Hinzunahme der Variablen SiPo von 0,440 (ohne

SiPo) auf 0,443 (inkl. SiPo) an. Dieser leichte Anstieg ist nicht verwunderlich, da die Hinzunahme zusätzlicher Variablen zu einer Erhöhung der Aussagekraft eines Modells führen sollten. Der Anstieg fällt jedoch recht gering aus.

7.2 Fazit zur Wechselwirkung von Verkehrssicherheit und Routenwahl

Abschließend sind zum Einfluss der Verkehrssicherheit auf die Routenwahl von Radfahrenden folgende Aussagen zu treffen:

- Auf Basis der Analyse des Einflusses von Unfallgeschehen in den Routenwahlmodellen zeigt sich, dass sich die Unfallhäufigkeit (objektive Sicherheit) entlang einer Route zwar signifikant, jedoch nur schwach negativ auf die Wahl einer Route auswirkt. Der analysierte Einfluss ist jedoch sehr gering. Daher kann geschlussfolgert werden, dass sich die objektive Sicherheit als Einflussfaktor nicht auf die Routenwahl niederschlägt (siehe Kap. 6.1). Dies gilt ebenso für die Betrachtung von geschlechts-, wegezweck- und radfahrtypenspezifischer Routenwahl, wobei sich zwischen den Gruppen keine Unterschiede zeigen.
- Auf Basis der Analyse des Einflusses gemeldeter kritischer Situationen in den Routenwahlmodellen wird ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen Örtlichkeiten subjektiver Unsicherheit und der Routenwahl gefunden, d. h. modelltheoretisch wählen Radfahrende tendenziell häufiger Routen an denen kritische Situationen auftraten. Dieser Zusammenhang ist kausal nur auf Basis der Datengrundlage erklärbar und sollte inhaltlich nicht interpretiert werden
- Auf Basis der Analyse des Einflusses des SiPo auf die Routenwahl zeigt sich, dass hohe SiPos (= geringe Verkehrssicherheit) einen stärkeren negativen Zusammenhang zur Routenwahlwahrscheinlichkeit aufweisen als hohe Unfallzahlen. Hohe Radverkehrsstärken sind hier (im Gegensatz zur Betrachtung von Unfalldaten) durch die Ermittlung der gUD normiert, was darauf schließen lässt, dass Radfahrende Strecken mit hoher objektiver Unsicherheit vermeiden. Dies könnte auch darauf zurückzuführen sein, dass Radfahrende tendenziell unsichere Infrastrukturen entlang eines Streckenabschnittes im Gegensatz zu einzelnen Punkten auch als unsicher empfinden.

Da der direkte Einfluss der Sicherheitsmaße in den Modellen nur schwache Zusammenhänge abbildet und vermutet wird, dass andere Einflussgrößen als Stellvertretergrößen für die subjektive und objektive Verkehrssicherheit stehen, soll abschließend die Wirkrichtung der Koeffizienten der Einflussgrößen in den Unfall- und Routenwahlmodellen (aus Abschnitt 5 und Abschnitt 6) verglichen werden. Ein Vergleich der Größe der Koeffizienten ist zwar möglich, jedoch aufgrund der unterschiedlichen Modellformen, unabhängigen Variablen und Variablenaggregation statistisch nicht sinnvoll. Es werden daher nur Einflussgrößen verglichen, die sowohl signifikant auf die Verkehrssicherheit als auch auf die Routenwahl wirken, wobei auch die Wirkung in Teilmodellen betrachtet wird. Die in beiden Modellen wirkenden Einflussgrößen sind: Fahrtweite/Länge, Radverkehrsaufkommen, Kfz-Verkehrsaufkommen, Radverkehrsinfrastruktur, Fußverkehrsdichte und Knotenpunktregelung.

Die Fahrtweite einer Routenalternative in der Routenwahl ist analog zu der Länge eines Abschnittes in der Verkehrssicherheitsbetrachtung zu interpretieren. In der Routenwahl wirken die Variablen „Bestweg“ (entspricht der kürzesten Route) und Fahrtweite signifikant auf die Auswahlwahrscheinlichkeit, wobei über beide Variablen interpretierend zu sagen ist, dass Radfahrende die kürzeste Route präferieren, jedoch bereit sind Umwege, also längere Routen zu fahren, wenn diese andere präferierte Eigenschaften besitzt. In der Verkehrssicherheitsbetrachtung wirkt die Streckenlänge als Offset, d. h. sie geht linear in die Modellschätzung ein. Zusammenfassend wirken sich längere Routen und Strecken sowohl negativ auf die Routenwahl als auch auf die Verkehrssicherheit aus. Radfahrende präferieren kürzere Routen und sind damit auch weniger Konflikten ausgesetzt, womit sich die Verkehrssicherheit erhöht, wobei beide Faktoren (Routenwahl und Sicherheit) auch durch die Wahl angenehmerer/sichererer Strecken ausgeglichen werden können.

Bezüglich des Radverkehrsaufkommens lässt sich feststellen, dass Radfahrende Routen präferieren, die auch von anderen Radfahrenden gewählt werden bzw. auf denen im Vergleich höhere Radverkehrsstärken vorliegen. Hinsichtlich der Verkehrssicherheit zeigt sich, dass zunehmende Radverkehrsstärken zwar zu höheren Unfallzahlen, also einer geringeren Verkehrssicherheit führen. Bei hohen Radverkehrsstärken nimmt die Unfallanzahl jedoch unterproportional im Vergleich zu der Radverkehrsstärke zu (Safety-in-Numbers-Effekt). Routen/Streckenabschnitte mit hohen Radverkehrsstärken werden somit gern gewählt und weisen zudem eine höhere Verkehrssicherheit auf als Strecken mit geringen Radverkehrsstärken.

Das Kfz-Verkehrsaufkommen wird in den Routenwahlmodellen zwar signifikant, jedoch ohne Einfluss auf die Auswahlwahrscheinlichkeit zu haben (Koeffizient ≈ 0). Inhaltlich ist das durch die Abbildung des DTV als Mittelwert über die Route zu erklären. Aussagekräftiger wäre die Betrachtung von Streckenabschnitten mit bspw. sehr hohen DTV-Werten, welche jedoch aufgrund der modelltheoretischen Anforderungen (Korrelation mit „Vorhandensein einer Radverkehrsanlage“) nicht im Modell aufgenommen werden konnte. Die Korrelation von Kfz-Verkehrsstärken und Vorhandensein einer Radverkehrsanlage ist dabei initial im Regelwerk (FGSV 2010) verankert, nach welchem die Wahl der Radverkehrsanlage auf Basis von Kfz-Verkehrsstärken und zulässiger Geschwindigkeit erfolgt. Das zeigt sich auch in der Wirkung von Kfz-Verkehrsstärken auf die Verkehrssicherheit, welche in der Analyse der Streckenabschnitte nicht bzw. nur mit kleinem Einfluss negative Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit zeigt. In der Betrachtung der Knotenpunkte hingegen zeigt die Kfz-Verkehrsstärke einen durchgängig negativen Einfluss auf die Verkehrssicherheit, weil dort Radfahrende und Kfz-Führende unabhängig der Führungsform (außer bei vollständig separater Signalisierung an Knotenpunkten mit LSA) Konfliktpunkte haben. Diese Sachverhalte lassen sich zusammenfassend so interpretieren, dass für die hohen Kfz-Verkehrsstärken nicht prinzipiell negative Auswirkungen auf die Routenwahl und Verkehrssicherheit abzuleiten sind. Ein negativer Zusammenhang zeigt sich eindeutig an Knotenpunkten bei hohen Kfz-Verkehrsstärken auf die Unfallanzahl. Auf Streckenabschnitten steht der Einfluss von der Kfz-Verkehrsstärke auf die Routenwahl und Sicherheit in Wechselwirkung zur Radverkehrsführungsform.

Zur Wirkung der Radverkehrsführungsform liegen differenziertere Ergebnisse vor. Hinsichtlich der Routenwahl zeigt sich, dass Radfahrende Routen mit Radverkehrsanlagen ggü. Routen mit Mischverkehrsführungen präferieren. Zur Differenzierung in Radverkehrsanlagen auf der Fahrbahn und im Seitenraum ist aufgrund der Merkmalausprägungen im Kollektiv keine Aussage zu treffen. In der Verkehrssicherheitsbetrachtung zeigen sich unterschiedliche Effekte für die verschiedenen Führungsformen: Mischverkehrsführungen sind auf Streckenabschnitten (ohne Anschlussknotenpunkte) insgesamt unsicherer als Radverkehrsanlagen im Seitenraum. Betrachtet man nur bestimmte Unfallkonstellationen, zeigen sie jedoch Sicherheitsvorteile (z.B. Einbiegen-Kreuzen Unfälle an Grundstückzufahrten). Im Vergleich der Radverkehrsanlagen auf Strecken sind Radfahrstreifen unsicherer als Radwege und auch als Mischverkehrsanlagen. Ein ähnliches Bild zeigt sich für die Radverkehrsführungsform an Knotenpunkten: Mischverkehrsführungen können hier aufgrund der besseren Sichtverhältnisse für einige Konstellationen Sicherheitsvorteile bringen. Eine absolute Bewertung der Verkehrssicherheitswirkung verschiedener Radverkehrsführungsformen ist auf Basis der Datengrundlage und Methodik nicht möglich. Zusammenfassend zeigt die Untersuchung Nutzungspräferenzen und Sicherheitsvorteile von Radverkehrsanlagen im Seitenraum, wobei dadurch nicht die sichere Führung des Radverkehrs im Mischverkehr bei geringen Verkehrsstärken ausgeschlossen werden soll.

Für die Fußverkehrsdichten zeigen Routenwahl- und Sicherheitsanalyse konträre Einflüsse: für die Routenwahl verringert sich mit steigendem Anteil von Streckenabschnitten, auf denen eine geringe Fußverkehrsdichte vorliegt, die Auswahlwahrscheinlichkeit. Für die Verkehrssicherheit zeigt sich an selbstständigen Wegen und Knotenpunkten eine geringere Sicherheit mit steigenden Fußverkehrsdichten. Anzumerken ist hier, dass die Fußverkehrsdichten mit dem Ersatzmaß „Dichte von POI“ angegeben wird, was eher die Belebtheit des Umfeldes beschreibt und Rückschlüsse auf das Fußverkehrsaufkommen geben soll. Radfahrende präferieren also Routen mit einem „lebendigen Umfeld“, da dort aber tendenziell auch mehr zu Fuß Gehende anzutreffen sind, kann das zu häufigeren Interaktionen und somit auch Unsicherheit führen.

Hinsichtlich des Einflusses der Verkehrsregelungsart von Knotenpunkten zeigt sich in der Betrachtung der Routenwahl, dass vor allem durch LSA geregelte Knotenpunkte einen, wenngleich schwachen, positiven Einfluss auf die Routenwahl ausüben. Der leicht positive Einfluss von rechts-vor-links geregelten Knotenpunkten wird auf die Präferenz zum Fahren im Nebennetz zurückgeführt, in dem zwangsläufig mehr dieser Knotenpunkte existieren. Radfahrende präferieren bei der Wahl ihrer Route offensichtlich LSA geregelte Knotenpunkte, da diese bspw. das Queren von Hauptverkehrsstraßen mit hohem Verkehrsaufkommen erleichtern. Für die Verkehrssicherheit zeigen LSA Knotenpunkte (unter Beachtung der Kfz-Verkehrsstärken) klare Sicherheitsvorteile. Radfahrende sind gewillt, die Zeitverluste an Knotenpunkten mit LSA zugunsten der größeren Sicherheit (oder Zuverlässigkeit) in Kauf zu nehmen.

Mit der Wahl einer Route entscheiden sich Radfahrende auch für die Nutzung sichererer/unsichererer Anlagen. Da Radfahrenden i. d. R. keine Information zum polizeilich erfassten Unfallgeschehen vorliegt, ist dieses als Indikator für deren Routenwahl nur bedingt geeignet. Vielmehr scheinen Radfahrende ein inneres Verständnis für unsichere Situationen zu haben (z. B. aufgrund von Erfahrungen). Insgesamt überwiegen in der Routenwahl Komfortkriterien wie Fahrtweite, Längsneigungen und Fahrbahnoberfläche. Dennoch sind in der Auswahl von Strecken mit Radverkehrsanlagen oder Präferenz von Routen entlang von Knotenpunkten mit LSA eine Tendenz zur Wahl sicherer Routen zu erkennen.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Arbeiten und Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojekts lassen sich wie folgt zusammenfassen: In dem Forschungsprojekt wurde eine internationale Literaturrecherche zu potenziellen Einflussfaktoren des Unfallgeschehens sowie der Routenwahl durchgeführt, Infrastruktur- und Verkehrsdaten für die Städte Dresden, München und Darmstadt erhoben und aufbereitet sowie mit Routendaten von Radfahrenden in den jeweiligen Städten ergänzt. Für Dresden wurden außerdem Mobilitätstagebücher zu kritischen Situationen analysiert. Die in Dresden erhobenen Datensätze wurden mittels Unfall- und Routenwahlmodellen analysiert, um Einflussfaktoren auf Unfallgeschehen und Routenwahl zu bestimmen. Sowohl die Unfallanzahl als auch die kritischen Situationen wurden als abhängige Variable in den Routenwahlmodellen geprüft. In den vereinfachten Modellversionen wurden die Datensätze in München und Darmstadt ebenso analysiert um vereinfachte Ansätze zur Abschätzung von Unfall- und Routenwahlwahrscheinlichkeit geprüft. Abschließend wurde der Einfluss verschiedener Sicherheitsmaße auf die Routenwahl analysiert und interpretiert. Die Projektergebnisse wurden in einem Webinar präsentiert und in einem Anwenderleitfaden festgehalten. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse kurz zusammengefasst.

In der Analyse der Einflussfaktoren auf die Verkehrssicherheit in der Literatur zeigt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Exposition (des Kfz- und Radverkehrs) und dem Radverkehrsunfallgeschehen. Weiterhin zeigen zulässige Höchstgeschwindigkeiten, Radverkehrsführungsform, Fahrstreifenbreiten, Gleise, Anlagen des ruhenden Verkehrs sowie Verkehrsregelungsart und Signalisierung von Knotenpunkten einen Einfluss auf das Radunfallgeschehen. Für den Einfluss von Verkehrssicherheit auf die Routenwahl liegen keine Studien vor. In bisherigen Untersuchungen wirken vorrangig Komfortkriterien, wobei einzelne signifikante Einflussgrößen (z. B. Kfz-Verkehrsstärke, Radverkehrsführungsform) auf die Routenwahl auch in Zusammenhang zur Verkehrssicherheit stehen.

In der Datenerhebung wurden bereits vorliegende Routendaten aufbereitet sowie Infrastruktur- und Betriebsdaten, Exposition und Unfälle erhoben und georeferenziert. Die Kollektivgrößen unterscheiden sich hier für Unfall- und Routenwahlmodellierung, da für die Unfallmodellierung nur Strecken und Knotenpunkte mit vollständiger Information zur Exposition betrachtet werden können, während die Routenwahl auch ohne diese Information statistisch geschätzt werden kann.

In der Analyse der Verkehrssicherheit wurden Modelle für Streckenabschnitte, Knotenpunkte und Knotenpunktzufahrten gerechnet. Für insgesamt 784 Streckenabschnitte (ca. 250 km; Führung straßenbegleitend oder mit Kfz-Verkehr) wurde in Gesamt- bzw. Teilmodellen nachgewiesen, dass die Radverkehrsstärke einen positiv degressiven Einfluss auf das Radunfallgeschehen besitzt. Dies bedeutet, dass die Unfallanzahl mit zunehmender Radverkehrsstärke steigt – jedoch bei höheren Verkehrsstärken weniger stark als bei niedrigeren Verkehrsstärken. Für die Kfz-Verkehrsstärke konnte kein Zusammenhang festgestellt werden. Infrastrukturell betriebliche Einflussgrößen, denen ein positiver Zusammenhang zur Unfallanzahl nachgewiesen werden konnte, sind: Gleise im Mischverkehr, Breite der Fahrbahn, Dichte der Grundstückzufahrten. Zum Einfluss der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten liegen widersprüchliche Aussagen vor. Für weitere 167 Streckenabschnitte (ca. 80 km) auf selbstständigen Wegen wurde nachgewiesen, dass ein positiver Zusammenhang zwischen Radverkehrsstärke und Unfallanzahl sowie Querschnittsbreite und Unfallanzahl besteht.

In den Knotenpunktmodellen wurden 176 Knotenpunkte analysiert, wobei ein Nachweis von der Rad- und Kfz-Verkehrsstärke auf das Unfallgeschehen (positiv-degressiver Zusammenhang, siehe oben) festgestellt wurde. Hier zeigt auch der Umfeldfaktor (Anzahl verkehrserzeugender „Quellen/Ziele“, zu Abschätzung des Fußverkehrsaufkommens) einen positiven Zusammenhang zur Unfallzahl. Weiterhin werden hier insbesondere betriebliche Eigenschaften signifikant – so zeigt z. B. die Verkehrsregelungsart LSA gegenüber anderen Regelungen (Rechts-vor-Links, verkehrszeichengeregt) Sicherheitsvorteile. Ausführlichere Aussagen lassen sich mittels der Zufahrtenmodelle für 477 Knotenpunktzufahrten treffen: hier zeigen sich ebenso positiv degressive Zusammenhänge zwischen Rad- und Kfz-Verkehrsstärke und der Unfallanzahl, jedoch teilweise bezogen auf

konfliktsspezifische Verkehrsrelationen. Auch hier weisen Zufahrten an LSA gegenüber Zufahrten an anderen Verkehrsregungen Sicherheitsvorteile auf. Zusätzlich zeigt eine separate Signalisierung des rechtsabbiegenden Kfz-Verkehrs einen unfallreduzierenden Einfluss auf alle Unfälle sowie (Rechts-)Abbiegeunfälle. Zufahrten mit Mischverkehrsführungen in der Annäherung haben im Vergleich zu Führungen mit Mischverkehr mit zusätzlichen Angeboten und Führungen auf Radverkehrsanlagen einen negativen Zusammenhang mit Abbiegeunfällen, dennoch wirkt auch das Vorhandensein einer Absetzung unfallreduzierend.

In den vereinfachten Modellformen konnten zwar mehr Infrastrukturelemente jedoch mit weniger differenzierten Datensätzen analysiert werden. Für die 1458 Streckenabschnitte auf Hauptverkehrsstraßen in Dresden, München und Darmstadt kann (wie in den differenzierten Modellen) ein Einfluss von Radverkehrsstärke und Gleisen auf die Unfallanzahl festgestellt werden. Zusätzlich wirkt hier die Kfz-Verkehrsstärke auf das Radunfallgeschehen. Im Gegensatz zu den differenzierten Modellen konnte außerdem der Einfluss der Radverkehrsführungsform quantifiziert werden. Dabei wird für Radwege ein negativer Zusammenhang zur Unfallanzahl (im Vergleich zu anderen Führungsformen) ermittelt. In den vereinfachten Knotenpunktmodellen werden für 333 Knotenpunkte mit LSA der Einfluss von Rad- und Kfz-Verkehrsstärke quantifiziert. Infrastrukturell betriebliche Einflussgrößen können aufgrund fehlender Datenverfügbarkeit nicht abgeschätzt werden.

Zur Analyse der Routenwahl wurden Routendaten zu Radfahrten in Dresden ($n \sim 4.000$), Darmstadt ($n \sim 4.500$) und München ($n \sim 11.600$) aufbereitet und analysiert. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Wirkung der Einflussfaktoren auf die Routenwahl der Radfahrenden eindeutige Richtungen aufweisen. Es zeigt sich, dass Radfahrende v.a. kürzere Routen mit geringeren Längsneigungen bevorzugen, auf denen Radverkehrsinfrastruktur vorhanden ist und die über eine gute Oberflächenbeschaffenheit verfügen. Zusätzlich wird das Vorhandensein von weiteren Radfahrenden entlang der Route als positiv wahrgenommen.

Die Routenwahl unterscheidet sich zwischen spezifischen Gruppen, wie bspw. Männern und Frauen oder zwischen unterschiedlichen Radfahr-Typen sowie nach unterschiedlichen Wegezwecken nur geringfügig. Es existieren zwar leicht unterschiedliche Präferenzen wie bspw. bei der Steigungsempfindlichkeit von Frauen ggü. Männern. Diese zeigen sich jedoch nur in leichten Abweichungen der Wirkstärke in den Modellen, nicht jedoch in unterschiedlichen Wirkrichtungen der Einflussfaktoren – also einer grundsätzlich anderen Routenwahl.

Dies trifft ebenso auf die Routenwahl in den untersuchten Städten (Dresden, Darmstadt und München) zu. Es existieren teilweise Abweichungen bei der Wirkstärke der Einflussfaktoren zwischen den unterschiedlichen Städten. Prinzipiell wirken sich die Einflussfaktoren aber in allen Städten auf die gleiche Art und Weise auf die Routenwahl aus.

Ein besonders aufschlussreiches Ergebnis ist, dass ein Großteil der Routenwahl offensichtlich durch wenige, aber für die Attraktivität einer Route besonders relevante, Variablen erklärt wird: Radverkehrsinfrastruktur, Längsneigung, Oberflächenqualität, Fahrtweite und Radverkehrsaufkommen. Dies scheinen die entscheidenden Determinanten der Routenwahl zu sein, auch wenn weitere Faktoren in die Entscheidung einfließen.

Die Analyse der Wirkung von Verkehrssicherheit auf die Routenwahl zeigt, dass Radfahrende Routen mit hohem Unfallgeschehen tendenziell meiden – dieser Effekt ist jedoch nur sehr schwach ausgeprägt. Routen entlang von Strecken mit einem hohen SiPo werden eindeutiger vermieden. Dies sind Strecken, die unter Beachtung der Radfahrexposition und Grundunfallrisikos besonders unfallauffällig sind, wobei dies z. B. durch hohe Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten oder bauliche Eigenschaften verursacht werden kann.

Zusammenfassend zeigt sich, dass sich längere Wege negativ auf Routenwahl und Verkehrssicherheit auswirken. Konsistent positiv wirken höhere Radverkehrsstärken sowie Radverkehrsanlagen im Seitenraum und Knotenpunkte mit LSA auf Routenwahl und Sicherheit. Eine Diskrepanz in Routenwahl und Sicherheit ergibt sich bei der Nutzung von Radfahrstreifen, die zwar präferiert werden, jedoch Sicherheitsdefizite aufweisen können und bei der Präferenz belebter Straßen, die für den Radverkehr zwar attraktiver sind, jedoch ein höheres Unfallrisiko aufweisen. In der abschließenden Betrachtung zeigt sich, dass Radfahrende ihre Routen insbesondere anhand von Komfortkriterien auswählen, jedoch auch Einflussgrößen der Verkehrssicherheit auf diese Routenwahl Auswirkungen zeigen.

Hinsichtlich zukünftiger Forschungsvorhaben zeigt die Analyse der Einflussgrößen auf die Verkehrssicherheit, dass trotz der detaillierten und umfangreichen Datengrundlage nur vereinzelt Aussagen zur Sicherheitswirkung infrastruktureller und betrieblicher Eigenschaften auf die Unfallzahlen getroffen werden konnten, was vermutlich an dem hohen Erklärungsgehalt der Exposition liegt. Alternativ könnten auch die signifikant auf die Unfallanzahl wirkenden Einflussgrößen nicht in der Erhebung erfasst worden sein, z.B. die Parkwechselfrequenz für Unfälle mit dem ruhenden Verkehr, wobei dies wiederum auch nur ein Expositionsmaß darstellt. Durch eine Erweiterung des Datensatzes (z. B. im Detailgrad der Untersuchung in Dresden) auf weitere Knotenpunkte, Streckenabschnitte und Kommunen könnten die Einflussfaktoren besser identifiziert werden. Weiterhin könnte die Analyse des Verkehrsverhaltens und kritischer Interaktionen mittels Videoanalysen Erkenntnisse zur objektiven Sicherheit liefern, da in den Analysen keine Information darüber vorliegt, ob die Verkehrsteilnehmenden die Anlagen regelkonform nutzen oder objektive Unsicherheit aus Regelverstößen resultiert.

Hinsichtlich der subjektiven Sicherheit haben sich die gemeldeten kritischen Situationen als nur bedingt geeigneter Indikator gezeigt. Einerseits haben die Radfahrenden nur Situationen gemeldet, wenn eine Infrastruktur tatsächlich durchfahren wurde, womit Faktoren der subjektiven Unsicherheit, die Radfahrende auf Basis erlebter Verkehrssituationen zu anderen Routen oder Modi wechseln lässt, nicht erfasst werden. Andererseits berichten die Personen von kritischen Situationen, die zwar räumlich verortet werden können, jedoch keine Information zu situativ verkehrlichen Eigenschaften beinhaltet, z.B. ob in der Situation ein LKW knapp vor der Person abgebogen ist. Zum besseren Verständnis der subjektiven Sicherheit sollten für diese Art des Datensatzes zukünftig weitere Informationen erhoben werden. Weiterhin sind Befragungen sowie Simulationsstudien notwendig, um ein besseres Verständnis für das Sicherheitsempfinden zu erlangen. Außerdem fehlt es an einer umfassenden Definition der subjektiven Sicherheit, um diese bewerten zu können.

Die kritische Reflexion der Ergebnisse und Methoden zur Routenwahl zeigt auf, dass die Analyse und deren Ergebnisse durch die Nutzung weiterer Daten und Methoden verbessert werden könnte. Die Nutzung anderer bzw. weiterer Primärdaten für mehrere und unterschiedliche deutsche Städte könnte vermutlich helfen, die Routenwahl des durchschnittlichen Radfahrenden noch genauer abzubilden. Darüber hinaus könnten weitere Sekundärdaten – allen voran weitere Daten zur subjektiven Sicherheit, s. o. – ebenfalls hilfreich sein, um die für Dresden erarbeiteten Ergebnisse zum Einfluss der subjektiven Sicherheit auf die Routenwahl zu revidieren oder zu festigen und für andere Städte zu analysieren. Die Nutzung anderer logistischer Regressionsmodelle bzw. von Modellerweiterungen oder die Nutzung gänzlich anderer Verfahren (z.B. maschinelle Lernverfahren) könnte möglicherweise dazu beitragen, die Routenwahl insgesamt noch akkurate abzubilden.

Die Untersuchung konnte zunächst Einblicke in die Routenwahl von Radfahrenden in drei deutschen Städten geben. Es bleibt jedoch offen, ob die Routenwahl der Radfahrenden in Dresden, Darmstadt und München repräsentativ für die Routenwahl in anderen deutschen Städten ist und woher die Unterschiede in der Routenwahl röhren. Daher sollten weitere Arbeiten mit vergleichenden Analysen angestrebt werden, um bspw. ähnliche Tendenzen im Routenwahlverhalten in anderen Städten zu untersuchen. Die Untersuchungen sollten dabei für verschiedene deutsche Städte angestrebt werden, um möglichst auch stadspezifische Unterschiede (z.B. in Topographie, Stadtgröße oder politischer Unterstützung des Radverkehrs) in der Analyse zu berücksichtigen. Dies könnte einerseits helfen, existierende Unterschiede bei der Routenwahl deutscher Radfahrender festzustellen. Andererseits könnten deutschlandweite Gemeinsamkeiten – also fundamentale Einflussfaktoren und deren Wirkung – herausgestellt werden.

Für die Analyse der Wirkung von Sicherheit auf Routenwahl können weitere Analysen zeigen, ob die Sicherheit beeinflussende Einflussgrößen (z. B. Differenzierung der Radverkehrsanlagen in Radwege und Radfahrstreifen) auch in den Routenwahlmodellen einen signifikanten Einfluss zeigen.

9 LITERATURVERZEICHNIS

Ahrens, Gerd-Axel; Wittwer, Rico; Hubrich, Stefan; Wittig, Sebastian; Ließke, Frank (2015): „Mobilität in Städten – SrV 2013“. Hg. v. Technische Universität Dresden und Lehrstuhl Verkehrs- und Infrastrukturplanung. Online verfügbar unter <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/srv-2013#intro>, zuletzt geprüft am 20.01.2020.

Allen-Munley, Cheryl; Daniel, Janice; Dhar, Sunil (2004): Logistic Model for Rating Urban Bicycle Route Safety. In: *Transportation Research Record* 1878 (1), S. 107–115. DOI: 10.3141/1878-13.

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 e. V. Unfallforschung der Versicherer (Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V, Nr. 29).

Alrutz, Dankmar; Bohle, Wolfgang; Müller, Holger; Prahlow, Heike (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).

Aultman-Hall, Lisa; Hall, Fred L. (1998): Ottawa-Carleton commuter cyclist on-and off-road incident rates. In: *Accident Analysis & Prevention* 30 (1), S. 29–43. DOI: 10.1016/S0001-4575(97)00059-6.

Aultman-Hall, Lisa; Kaltenecker, M. Georgina (1999): Toronto bicycle commuter safety rates. In: *Accident Analysis & Prevention* 31 (6), S. 675–686. DOI: 10.1016/S0001-4575(99)00028-7.

Aurich, Allan (2013): 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): Prognose für Verkehrssicherheit in Städten. ProViSta ; technischer Schlussbericht. Unter Mitarbeit von TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, Technische Informationsbibliothek und VMZ Berlin Betreibergesellschaft mbH, Berlin.

Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Plinke, Wulff; Weiber, Rolf (2016): Multivariate Analysemethoden. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bader, Roland; Dees, Jonathan; Geisberger, Robert; Sanders, Peter (2011): Alternative Route Graphs in Road Networks. In: Alberto Marchetti-Spaccamela und Michael Segal (Hg.): Theory and practice of algorithms in (computer) systems. First International ICST Conference, TAPAS 2011, Rome, Italy, April 18 - 20, 2011 ; proceedings, Bd. 6595. Berlin: Springer (Lecture Notes in Computer Science, 6595), S. 21–32.

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.

Baier, Reinhold (2018): Evaluation des Verkehrssicherheitsprogrammes Münster. Berlin: Unfallforschung der Versicherer, DGV.

Bark, Andreas; Krähling, Dorothea; Kutschera, René (2017): Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten. Bremen: Fachverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Verkehrstechnik, Heft 283). Online verfügbar unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2017/1795/pdf/V283_barrierefreies_Internet_PDF.pdf.

Berger, Ralf (2008): Entwicklung und Überprüfung von Ansätzen für eine sicherheitstechnische Differenzierung des städtischen Verkehrsstraßennetzes. Diplomarbeit. TU Dresden.

Berger, Ralf; Medicus, Matthias; Schmotz, Martin; Schüller, Hagen; Plesker, Miriam; Bakaba, Jean Emmanuel (2020): Verkehrssicherheit an Haltestellen des ÖPNV. Hg. v. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. Unfallforschung der Versicherer (Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. 63). Online verfügbar unter <https://udv.de/publikationen/forschungsberichte/verkehrssicherheit-haltestellen-des-oepnv>, zuletzt geprüft am 06.01.2020.

Broach, Joseph; Dill, Jennifer; Gliebe, John (2012): Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46 (10), S. 1730–1740. DOI: 10.1016/j.tra.2012.07.005.

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.

Buch, Thomas Skallebæk; Jensen, Søren Underlien (2017): Incidents between Straight-ahead Cyclists and Right-turning Motor Vehicles at Signalised Junctions. In: *Accident; analysis and prevention* 105, S. 44–51. DOI: 10.1016/j.aap.2016.07.035.

Casello, Jeffrey M.; Usyukov, Vladimir (2014): Modeling Cyclists' Route Choice Based on GPS Data. In: *Transportation Research Record* 2430 (1), S. 155–161. DOI: 10.3141/2430-16.

Charlton, Billy; Sall, Elizabeth; Schwartz, Michael; Hood, Jeff (2011): Bicycle route choice data collection using GPS-enabled smartphones.

Chen, Peng; Shen, Qing (2016): Built environment effects on cyclist injury severity in automobile-involved bicycle crashes. In: *Accident; analysis and prevention* 86, S. 239–246. DOI: 10.1016/j.aap.2015.11.002.

Chen, Peng; Shen, Qing; Childress, Suzanne (2017): A GPS data-based analysis of built environment influences on bicyclist route preferences. In: *International Journal of Sustainable Transportation* 12 (3), S. 218–231. DOI: 10.1080/15568318.2017.1349222.

Chen, Yanyan; Bell, Michael G. H.; Bogenberger, Klaus (2007): Reliable Pretrip Multipath Planning and Dynamic Adaptation for a Centralized Road Navigation System. In: *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.* 8 (1), S. 14–20. DOI: 10.1109/TITS.2006.889437.

Collins, Daniel J.; Graham, Daniel J. (2019): Use of Open Data to Assess Cyclist Safety in London. In: *Transportation Research Record* 2673 (4), S. 27–35. DOI: 10.1177/0361198119837221.

Eluru, Naveen; Bhat, Chandra R.; Hensher, David A. (2008): A mixed generalized ordered response model for examining pedestrian and bicyclist injury severity level in traffic crashes. In: *Accident; analysis and prevention* 40 (3), S. 1033–1054. DOI: 10.1016/j.aap.2007.11.010.

Elvik, Rune; Bjørnskau, Torkel (2017): Safety-in-numbers: A systematic review and meta-analysis of evidence. In: *Safety Science* 92, S. 274–282. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.07.017.

Elvik, Rune; Goel, Rahul (2019): Safety-in-numbers: An updated meta-analysis of estimates. In: *Accident; analysis and prevention* 129, S. 136–147. DOI: 10.1016/j.aap.2019.05.019.

FGSV (2003): Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen. ESN. Köln: FGSV-Verl. Online verfügbar unter <https://www.fgsv-verlag.de/esn-fgsv-reader>, zuletzt geprüft am 19.05.2022.

FGSV (2006): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen. RAST 06. Korrigierter Nachdruck Mai 2012. Köln: FGSV-Verl. (FGSV R1 - Regelwerke, 200).

FGSV (2010): Empfehlungen für Radverkehrsanlagen. ERA. Ausg. 2010. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; Verband der Schadenversicherer. Köln (FGSV R2 - Regelwerke, FGSV-284).

FGSV (2012a): Empfehlungen für Verkehrserhebungen. EVE. Ausg. 2012. Köln (FGSV, FGSV 125).

FGSV (2012b): Merkblatt zur örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen. M Uko. Ausg. 2012. Köln (FGSV R2 - Regelwerke, FGSV 316/1).

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>.

Francke, Angela; Lissner, Sven; Schmidt, Wolfgang; Anke, Juliane (2020): RadVerS – Mit Smartphones generierte Verhaltensdaten im Verkehr - Differenzierung des Nutzerverhaltens unterschiedlicher RadfahrerInnengruppen. Technische Universität Dresden. Dresden. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.26128/2021.239>.

Geus, Bas de; Vandebulcke, Grégory; Int Panis, Luc; Thomas, Isabelle; Degraeuwe, Bart; Cumps, Elke et al. (2012): A prospective cohort study on minor accidents involving commuter cyclists in Belgium. In: *Accident; analysis and prevention* 45, S. 683–693. DOI: 10.1016/j.aap.2011.09.045.

Ghanayim, Muhammad; Bekhor, Shlomo (2018): Modelling bicycle route choice using data from a GPS-assisted household survey. In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 2018 (2), 158-177.

Hantschel, Sebastian; Gerike, Regine; Enke, Markus (2020): NRVP 2020 – Radfahrende und zu Fuß Gehende auf gemeinsamen und getrennten selbstständigen Wegen. Verträglichkeit, Verkehrsablauf und Gestaltung. Schlussbericht. Online verfügbar unter <https://nationaler-radverkehrsplan.de/de/praxis/rad-und-fussverkehr-auf-gemeinsamen-und-getrennten/>, zuletzt geprüft am 22.11.2021.

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.

Hood, Jeffrey; Sall, Elizabeth; Charlton, Billy (2011): A GPS-based bicycle route choice model for San Francisco, California. In: *Transportation Letters* 3 (1), S. 63–75. DOI: 10.3328/TL.2011.03.01.63-75.

Hu, Yujie; Zhang, Yu; Shelton, Kyle S. (2018): Where are the dangerous intersections for pedestrians and cyclists: A colocation-based approach. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 95, S. 431–441. DOI: 10.1016/j.trc.2018.07.030.

Jensen, Søren Underlien (2008): Safety effects of blue cycle crossings: a before-after study. In: *Accident; analysis and prevention* 40 (2), S. 742–750. DOI: 10.1016/j.aap.2007.09.016.

Kang, Lei; Fricker, Jon D. (2013): Bicyclist commuters' choice of on-street versus off-street route segments. In: *Transportation* 40 (5), S. 887–902. DOI: 10.1007/s11116-013-9453-x.

Khatri, Ranjit; Cherry, Christopher R.; Nambisan, Shashi S.; Han, Lee D. (2016): Modeling Route Choice of Utilitarian Bikeshare Users with GPS Data. In: *Transportation Research Record* 2587 (1), S. 141–149. DOI: 10.3141/2587-17.

Kim, Joon-Ki; Kim, Sungyop; Ulfarsson, Guðmundur F.; Porrello, Luis A. (2007): Bicyclist injury severities in bicycle-motor vehicle accidents. In: *Accident; analysis and prevention* 39 (2), S. 238–251. DOI: 10.1016/j.aap.2006.07.002.

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.

Klima-Bündnis (2020): Über das Klima-Bündnis. Online verfügbar unter <https://www.klimabuendnis.org/ueberuns.html>, zuletzt aktualisiert am 29.10.2020, zuletzt geprüft am 29.10.2020.

Koh, P. P.; Wong, Y. D. (2013): Influence of infrastructural compatibility factors on walking and cycling route choices. In: *Journal of Environmental Psychology* 36, S. 202–213. DOI: 10.1016/j.jenvp.2013.08.001.

Kolrep-Rometsch, Harald; Leitner, Rodney; Platho, Christina; Richter, Thomas; Schreiber, Annika; Schreiber, Marcel (2013): Abbiegeunfälle Pkw/Lkw und Fahrrad. Berlin: GDV (Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V, Nr. 21).

Krizek, Kevin J.; El-Geneidy, Ahmed; Thompson, Kristin (2007): A detailed analysis of how an urban trail system affects cyclists' travel. In: *Transportation* 34 (5), S. 611–624. DOI: 10.1007/s11116-007-9130-z.

Landeshauptstadt Dresden (2020): Landeshauptstadt Dresden - Verkehrsnetz und Verkehrsbelegung. Verkehrsnetze - Autobahnen, Straßen, Wege, Brücken und Tunnel. Online verfügbar unter https://www.dresden.de/media/pdf/statistik/Statistik_3501_Verkehrsnetze_2014.pdf, zuletzt geprüft am 13.07.2021.

Ling, Rebecca; Rothman, Linda; Cloutier, Marie-Soleil; Macarthur, Colin; Howard, Andrew (2020): Cyclist-motor vehicle collisions before and after implementation of cycle tracks in Toronto, Canada. In: *Accident; analysis and prevention* 135, S. 105360. DOI: 10.1016/j.aap.2019.105360.

Lißner, Sven; von Harten, Maike; Huber, Stefan (2021): Mobilität von Radfahrenden in Deutschland - Nutzerbefragung im Rahmen der Kampagne Stadtradeln (Verkehrsökologische Schriftenreihe, 15/2021). Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-201073>, zuletzt geprüft am 22.11.2022.

Lott, Dale F.; Tardiff, Timothy; Lott, Donna Y. (1978): Evaluation by experienced riders of a new bicycle lane in an established bikeway system. In: *Transportation Research Record* 683, S. 40–46.

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, Gunther; Weiss, Peter (1990): Modelle diskreter Entscheidungen. Vienna: Springer Vienna. Online verfügbar unter <http://link.springer.com/10.1007/978-3-7091-6931-5>.

McFadden, Daniel (1974): Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In: Paul Zarembka (Hg.): Frontiers in econometrics. New York: Academic Press (Economic theory and mathematical economics).

Menghini, G.; Carrasco, N.; Schüssler, N.; Axhausen, K. W. (2010): Route choice of cyclists in Zurich. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 44 (9), S. 754–765. DOI: 10.1016/j.tra.2010.07.008.

Merz, Joachim (2016): Mikroökonomie – Diskrete Entscheidungsmodelle: LIT Verlag Münster. Online verfügbar unter https://www.leuphana.de/fileadmin/user_upload/Forschungseinrichtungen/ffb/files/publikationen/Skripte/Discrete_Choice/Merz_2016_Mikroökonomie_300_-_Diskrete_V13_21-2-2017.pdf.

Newson, Paul; Krumm, John (2009): Hidden Markov map matching through noise and sparseness. In:, 2009: ACM Press, S. 336. Online verfügbar unter <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1653771.1653818>, zuletzt geprüft am 15.01.2020:08:45.

Nordback, Krista; Marshall, Wesley E.; Janson, Bruce N. (2014): Bicyclist safety performance functions for a U.S. city. In: *Accident; analysis and prevention* 65, S. 114–122. DOI: 10.1016/j.aap.2013.12.016.

Ohm, Dirk; Fiedler, Frank; Zimmermann, Frank; Kraxenberger, Tobias; Maier, Reinhold; Hantschel, Sebastian; Otto, Michael (2015): Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen. Hannover, Bremen: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; Fachverl. NW in der Carl-Schünemann-Verl.-GmbH (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik, 257). Online verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fn15/834443678.pdf>.

Öztürk, Riza (2001): Eine mikroökonometrische Analyse der Bestimmungsfaktoren für die Selbständigkeit von Ausländern: LIT Verlag Münster (7).

Pippig, Karsten (2010): Verfahren zur Ableitung kleinerer Maßstäbe aus Daten der Digitalen Übersichtskarte der Stadt Dresden 1:25.000. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Dresden.

Richter, Thomas; Beyer, Oliver; Ortlepp, Jörg; Schreiber, Marcel (2019): Sicherheit und Nutzbarkeit markierter Radverkehrsführungen. Hg. v. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. Unfallforschung der Versicherer (Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V). Online verfügbar unter <https://udv.de/de/publikationen/forschungsberichte/sicherheit-und-nutzbarkeit-markierter-radverkehrsfuehrungen>, zuletzt geprüft am 06.01.2020.

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 and prevention* 43 (3), S. 853–861. DOI: 10.1016/j.aap.2010.11.005.

Schober, Philipp (2018): Quantifizierung von Radverkehrsrisiken - Ermittlung einer infrastrukturabhängigen Unfallrate für Wien. Diplomarbeit. TU Wien, Wien. Institut für Verkehrswissenschaften. Online verfügbar unter <http://repository.tuwien.ac.at/obvutwhs/download/pdf/2874732?originalFilename=true>, zuletzt geprüft am 10.01.2020.

Schüller, Hagen; Plesker, Miriam; Hantschel, Sebastian; Kühn, Benjamin; Gerike, Regine (2019): Akzeptanz und Verkehrssicherheit des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen (unveröffentlicht). Entwurf Schlussbericht. Bundesanstalt für Straßenwesen.

Stadtradeln (2020): Stadtradeln - Radeln für ein gutes Klima. Online verfügbar unter <https://www.stadtradeln.de/home>, zuletzt aktualisiert am 29.10.2020, zuletzt geprüft am 29.10.2020.

Strauss, Jillian; Miranda-Moreno, Luis F.; Morency, Patrick (2013): Cyclist activity and injury risk analysis at signalized intersections: a Bayesian modelling approach. In: *Accident; analysis and prevention* 59, S. 9–17. DOI: 10.1016/j.aap.2013.04.037.

Strauss, Jillian; Miranda-Moreno, Luis F.; Morency, Patrick (2015): Mapping cyclist activity and injury risk in a network combining smartphone GPS data and bicycle counts. In: *Accident; analysis and prevention* 83, S. 132–142. DOI: 10.1016/j.aap.2015.07.014.

Suchanek, Andreas (1994): Ökonomischer Ansatz und theoretische Integration: Mohr Siebeck (84). Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=0YEwKSh2c2cC>.

Tasic, Ivana; Elvik, Rune; Brewer, Simon (2017): Exploring the safety in numbers effect for vulnerable road users on a macroscopic scale. In: *Accident; analysis and prevention* 109, S. 36–46. DOI: 10.1016/j.aap.2017.07.029.

Taylor, M.; Lynam, D.; Baruya, A. (2000): The Effects of Drivers' Speed on the Frequency of Road Accidents. Transport Research Laboratory (TRL Report, 421). Online verfügbar unter <https://TRL.co.uk/sites/default/files/TRL421.pdf>, zuletzt geprüft am 10.01.2020.

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.

- Ton, Danique; Cats, Oded; Duives, Dorine; Hoogendoorn, Serge (2017): How Do People Cycle in Amsterdam, Netherlands? Estimating Cyclists' Route Choice Determinants with GPS Data from an Urban Area. In: *Transportation Research Record* 2662 (1), S. 75–82. DOI: 10.3141/2662-09.
- Treiber, M. (2018): Verkehrsökonometrie - Methoden und Modelle: Technische Universität Dresden. Online verfügbar unter https://mtreiber.de/Vkoek_Ma_Skript/Verkehrsoekonometrie_Ma.pdf.
- 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).
- Ullmann, Cornelia; Mehlhorn, Claudia (2012): Logistische Regression. Ein Verfahren zum Schätzen von Wahrscheinlichkeiten. TU Chemnitz. Chemnitz. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/5332533-Logistische-regression.html>, zuletzt aktualisiert am 27.05.2021.000Z, zuletzt geprüft am 27.05.2021.106Z.
- Uncles, Mark D.; Ben-Akiva, Moshe; Lerman, Steven R. (1987): Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand. In: *The Journal of the Operational Research Society* 38 (4), S. 370. DOI: 10.2307/2582065.
- UZH (2018): Logistische Regressionsanalyse. Methodenberatung. Universität Zürich. Online verfügbar unter https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/zusammenhaenge/lreg.html#2.2._Die_Maximum-Likelihood-Schätzung, zuletzt aktualisiert am 13.08.2018, zuletzt geprüft am 10.01.2020.
- Vandenbulcke, Grégory; Thomas, Isabelle; Int Panis, Luc (2014): Predicting cycling accident risk in Brussels: a spatial case-control approach. In: *Accident; analysis and prevention* 62, S. 341–357. DOI: 10.1016/j.aap.2013.07.001.
- Wang, Xuesong; Abdel-Aty, Mohamed; Nevarez, Alexis; Santos, Joseph B. (2008): Investigation of Safety Influence Area for Four-Legged Signalized Intersections. In: *Transportation Research Record* 2083 (1), S. 86–95. DOI: 10.3141/2083-10.
- Wittink, L. T. (2011): Choice modelling: An overview of theory and development in individual choice behaviour modelling. Online verfügbar unter https://beta.vu.nl/nl/Images/werkstuk-wittink_tcm235-237206.pdf, zuletzt geprüft am 20.01.2020.
- Zimmermann, Maëlle; Mai, Tien; Frejinger, Emma (2017): Bike route choice modeling using GPS data without choice sets of paths. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 75, S. 183–196. DOI: 10.1016/j.trc.2016.12.009.

ANLAGEN

Anlage 1	Flächenkategorisierung der Umfeldnutzung aus der EBK	1
Anlage 2	Hinweise zu der Modellrechnung.....	2
Anlage 3	Unfallstatistik Strecken.....	3
Anlage 4	Unfallstatistik Annäherungsbereiche	7
Anlage 5	Unfallstatistik Knotenpunkte	8
Anlage 6	Unfallstatistik Knotenpunktzufahrten.....	12
Anlage 7	Unfallstatistik Einfache Modelle.....	15
Anlage 8	Streuung und Ausreißer der Variablen.....	16
Anlage 9	Auswahl, Ausschluss und Aggregation der Variablen	25
Anlage 10	Korrelationsmatrix Routenwahl	26
Anlage 11	Kennwerte und Koeffizienten der dezidierten Routenwahlmodelle	27

Anlage 1 Flächenkategorisierung der Umfeldnutzung aus der EBK

Flächenklassifizierung										
[H] Wohnbebauung					[I] Verkehr					
[P] Öffentliche Gebäude			[I] Industrie/Gewerbe		[G] Grünanlagen					
A1 - Wohnbebauung	B1 - Wohnbebauung	C1 - Wohnbebauung	[A] Landwirt. Flächen			[W] Gewässer			[U] Sonstige Flächen	
G1 - Bahngelände	P1 - Autobahn	P2 Parkplätze, großfl. Garagenanlagen	[P] Öffentliche Gebäude			[I] Industrie/Gewerbe			[G] Grünanlagen	
D1 - Wohnbebauung	[I] Verkehr			A3 - Öffentl. Gebäude	B3 - Öffentl. Gebäude	C4 - Industrie/ Gewerbe	D4 - Industrie/ Gewerbe	E4 - Industrie/ Gewerbe	F4 - Industrie/ Gewerbe	G4 - Industrie/ Gewerbe
C1 - Wohnbebauung	P3 - Plätze	P4	P5	P6	E32 - Sonst. Sport- u. Freizeitanlagen (bebaut)	F32 - Sonst. Sport- u. Freizeitanlagen (bebaut)	G32 - Sonst. Sport- u. Freizeitanlagen (bebaut)	H32 - Sonst. Sport- u. Freizeitanlagen (bebaut)	I32 - Sonst. Sport- u. Freizeitanlagen (bebaut)	J32 - Sonst. Sport- u. Freizeitanlagen (bebaut)
A2 - Mischbebauung	B2 - Mischbebauung	C2 - Mischbebauung	[H] Wohnbebauung			[I] Verkehr			[G] Grünanlagen	
A1 - Wohnbebauung	B1 - Wohnbebauung	C1 - Wohnbebauung	P1 - Autobahn	P2 Parkplätze, großfl. Garagenanlagen	P3 - Plätze	P4	P5	P6	E1 - Friedhof	F1 - Friedhof
A3 - Öffentl. Gebäude	B3 - Öffentl. Gebäude	C3 - Öffentl. Gebäude	D3 - Öffentl. Gebäude	E3 - Öffentl. Gebäude	F3 - Verkehrsbedeckung	G3 - Verkehrsbedeckung	H3 - Verkehrsbedeckung	I3 - Verkehrsbedeckung	J3 - Verkehrsbedeckung	K3 - Verkehrsbedeckung
A4 - Industrie/ Gewerbe	B4 - Industrie/ Gewerbe	C4 - Industrie/ Gewerbe	D4 - Industrie/ Gewerbe	E4 - Industrie/ Gewerbe	F4 - Industrie/ Gewerbe	G4 - Industrie/ Gewerbe	H4 - Industrie/ Gewerbe	I4 - Industrie/ Gewerbe	J4 - Industrie/ Gewerbe	K4 - Industrie/ Gewerbe
E12 - Freibad	E32 - Sonst. Sport- u. Freizeitanlagen (unbebaut)	F21 - Klein- u. Wochenendgärten	F42 - Sonst. Grünflächen	G22 - Große Hausgärten	H3 - Wembau	I1 - Parkanlagen	J2 - Zoo, Bot. Garten	K1 - Friedhof	L1 - Wald/Gehötz	M1 - Friedhof
F1 - Kleingärten	G1 - Friedhof	H3 - Wembau	I4 - Grünland	J4 - Grünland	K1 - Friedhof	L1 - Parkanlagen	M1 - Friedhof	N1 - Abgrabungen	O - Baustellen	P1 - Friedhof
G23 - Grabeland im Außenbereich	H5 - Erweiterungsanbau	I5 - Rückhalteanlagen	J5 - Mischbebauung	K5 - Mischbebauung	L5 - Mischbebauung	M5 - Mischbebauung	N5 - Mischbebauung	O5 - Mischbebauung	P5 - Mischbebauung	Q5 - Unbebaute Siedlungs- u. Brachflächen

Abbildung A 1-1: Flächenkategorisierung der Umfeldnutzung aus der EBK

Anlage 2 Hinweise zu der Modellrechnung

Wald-Test der Koeffizienten

Der Wald-Test prüft die Koeffizienten der Einflussgrößen auf Signifikanz. Er testet, inwieweit die im Modell zu beobachtenden Ausprägungen eine Änderung des Erwartungswerts nach sich ziehen. Es werden Werte unter 0,05 angestrebt.

Likelihood-Ratio-Test der Modelleffekte

Mithilfe des Likelihood-Ratio-Tests wird der Informationsgewinn getestet, den die Einflussgröße gegenüber allen anderen Einflussgrößen im Modell hat. Durch den Test wird ausgeschlossen, dass mehrere Einflussgrößen, die auf ähnliche Weise mit der empirischen Unfallanzahl korrelieren in dasselbe Modell aufgenommen werden. Es werden Werte unter 0,05 angestrebt.

Informationskriterium nach Akaike (AIC)

Das Informationskriterium nach Akaike beschreibt die Signifikanz und Komplexität des Modells. Komplexe Modelle (mit einer hohen Anzahl an Einflussgrößen) erhalten höhere AIC. Der AIC dient dem Vergleich zweier Modelle derselben Modellstufe. Ein Anwärtermodell mit einem geringeren AIC wird dabei höher bewertet.

Pearson-Chi-Quadrat

Die Anpassungsgüte des Modells wird mittels Pearson-Chi-Quadrat geprüft. Der Test ermöglicht den Vergleich zwischen Einzelmodell und Anwärtermodellen. Dabei wird die Anpassung des im Modell berechneten Erwartungswerts der Unfallanzahl an die empirische Unfallanzahl geprüft.

Das Modell beschreibt die Einflüsse vollständig, wenn der Quotient aus Chi-Quadrat-Wert und der Anzahl der Freiheitsgrade df (= Anzahl der Kreiszufahrten minus Anzahl der Modellparameter) den Wert Eins beträgt. In diesem Fall lassen sich die Residuen zur empirischen Unfallanzahl vollständig auf den stochastischen Einfluss des Unfallgeschehens zurückführen. Systematische Abweichungen werden vollständig durch die im Modell enthaltenen Variablen erklärt. Ist der Quotient Chi-Quadrat/df größer als Eins, sind die systematischen Unterschiede nicht vollständig erklärt.

Lesen der Unfallmodelle

Strecken U(P,S)_Typ 1	Parameter	Modellkoeffizient Ermittlung Faktor: e ^{Koeffizient}		Standartfehler und Konfidenzintervall				Modellgüte mit negativer Binomialverteilung				Poisson-Verteilung			
		Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung	Vert.- Param.	Pearson- χ ²	AIC	Pearson- χ ²	df	χ ² /df	
(Konstanter Term)	-	4,247	0,000	0,458	-	5,14	-	3,35	0,000	2,350	782,3	1183	1499,8	781	1,920
In(DTV_Rad)		0,448	0,000	0,072	0,31	0,59	0,000								
Gleise im Mischverkehr = ja		1,209	0,001	0,357	0,51	1,91	0,000								
Gleise im Mischverkehr = nein		-													
mit		Signifikanz des Modellkoeffizienten Poissonverteilung (Wald-Test)				Signifikanz der Modelleffekte Likelihood-Ratio-Test				Modellgüte					

Abbildung A 2-1: Beispielhafte Darstellung Unfallmodell

Die Werte der Modellgüte und Signifikanztest sind vorhergehend erläutert. Die Koeffizienten sind auf Grundlage der negativen Binomialverteilung berechnet. Für das abgebildete Modell ergibt sich die Modellgleichung zu:

$$U_{\text{Erw}} = e^{-4,247} \cdot T \cdot L \cdot DTV_Rad^{0,448} \cdot e^{1,209} \cdot \text{Gleise im Mischverkehr}$$

mit U_{Erw}	= Erwartungswert der Unfallanzahl	[-]	
T	= Betrachtungszeitraum	[a]	
L	= Länge des Streckenabschnitts	[km]	
DTV_Rad	= Durchschnittlich täglicher Verkehr	[Rad/24h]	(entfällt bei Knotenpunkten)
Gleise im Mischverkehr =	0, wenn nein; 1, wenn ja	[-]	

Anlage 3 Unfallstatistik Strecken

Merkmal	Ausprägung	Anzahl [-]	Länge [km]	Anteil Anzahl	Anteil Länge	Unfalldichte $[U(P,S)_{RF}/(km \cdot Jahr)]$	Unfallrate _{Rad} $[U(P,S)_{RF}/(1Mio \cdot Rf \cdot km \cdot Jahr)]$	Unfallrate _{Rad+Kfz} $[U(P,S)_{RF}/(1Mio \cdot (Rf+Kfz) \cdot km \cdot Jahr)]$
	gesamt	784	255,5	-	-	1,19	9,43	0,40
Netzfunktion	Hauptverkehrsstr.	580	201,9	74%	79%	1,25	10,15	0,28
	Nebennetzstr.	204	53,5	26%	21%	1,00	7,36	0,74
Anzahl Fahrstreifen	1	21	5,3	3%	2%	1,17	8,51	0,99
	2	639	214,2	82%	84%	1,09	10,39	0,42
	3	24	5,7	3%	2%	1,35	5,64	0,23
	4	97	30,0	12%	12%	1,84	4,47	0,20
	5	3	0,4	0%	0%	0,40	1,51	0,05
Mitteltrennung	Keine	353	111,5	45%	44%	0,84	9,00	0,54
	Markiert	326	113,0	42%	44%	1,39	11,53	0,29
	Baulich	105	31,0	13%	12%	1,74	4,33	0,26
Radverkehrs-führungsform beidseitig	Mischverkehr	468	152,4	60%	60%	0,80	9,24	0,43
	Mischverkehr mit Schulzstreifen	32	8,4	4%	3%	1,53	5,11	0,35
	Mischverkehr; Gehweg "Radfahrende frei"	69	23,5	9%	9%	1,81	17,95	0,51
	Mischverkehr mit Schulzstreifen; Gehweg "Radfahrende frei"	1	0,3	0%	0%	0,00	0,00	0,00
	Radfahrstreifen	43	12,6	5%	5%	2,74	5,50	0,43
	Radweg	65	19,2	8%	8%	1,78	5,14	0,24
	Gemeinsamer Geh- und Radweg	42	20,1	5%	8%	1,25	10,95	0,27
	Sonstige Kombination	64	19,0	8%	7%	0,80	9,24	0,43
	Mischverkehrskombination	595	191,8	76%	75%	0,99	10,26	0,43
	Radverkehrsanlagen-kombination	165	57,6	21%	23%	1,80	6,49	0,28
Abstand Radweg – Fahrbahn/ruhender Verkehr	nicht vorhanden	714	231,6	91%	91%	1,19	9,74	0,42
	vorhanden	70	23,9	9%	9%	1,13	6,20	0,21
Sicherheits-Trennstreifen zum ruhenden Verkehr	nicht vorhanden	774	251,8	99%	99%	1,17	9,42	0,40
	vorhanden	10	3,7	1%	1%	2,28	10,31	0,43
Oberfläche beidseitig	Asphalt	626	206,1	80%	81%	1,18	9,59	0,41
	Pflaster	66	21,3	8%	8%	1,42	9,64	0,26
	Kopfsteinpflaster	26	8,1	3%	3%	1,11	5,81	0,74
	Natur, gebunden (Schotter)	1	0,4	0%	0%	0,45	1,52	0,19
	Unterschiedlich je Seite	65	19,6	8%	8%	1,25	11,93	0,25
Gleise im Mischverkehr	nicht vorhanden	732	239,7	93%	94%	1,10	8,69	0,38
	vorhanden	52	15,7	7%	6%	2,44	19,80	0,65
Ruhender Verkehr	nicht vorhanden	412	145,0	53%	57%	1,20	9,65	0,24
	einseitig	161	44,7	21%	18%	1,04	10,17	0,45
	beidseitig	209	65,1	27%	25%	1,29	8,50	0,66
	beidseitig alternierend	2	0,6	0%	0%	0,00	0,00	0,00
Art des ruhenden Verkehrs	Längs	331	100,1	89%	91%	1,14	9,29	0,55
	Schräg	4	0,8	1%	1%	2,36	8,30	0,79
	Senkrecht	13	3,1	3%	3%	0,93	8,83	0,49
	Kombination	24	6,5	6%	6%	1,48	8,01	0,86
Lage des ruhenden Verkehrs	Fahrbahn	212	66,7	57%	60%	0,86	8,94	0,54
	Fahrbahn markiert	15	4,5	4%	4%	1,98	6,19	0,42
	Fahrbahn baulich	64	16,5	17%	15%	2,00	9,76	0,80
	Seiteraum	51	15,7	14%	14%	1,10	10,97	0,32
	Kombination	30	7,1	8%	6%	1,36	8,11	0,75
Zulässige Geschwindigkeit	30 km/h	152	38,8	19%	15%	1,13	10,45	0,83
	50 km/h	600	192,8	77%	75%	1,24	9,46	0,31
	60 km/h	19	9,9	2%	4%	0,75	4,91	0,08
	80 km/h	5	7,8	1%	3%	0,19	3,62	0,02
	100 km/h	8	6,2	1%	2%	0,02	1,57	0,02
	größer als 30 km/h	632	216,7	81%	85%	1,20	9,18	0,29

Strecken U(P,S)	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standardfehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.-Param.	Pearson-χ ₂	AIC	Pearson-χ ₂	df	χ ² /df
Nullmodell	(Konstanter Term)	0,150	0,003	0,051	0,05	0,25	-	1,174	846,4	2698	2740,7	783	3,500
DTV-Rad	(Konstanter Term)	- 3,192	0,000	0,241	- 3,67	- 2,72	0,020	0,638	922,3	2489	1911,6	782	2,445
	In(DTV_Rad)	0,533	0,000	0,037	0,46	0,61	0,000						
Endmodell	(Konstanter Term)	- 3,791	0,000	0,287	- 4,35	- 3,23	0,009	0,750	782,8	2441	1665,3	778	2,141
	In(DTV_Rad)	0,540	0,000	0,044	0,45	0,63	0,000						
	Dichte Grundstückzufahrten [Zuf/km]	0,012	0,000	0,002	0,01	0,02	0,000						
	Breite Fahrbahn [m]	0,060	0,000	0,016	0,03	0,09	0,001						
	Gleise im Mischverkehr = ja	0,696	0,000	0,162	0,38	1,01	0,000						
	Gleise im Mischverkehr = nein	-	-										
	zul Höchstgeschwindigkeit > 30km/h	- 0,359	0,002	0,114	- 0,58	- 0,14	0,005						
	zul Höchstgeschwindigkeit ≤ 30km/h	-	-										

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 3-1: Endmodell Strecken alle Unfalltypen U(P,S)

Strecken U(P,S)	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standardfehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.-Param.	Pearson-χ ₂	AIC	Pearson-χ ₂	df	χ ² /df
Alternativmodell	(Konstanter Term)	- 3,657	0,000	0,290	- 4,23	- 3,09	0,180	1,000	774,8	2490	1680,7	783	2,147
Haltestellen	In(DTV_Rad)	0,573	0,000	0,042	0,49	0,66	0,000						
	Dichte Grundstückzufahrten [Zuf/km]	0,034	0,000	0,009	0,02	0,05	0,001						
	Dichte Haltestellen [Hstf/km]	0,012	0,000	0,002	0,01	0,02	0,000						
	zul Höchstgeschwindigkeit > 30km/h	- 0,227	0,045	0,113	- 0,45	- 0,00	0,079						
	zul Höchstgeschwindigkeit ≤ 30km/h	-	-										

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 3-2: Alternativmodell Strecken alle Unfalltypen U(P,S)

Strecken U(P,S)_Typ 1	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standardfehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.-Param.	Pearson-χ ₂	AIC	Pearson-χ ₂	df	χ ² /df
Nullmodell	(Konstanter Term)	- 1,334	0,000	0,088	- 1,51	- 1,16	-	2,138	970,0	1249	1850,7	783	2,364
DTV-Rad	(Konstanter Term)	- 4,213	0,000	0,489	- 5,17	- 3,26	0,000	1,455	1313,4	1195	1947,6	782	2,491
	In(DTV_Rad)	0,463	0,000	0,074	0,32	0,61	0,000						
Endmodell	(Konstanter Term)	- 4,247	0,000	0,458	- 5,14	- 3,35	0,000	2,350	782,3	1183	1499,8	781	1,920
	In(DTV_Rad)	0,448	0,000	0,072	0,31	0,59	0,000						
	Gleise im Mischverkehr = ja	1,209	0,001	0,357	0,51	1,91	0,000						
	Gleise im Mischverkehr = nein	-	-										

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 3-3: Endmodell Strecken Fahrunfälle U(P,S)_Typ1

Strecken U(P,S)_Typ 2	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standardfehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.-Param.	Pearson-χ ₂	AIC	Pearson-χ ₂	df	χ ² /df
Nullmodell	(Konstanter Term)	- 2,149	0,000	0,110	- 2,36	- 1,93	-				1338,1	783	1,709
DTV-Rad	(Konstanter Term)	- 5,650	0,000	0,527	- 6,68	- 4,62	0,000				1092,4	782	1,397
	In(DTV_Rad)	0,561	0,000	0,080	0,40	0,72	0,000						
Endmodell	(Konstanter Term)	- 7,459	0,000	0,725	- 8,88	- 6,04	0,000	1,463	783,4	716	1014,9	781	1,300
	In(DTV_Rad)	0,741	0,000	0,100	0,54	0,94	0,000						
	Anz_Zuf_je_km	0,026	0,000	0,004	0,02	0,03	0,000						

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 3-4: Endmodell Strecken Abbiegeunfälle U(P,S)_Typ2

Strecken U(P,S)_Typ 3	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Nullmodell	(Konstanter Term)	- 1,265	0,000	0,092	- 1,45	- 1,08	-	2,567	987,1	1280	2128,0	783	2,718
DTV-Rad	(Konstanter Term)	- 3,711	0,000	0,424	- 4,54	- 2,88	0,000	2,063	878,4	1243	1738,4	782	2,223
	In(DTV_Rad)	0,398	0,000	0,069	0,26	0,53	0,000						
DTV-Kombi	(Konstanter Term)	- 9,544	0,000	1,054	- 11,61	- 7,48	0,000	1,713	811,2	1201	1533,8	781	1,964
	In(DTV_Rad)	0,213	0,001	0,065	0,08	0,34	0,002						
	In(DTV_Kfz)	0,752	0,000	0,115	0,53	0,98	0,000						
Endmodell	(Konstanter Term)	- 8,993	0,000	1,054	- 11,06	- 6,93	0,000	1,800	783,9	1176	1411,9	779	1,812
	In(DTV_Rad)	0,226	0,001	0,066	0,10	0,36	0,002						
	In(DTV_Kfz)	0,510	0,000	0,134	0,25	0,77	0,000						
	Dichte Grundstückzufahrten [Zuf/km]	0,020	0,000	0,004	0,01	0,03	0,000						
	Breite Fahrbahn [m]	0,126	0,000	0,035	0,06	0,19	0,001						

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 3-5: Endmodell Strecken Einbiegen/Kreuzen-Unfälle U(P,S) _Typ3

Strecken U(P,S)_Typ 3	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Alternativmodell 1	(Konstanter Term)	- 4,904	0,000	0,518	- 5,92	- 3,89	0,000	2,600	787,0	1232	1708,6	780	2,191
Tempo 30	In(DTV_Rad)	0,452	0,000	0,073	0,31	0,60	0,000						
	Dichte Grundstückzufahrten [Zuf/km]	0,015	0,000	0,004	0,01	0,02	0,001						
	zul Höchstgeschwindigkeit > 30km/h	0,567	0,020	0,244	0,09	1,04	0,028						
	zul Höchstgeschwindigkeit ≤ 30km/h	-											
Alternativmodell 2	(Konstanter Term)	- 3,254	0,000	0,496	- 4,23	- 2,28	0,000	2,250	784,0	1207	1557,6	780	1,997
Mischverkehr	In(DTV_Rad)	0,325	0,000	0,070	0,19	0,46	0,000						
	Dichte Grundstückzufahrten [Zuf/km]	0,018	0,000	0,004	0,01	0,03	0,000						
	Radverkehrsführung Mischverkehr = ja	- 0,985	0,000	0,178	- 1,33	- 0,64	0,000						
	Radverkehrsführung Mischverkehr = nein	-											

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 3-6: Alternativmodell Strecken Einbiegen/Kreuzen-Unfälle U(P,S) _Typ3

alle Strecken U(P,S)_Typ5	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Nullmodell	(Konstanter Term)	- 1,950	0,000	0,119	- 2,18	- 1,72	-	1,000	1500,3	898	1938,5	783	2,460
DTV-Rad	(Konstanter Term)	- 6,297	0,000	0,761	- 7,79	- 4,81	0,000	3,680	952,8	787	1660,1	782	2,109
	In(DTV_Rad)	0,694	0,000	0,113	0,47	0,92	0,000						
Endmodell	(Konstanter Term)	- 7,990	0,000	0,803	- 9,56	- 6,42	0,000	1,844	970,2	724	1332,6	781	1,695
	In(DTV_Rad)	0,788	0,000	0,113	0,57	1,01	0,000						
	Anteil Länge ruhender Verkehr [%]	2,439	0,000	0,272	1,91	2,97	0,000						

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 3-7: Endmodell Strecken Unfälle durch ruhenden Verkehr U(P,S) _Typ5: alle Strecken

Zufahrten U(P,S)_Typ6	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Nullmodell	(Konstanter Term)	- 1,807	0,000	0,117	- 2,04	- 1,58	-	1,000	2013,7	1041	2662,9	783	3,401

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 3-8: Nullmodell Strecken Unfälle im Längsverkehr U(P,S)

selbst. Wege U(P,S)	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Nullmodell	(Konstanter Term)	- 1,358	0,000	0,177	- 1,71	- 1,01	-	2,580	174,0	299	397,2	166	2,393
DTV	(Konstanter Term)	- 7,319	0,000	0,975	- 9,23	- 5,41	0,000	0,640	304,1	254	386,4	165	2,342
	In(DTV_Rad)	0,865	0,000	0,132	0,61	1,12	0,000						
Endmodell	(Konstanter Term)	- 7,574	0,000	1,457	- 10,43	- 4,72	0,000	6,300	165,0	282	284,6	164	1,736
	In(DTV_Rad)	0,754	0,000	0,197	0,37	1,14	0,000						
	QS_Breite RVF	0,172	0,000	0,030	0,11	0,23	0,006						

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)**Abbildung A 3-9: Endmodell Strecken: selbstständige Wege alle Unfalltypen U(P,S)**

selbst. Wege U(P,S)	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Alternativmodell	(Konstanter Term)	- 7,609	0,000	1,005	- 9,58	- 5,64	0,000	0,348	312,8	238	329,2	164	2,007
	In(DTV_Rad)	0,861	0,000	0,134	0,60	1,12	0,000						
	UF	11,551	0,000	2,679	6,30	16,80	0,002						

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)**Abbildung A 3-10: Alternativmodell Strecken: selbstständige Wege alle Unfalltypen U(P,S)**

Anlage 4 Unfallstatistik Annäherungsbereiche

	Merkmal	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Anzahl 1	Anzahl 2	Mittelwert 1	Mittelwert 2	Signifikant
Unfalldichte	Verkehrste Regelung	LSA	Teil-LSA	362	34	0,110	0,141	0
		LSA	- LSA oder Teil-LSA	362	396	0,110	0,113	0
		LSA	Verkehrszeichen	362	125	0,110	0,038	1
		Teil-LSA	- LSA oder Teil-LSA	34	396	0,141	0,113	0
		Teil-LSA	Verkehrszeichen	34	125	0,141	0,038	1
		- LSA oder Teil-LSA	Verkehrszeichen	396	125	0,113	0,038	1
	RVF Radfahrende Annäherung	Mischverkehrskombination	Radfahrstreifen	308	60	0,062	0,143	1
		Mischverkehrskombination	Seitenraum	308	153	0,062	0,142	1
		Radfahrstreifen	Seitenraum	60	153	0,143	0,142	0
	Führung LA Radfahrende Annäherung	keine	direkt	136	228	0,094	0,059	1
		keine	indirekt	136	157	0,094	0,148	1
		direkt	indirekt	228	157	0,059	0,148	1
		keine Furt	Fahrbahnrand	303	76	0,056	0,163	1
		keine Furt	Radfahrstreifen in Mittellage	303	15	0,056	0,093	0
		keine Furt	Furt Seitenraum	303	127	0,056	0,146	1
	Radverkehrsfurt	Fahrbahnrand	Radfahrstreifen in Mittellage	76	15	0,163	0,093	0
		Fahrbahnrand	Furt Seitenraum	76	127	0,163	0,146	0
		Radfahrstreifen in Mittellage	Furt Seitenraum	15	127	0,093	0,146	0
		nicht relevant (kein Mischverkehr)	keine Fahrstreifenaddition	209	209	0,149	0,043	1
		nicht relevant (kein Mischverkehr)	Fahrstreifenaddition (1-2)	209	103	0,149	0,089	1
		keine Fahrstreifenaddition	Fahrstreifenaddition (1-2)	209	103	0,043	0,089	1
		LSA - Mischverkehr	LSA - Radverkehrsanlage	207	189	0,077	0,151	1
		LSA - Mischverkehr	Verkehrszeichen - Mischverkehr	207	101	0,077	0,030	1
		LSA - Mischverkehr	Verkehrszeichen - Radverkehrsanlage	207	24	0,077	0,075	0
		LSA - Radverkehrsanlage	Verkehrszeichen - Mischverkehr	189	101	0,151	0,030	1
		LSA - Radverkehrsanlage	Verkehrszeichen - Radverkehrsanlage	189	24	0,151	0,075	0
		Verkehrszeichen - Mischverkehr	Radverkehrsanlage	101	24	0,030	0,075	1
	Fahrstreifen- addition	LSA - Mischverkehr	Verkehrszeichen	207	125	0,077	0,038	1
		LSA - Radverkehrsanlage	Verkehrszeichen	189	125	0,151	0,038	1
		LSA	Teil-LSA	362	34	0,010	0,017	0
		LSA	- LSA oder Teil-LSA	362	396	0,010	0,010	0
		LSA	Verkehrszeichen	362	125	0,010	0,022	1
		Teil-LSA	- LSA oder Teil-LSA	34	396	0,017	0,010	0
		Teil-LSA	Verkehrszeichen	34	125	0,017	0,022	0
		- LSA oder Teil-LSA	Verkehrszeichen	396	125	0,010	0,022	1
		Mischverkehrskombination	Radfahrstreifen	308	60	0,016	0,005	0
		Mischverkehrskombination	Seitenraum	308	153	0,016	0,011	0
		Radfahrstreifen	Seitenraum	60	153	0,005	0,011	0
	Führung LA Radfahrende Annäherung	keine	direkt	136	228	0,007	0,019	0
		keine	indirekt	136	157	0,007	0,010	0
		direkt	indirekt	228	157	0,019	0,010	0
		keine Furt	Fahrbahnrand	303	76	0,016	0,007	0
		keine Furt	Radfahrstreifen in Mittellage	303	15	0,016	0,002	0
		keine Furt	Furt Seitenraum	303	127	0,016	0,012	0
	Radverkehrsfurt	Fahrbahnrand	Radfahrstreifen in Mittellage	76	15	0,007	0,002	0
		Fahrbahnrand	Furt Seitenraum	76	127	0,007	0,012	0
		Radfahrstreifen in Mittellage	Furt Seitenraum	15	127	0,002	0,012	0
		nicht relevant (kein Mischverkehr)	keine Fahrstreifenaddition	209	209	0,009	0,016	1
		nicht relevant (kein Mischverkehr)	Fahrstreifenaddition (1-2)	209	103	0,009	0,014	0
		keine Fahrstreifenaddition	Fahrstreifenaddition (1-2)	209	103	0,016	0,014	0

Anlage 5 Unfallstatistik Knotenpunkte

	Merkmal	Ausprägung	Anzahl	Anteil	Unfalldichte [U(P,S) _{Rf} / (KP*Jahr)]	Unfallrate _{Rad} [U(P,S) _{Rf} / (1Mio*Rf*Jahr)]	Unfallrate _{Rad+Kfz} [U(P,S) _{Rf} / (1Mio*(Rf+Kfz)* Jahr)]
	gesamt		176		0,98	1,89	0,11
Knotenpunkt allgemein	Knotenpunktform	Einmündung	49	28%	0,77	2,27	0,13
		Kreuzung	127	72%	1,06	1,74	0,10
	Verkehrsregelung	Lichtsignalanlage	127	72%	1,06	1,74	0,10
		Teil-LSA	14	8%	0,97	4,18	0,16
		Z206	4	2%	0,30	1,63	0,09
		Z205	28	16%	0,80	1,58	0,11
		Rechts-vor Links	3	2%	0,13	0,70	0,11
		Nicht vollsignalisiert	49	28%	0,77	2,27	0,13
	Winkel Achsen	80-120 gon	154	88%	0,97	1,75	0,10
		kleiner/größer	22	13%	0,99	1,96	0,11
Infrastruktur und Betrieb Radverkehr	Mischverkehr in der Annäherung	keine Zufahrt	32	18%	1,82	1,76	0,10
		mind. eine Zufahrt	144	82%	0,79	2,76	0,13
		mind. zwei Zufahrten	107	61%	0,73	1,56	0,14
	Mischverkehrskombination in der Annäherung	keine Zufahrt	18	10%	1,76	1,96	0,10
		mind. eine Zufahrt	158	90%	0,89	2,11	0,10
		mind. zwei Zufahrten	128	73%	0,80	1,59	0,13
	Radfahrstreifen in der Annäherung	keine Zufahrt	144	82%	0,76	1,92	0,10
		mind. eine Zufahrt	32	18%	1,93	2,06	0,10
		mind. zwei Zufahrten	13	7%	1,94	1,88	0,09
	Radweg in der Annäherung	keine Zufahrt	96	55%	0,78	1,92	0,18
		mind. eine Zufahrt	80	45%	1,21	1,66	0,20
		mind. zwei Zufahrten	54	31%	1,13	2,05	0,11
	Radverkehrsanlage in mind. 1 Zufahrt	Trifft nicht zu	85	48%	0,68	1,69	0,11
		Trifft zu	91	52%	1,26	1,55	0,09
	Radverkehrsanlage in mind. 2 Zufahrten	Trifft nicht zu	97	55%	0,71	2,13	0,10
		Trifft zu	79	45%	1,30	1,66	0,12
	Absetzung der Radfahrtfurt	keine Zufahrt	136	77%	0,89	2,06	0,10
		mind. eine Zufahrt	40	23%	1,26	1,68	0,12
		mind. zwei Zufahrten	24	14%	1,39	1,88	0,11
Infrastruktur und Betrieb motorisierter Verkehr	Ruhender Verkehr im Annäherungsbereich	keine Zufahrt	118	67%	1,09	1,92	0,10
		mind. eine Zufahrt	58	33%	0,74	2,09	0,11
		mind. zwei Zufahrten	24	14%	0,78	1,89	0,10
	Signalisierung Linksabbiegende (teilweise) gesichert	keine Zufahrt	105	60%	0,84	1,89	0,12
		mind. eine Zufahrt	71	40%	1,18	1,48	0,14
		mind. zwei Zufahrten	42	24%	1,25	1,94	0,11
	Signalisierung Rechtsabbiegende (teilweise) gesichert	keine Zufahrt	138	78%	0,97	1,81	0,10
		mind. eine Zufahrt	38	22%	0,99	1,97	0,09
		mind. zwei Zufahrten	13	7%	1,06	1,96	0,11
	Abbiegeverbote	keine Zufahrt	105	60%	0,77	1,62	0,08
		mind. eine Zufahrt	71	40%	1,29	1,36	0,09
		mind. zwei Zufahrten	47	27%	1,29	2,06	0,10
	Grünpfahl (Z720)	keine Zufahrt	133	76%	0,93	1,63	0,12
		mind. eine Zufahrt	43	24%	1,12	1,62	0,13
		mind. zwei Zufahrten	19	11%	1,22	1,92	0,11
ÖPNV	Straßenbahnschienen	nicht vorhanden	70	40%	0,73	1,79	0,10
		vorhanden	106	60%	1,14	1,98	0,12
	Bushaltestelle	nicht vorhanden	104	59%	1,07	1,87	0,09
		vorhanden	72	41%	0,84	1,90	0,12
	Straßenbahnhaltestelle	nicht vorhanden	121	69%	0,88	1,80	0,11
		vorhanden	55	31%	1,19	2,02	0,10
	Haltestelle	nicht vorhanden	62	35%	0,88	1,88	0,10
		vorhanden	114	65%	1,03	1,92	0,12

Knoten U(P,S)	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung			
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df	
Nullmodell	(Konstanter Term)	-	0,024	0,761	0,080	-	0,18	0,13	-	0,861	184,0	947	956,9	
DTV-Rad	(Konstanter Term)	-	5,405	0,000	0,440	-	6,27	-	4,54	0,000	0,326	189,0	838	
	In_Rad_DTV	0,728	0,000	0,058		0,61		0,84		0,000				
DTV-Kombi	(Konstanter Term)	-	9,079	0,000	1,127	-	11,29	-	6,87	0,000	0,291	202,8	829	
	In_Rad_DTV	0,612	0,000	0,065		0,48		0,74		0,000				
	In_KP_DTV	0,448	0,001	0,129		0,19		0,70		0,001				
	UF	2,907	0,022	1,265		0,43		5,39		0,091				
Endmodell	(Konstanter Term)	-	10,719	0,000	1,094	-	12,86	-	8,57	0,001	0,280	172,9	819	
	In_Rad_DTV	0,623	0,000	0,062		0,50		0,74		0,000				
	In_KP_DTV	0,638	0,000	0,123		0,40		0,88		0,000				
	UF	3,901	0,001	1,194		1,56		6,24		0,015				
	[VREG_LSA=1]	-	0,472	0,011	0,185	-	0,84	-	0,11		0,002			
	[VREG_LSA=0]	-												

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 5-1: Endmodell Knotenpunkte alle Unfalltypen U(P,S)

Knoten U(P,S)	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Alternativmodell 1	(Konstanter Term)	-	9,547	0,000	1,040	-	11,59	-	7,51	0,000	0,350	172,7	824
Rechtsabbiegeschutz	In_Rad_DTV	0,634	0,000	0,066		0,50		0,76		0,000			
	In_KP_DTV	0,491	0,000	0,119		0,26		0,72		0,000			
	[Sig_RA_min1RA=1]	-	0,398	0,002	0,131	-	0,66	-	0,14	0,009			
	[Sig_RA_min1RA=0]	-											
Alternativmodell 2	(Konstanter Term)	-	9,845	0,000	1,108	-	12,02	-	7,67	0,000	0,350	172,8	827
Linkssabbiegeschutz	In_Rad_DTV	0,633	0,000	0,066		0,50		0,76		0,000			
	In_KP_DTV	0,525	0,000	0,126		0,28		0,77		0,000			
	[Sig_LA_min1LA=1]	-	0,256	0,042	0,126	-	0,50	-	0,01	0,062			
	[Sig_LA_min1LA=0]	-											

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 5-2: Alternativmodell Knotenpunkte alle Unfalltypen U(P,S)

Knoten U(P,S)_Typ1	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Nullmodell	(Konstanter Term)	-	2,216	0,000	0,139	-	2,49	-	1,94	-	1,243	194,1	357
DTV-Rad	(Konstanter Term)	-	6,572	0,000	0,963615	-	8,4605	-	4,6832	0	0,8384	188,296	339,674
	In_Rad_DTV	0,595	0,000	0,129		0,34		0,85		0,000			
Endmodell	(Konstanter Term)	-	6,562	0,000	0,981	-	8,49	-	4,64	0,000	0,750	173,5	323
	In_Rad_DTV	0,466	0,000	0,131		0,21		0,72		0,001			
	UF	6,107	0,047	3,072		0,09		12,13		0,024			
	[Tram=1]	1,073	0,003	0,360		0,37		1,78		0,001			
	[Tram=0]	-											

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 5-3: Endmodell Knotenpunkte Fahrunfälle U(P,S)_Typ1

Knoten U(P,S)_Typ1	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall			Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung			
					Min	Max	p ^c	Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df	
Alternativmodell Grünfeil	(Konstanter Term)	-	6,395	0,000	0,999	- 8,35	- 4,44	0,000	0,750	172,0	322	233,3	172	1,356
	In_Rad_DTV	0,414	0,002	0,131	0,16	0,67	0,004							
	[Tram=1]	1,333	0,001	0,391	0,57	2,10	0,000							
	[Tram=0]	-												
	[Z720_min2Z720=1]	0,918	0,016	0,383	0,17	1,67	0,011							
	[Z720_min2Z720=0]	-												

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 5-4: Alternativmodell Knotenpunkte Fahrunfälle U(P,S)_Typ1

Knoten U(P,S)_Typ2	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall			Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung			
					Min	Max	p ^c	Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df	
Nullmodell	(Konstanter Term)	-	1,069	0,000	0,111	- 1,29	- 0,85	-	1,444	189,0	629	657,3	175	3,756
	In_Rad_DTV	- 14,970	0,000	1,872587	- 18,6398	- 11,2994	0	0,437	175,7	538	305,6	173	1,767	
	In_KP_DTV	0,677	0,000	0,108	0,47	0,89	0,000							
	[RVF_max3_4MV=1]	0,877	0,000	0,213	0,46	1,29	0,000							
	[RVF_max3_4MV=0]	-												
	[Sig_LA_min1LA=1]	-												
Endmodell	[Sig_LA_min1LA=0]	- 0,694	0,000	0,172	- 1,03	- 0,36	0,000							
	[Anzahl Zufahrten=4]	-												
	[Anzahl Zufahrten=3]	0,543	0,006	0,198	0,16	0,93	0,004							
	[Anzahl Zufahrten=2]	-												

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 5-5: Endmodell Knotenpunkte Abbiegeunfälle U(P,S)_Typ2

Knoten U(P,S)_Typ2	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall			Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung			
					Min	Max	p ^c	Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df	
Alternativmodell 1 Rechtsabbiegeschutz	(Konstanter Term)	-	14,914	0,000	1,918	- 18,67	- 11,16	0,000	0,380	172,0	528	277,6	171	1,623
	In_Rad_DTV	0,620	0,000	0,105	0,41	0,83	0,000							
	In_KP_DTV	0,898	0,000	0,207	0,49	1,30	0,000							
	[RVF_max3_4MV=1]	0,427	0,034	0,201	0,03	0,82	0,032							
	[RVF_max3_4MV=0]	-												
	[Sig_RA_min1RA=1]	-												
Alternativmodell 2 Absetzung	[Sig_RA_min1RA=0]	-	0,561	0,007	0,206	- 0,97	- 0,16	0,005						
	In_Rad_DTV	- 14,541	0,000	1,934	- 18,33	- 10,75	0,000	0,389	170,7	534	285,2	171	1,668	
	In_KP_DTV	0,596	0,000	0,101	0,40	0,79	0,000							
	[RVF_max3_4MV=1]	0,868	0,000	0,209	0,46	1,28	0,000							
	[RVF_max3_4MV=0]	-												
	[RVF_ABSETZ_min2Absetz=1]	-	0,514	0,009	0,198	0,13	0,90	0,012						
	[RVF_ABSETZ_min2Absetz=0]	-	0,420	0,057	0,221	- 0,85	0,01	0,068						

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 5-6: Alternativmodell Knotenpunkte Abbiegeunfälle U(P,S)_Typ2

Knoten U(P,S)_Typ3	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K-Intervall			p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max	Vert.- Param.		Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df	
Nullmodell	(Konstanter Term)	- 0,963	0,000	0,121	- 1,20	- 0,73	-	1,372	238,1	659	861,4	175	4,922	
DTV-Rad	(Konstanter Term)	- 6,119	0,000	0,633	- 7,36	- 4,88	0,000	0,843	263,8	613	671,1	174	3,857	
	In_Rad_DTV	0,699	0,000	0,084	0,53	0,86	0,000							
DTV-Kombi	(Konstanter Term)	- 7,837	0,000	1,574	- 10,92	- 4,75	0,000	0,842	271,0	614	678,3	173	3,921	
	In_Rad_DTV	0,646	0,000	0,100	0,45	0,84	0,000							
	In_KP_DTV	0,211	0,253	0,185	- 0,15	0,57	0,416							
Endmodell	(Konstanter Term)	- 12,677	0,000	1,724	- 16,06	- 9,30	0,000	0,650	172,9	578	373,6	171	2,185	
	In_Rad_DTV	0,709	0,000	0,103	0,51	0,91	0,000							
	In_KP_DTV	0,718	0,000	0,190	0,35	1,09	0,001							
	[VREG_LSA=1]	- 1,177	0,000	0,231	- 1,63	- 0,72	0,000							
	[VREG_LSA=0]	-												
	[WINKEL=1]	0,565	0,034	0,267	0,04	1,09	0,027							
	[WINKEL=0]	-												

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 5-7: Endmodell Knotenpunkte Einbiegen/Kreuzen-Unfälle U(P,S)_Typ3

Anlage 6 Unfallstatistik Knotenpunktzufahrten

	Merkmal	Ausprägung	Anzahl	Anteil	Unfalldichte [U(P,S) _{RF} /(Zuf*Jahr)]	Unfallrate _{Rad} [U(P,S) _{RF} / (1Mio*RF*Jahr)]	Unfallrate _{Rad+Kfz} [U(P,S) _{RF} / (1Mio*(RF+Kfz)* Jahr)]
	Gesamt		477	-	0,23	0,88	0,08
Knotenpunkt- form	Einmündung	117	25%	0,18	0,85	0,06	
	Kreuzung	324	68%	0,23	0,95	0,09	
	Sonderform	36	8%	0,37	0,38	0,05	
Knotenpunkt allgemein Verkehrs- regelung	Lichtsignalanlage	344	72%	0,24	0,95	0,06	
	Teil-LSA	31	6%	0,29	0,60	0,11	
	Z206	16	3%	0,08	0,22	0,06	
	Z205	75	16%	0,22	0,93	0,14	
	Rechts-vor Links	11	2%	0,04	0,22	0,04	
	Nicht vollsignalliert	133	28%	0,20	0,71	0,11	
Infrastruktur und Betrieb Radverkehr	Führung in der Annäherung	251	53%	0,16	1,02	0,10	
	Mischverkehr	30	6%	0,32	0,70	0,10	
	Mischverkehr mit Schutzstreifen	46	10%	0,21	0,82	0,04	
	Mischverkehr; Gehweg "Radfahrende frei"	327	69%	0,18	0,96	0,09	
	Radfahrstreifen	40	8%	0,38	0,31	0,06	
	Radweg	64	13%	0,30	0,54	0,03	
	Gemeinsamer Geh- und Radweg	46	10%	0,32	1,30	0,05	
	Radverkehrsanlage	150	31%	0,32	0,71	0,04	
	Absetzung nicht vorhanden	400	84%	0,22	0,85	0,06	
	Absetzung vorhanden	77	16%	0,25	0,81	0,08	
	Furteinfärbung	92	19%	0,32	1,28	0,05	
	nicht eingefärbt	385	81%	0,20	0,59	0,05	
	Signalisierung	366	77%	0,21	0,95	0,08	
	mit motorisiertem Verkehr	59	12%	0,36	0,85	0,09	
Führung Linksabbie- gende	Fuß-Rad-Kombibischeibe	52	11%	0,23	0,33	0,05	
	direkt	319	67%	0,19	1,75	0,04	
	indirekt - nicht geführt	116	24%	0,26	0,74	0,08	
	indirekt - geführt	42	9%	0,45	0,94	0,06	
Infrastruktur und Betrieb motorisierter Verkehr	Signalisierung Linksabbie- gende	374	78%	0,21	0,91	0,09	
	gesichert	103	22%	0,28	0,79	0,03	
	Signalisierung Rechtsabbie- gende	445	93%	0,23	0,92	0,08	
	nicht gesichert	7	1%	0,09	0,32	0,02	
	gesichert (2 Felder)	13	3%	0,31	0,22	0,03	
	gesichert (3 Felder)	7	1%	0,20	0,28	0,02	
	Dreiecksinsel ohne LSA	5	1%	0,16	0,63	0,02	
	Dreiecksinsel mit LSA	32	7%	0,21	0,32	0,02	
	(teilweise) gesichert	19	4%	0,22	0,82	0,07	
	Abbiegeverbote (bzw. vorgeschriebene Fahrrichtung FR)	362	76%	0,22	0,82	0,07	
	keine	58	12%	0,26	0,58	0,10	
	vorgeschriebene FR: geradeaus oder rechts	20	4%	0,22	4,08	0,26	
	vorgeschriebene FR: rechts	18	4%	0,19	0,20	0,02	
	vorgeschriebene FR: geradeaus	19	4%	0,22	0,82	0,07	
	andere	362	76%	0,22	0,82	0,07	
	Rechtsabbiegeverbot nicht vorhanden	58	12%	0,26	0,58	0,10	
	Rechtsabbiegeverbot vorhanden	451	95%	0,23	0,85	0,07	
	Grünpfahl (Z720)	26	5%	0,20	1,45	0,13	

Zufahrten U(P,S)	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Nullmodell	(Konstanter Term)	- 1,480	0,000	0,082	- 1,64	- 1,32	-	1,891	553,6	1389	1745,4	476	3,667
DTV-Rad	(Konstanter Term) ln_KP_Rad_ges	- 7,453 0,678	0,000 0,000	1,009 0,112	- 9,43 0,46	- 5,48 0,90	0,000 0,000	1,388	667,0	1335	1599,8	475	3,368
DTV-Kombi	(Konstanter Term) ln_KP_Rad_ges ln_KP_Kfz_ges	- 13,516 0,572 0,656	0,000 0,000 0,000	1,443 0,100 0,130	- 16,34 0,38 0,40	- 10,69 0,77 0,91	0,000 0,000 0,000	1,288	663,0	1316	1519,9	474	3,206
Endmodell	(Konstanter Term) ln_KP_Rad_ges ln_KP_Kfz_ges LSA = ja LSA = nein	- 15,738 0,590 0,886 - 0,533	0,000 0,000 0,000 0,029	1,582 0,101 0,156 0,244	- 18,84 0,39 0,58 - 1,01	- 12,64 0,79 1,19 - 0,05	0,000 0,000 0,000 -	1,650	477,0	1312	1335,9	473	2,824

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 6-1: Endmodell Zufahrten alle Unfalltypen U(P,S)

Zufahrten U(P,S)	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Alternativmodell 1	(Konstanter Term)	- 7,639	0,000	0,964	- 9,53	- 5,75	0,000	1,750	478,3	1323	1345,0	473	2,844
Rechtsabbiegeschutz	ln_RA_SV_DTV	0,181	0,000	0,048	0,09	0,28	0,000						
	ln_KP_Rad_ges	0,648	0,000	0,108	0,44	0,86	0,000						
	Sig_RA_mot = (teilweise) separat	- 0,562	0,039	0,273	- 1,10	- 0,03	0,091						
	Sig_RA_mot = bedingt verträglich	-											
Alternativmodell 2	(Konstanter Term)	- 6,872	0,000	0,925	- 8,68	- 5,06	0,000	1,900	473,9	1324	1363,6	472	2,889
Radverkehrsführung	ln_RA_SV_DTV	0,182	0,000	0,050	0,08	0,28	0,000						
	ln_KP_Rad_ges	0,581	0,000	0,101	0,38	0,78	0,000						
	Sig_RA_mot = (teilweise) separat	- 0,621	0,028	0,283	- 1,18	- 0,07	0,071						
	Sig_RA_mot = bedingt verträglich	-											
	Mischverkehr = ja	- 0,371	0,020	0,159	- 0,68	- 0,06	0,027						
	Mischverkehr = nein	-											

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 6-2: Alternativmodell Zufahrten alle Unfalltypen U(P,S)

Zufahrten U(P,S)_Typ2	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Nullmodell	(Konstanter Term)	- 2,606	0,000	0,122	- 2,85	- 2,37	-	3,776	522,1	729	1249,6	476	2,625
DTV-Rad	(Konstanter Term) ln_KP_Rad_ges	- 10,567 0,900	0,000 0,000	1,518 0,171	- 13,54 0,57	- 7,59 1,24	0,000 0,000	2,763	493,1	698	1006,2	475	2,118
DTV-Kombi	(Konstanter Term) ln_KP_Rad_ges ln_Zu_Kfz_DTV	- 19,607 0,722 1,212	0,000 0,000 0,000	1,905 0,139 0,173	- 23,34 0,45 0,87	- 15,87 1,00 1,55	0,000 0,000 0,000	1,449	388,2	624	646,0	474	1,363
Endmodell	(Konstanter Term) ln_KP_Rad_ges ln_Zu_Kfz_DTV Rechtsabbiegeverbot = ja Rechtsabbiegeverbot = nein Mischverkehrskombination = ja Mischverkehrskombination = nein Furt abgesetzt (>0,5m) = ja Furt abgesetzt (>0,5m) = nein	- 17,397 0,645 1,088 - 0,735 - - 0,587 - - 0,522 -	0,000 0,000 0,000 0,025 - 0,012 - 0,030 -	2,173 0,134 0,197 0,327 - 0,235 - 0,240 -	- 21,66 0,38 0,70 - 1,38 - - 1,05 - - 0,99 -	- 13,14 0,91 1,47 - 0,09 - - 0,13 - - 0,05 -	0,000 0,000 0,000 0,029 - 0,003 - 0,022 -	0,430	472,4	628	582,2	471	1,236

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 6-3: Endmodell Zufahrten Abbiegeunfälle U(P,S)_Typ2

Zufahrten U(P,S)_Typ2	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Alternativmodell 1	(Konstanter Term)	- 14,193	0,000	1,856	- 17,83	- 10,55	0,000	0,630	471,6	625	614,2	471	1,304
	In_Zu_Rad_ges	0,534	0,000	0,146	0,25	0,82	0,000						
	In_Zu_Kfz_DTV	0,950	0,000	0,210	0,54	1,36	0,000						
	Rechtsabbiegeverbot = ja	- 0,679	0,034	0,320	- 1,30	- 0,05	0,055						
	Rechtsabbiegeverbot = nein	-											
	Mischverkehrskombination = ja	- 0,517	0,024	0,230	- 0,97	- 0,07	0,015						
	Mischverkehrskombination = nein	-											
	Furt abgesetzt (>0,5m) = ja	- 0,453	0,061	0,242	- 0,93	0,02	0,063						
	Furt abgesetzt (>0,5m) = nein	-											

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 6-4: Alternativmodell Zufahrten Abbiegeunfälle U(P,S)_Typ2

Zufahrten U(P,S)_Typ3	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Nullmodell	(Konstanter Term)	- 2,348	0,000	0,145	- 2,63	- 2,06	-	4,866	685,1	812	2278,3	476	4,786
Vorfahrtregelung	(Konstanter Term)	- 1,771	0,000	0,160	- 2,08	- 1,46	0,000	5,000	491,6	766	1598,0	475	3,364
	Bevorrechtfte Zufahrt	- 1,830	0,000	0,284	- 2,39	- 1,27	0,000						
	Wartepflichtige Zufahrt	-											
DTV-Rad	(Konstanter Term)	- 4,049	0,000	0,671	- 5,36	- 2,73	0,000	2,632	619,5	742	1456,5	474	3,073
	In_Zu_Rf_DTV	0,380	0,000	0,105	0,17	0,58	0,000						
	Bevorrechtfte Zufahrt	- 2,218	0,000	0,278	- 2,76	- 1,67	0,000						
	Wartepflichtige Zufahrt	-											
DTV-Kombi	(Konstanter Term)	- 12,665	0,000	2,152	- 16,88	- 8,45	0,000	2,558	543,2	730	1390,9	473	2,941
	In_Zu_Rf_DTV	0,346	0,000	0,089	0,17	0,52	0,000						
	In_KP_Kfz_ges	0,833	0,000	0,207	0,43	1,24	0,000						
	Bevorrechtfte Zufahrt	- 2,341	0,000	0,262	- 2,85	- 1,83	0,000						
	Wartepflichtige Zufahrt	-											
Endmodell	(Konstanter Term)	- 17,906	0,000	2,637	- 23,08	- 12,74	0,000	1,800	475,2	709	999,6	472	2,118
	In_Zu_Rf_DTV	0,386	0,000	0,096	0,20	0,57	0,000						
	In_KP_Kfz_ges	1,374	0,000	0,257	0,87	1,88	0,000						
	Bevorrechtfte Zufahrt	- 2,230	0,000	0,246	- 2,71	- 1,75	0,000						
	Wartepflichtige Zufahrt	-											
	LSA = ja	- 1,268	0,000	0,310	- 1,87	- 0,66	0,000						
	LSA = nein	-											

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 6-5: Endmodell Zufahrten Einbiegen/Kreuzen-Unfälle U(P,S)_Typ3

Zufahrten U(P,S)_Typ3	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standard- fehler	95%-K.-Intervall		p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max		Vert.- Param.	Pearson- χ^2	AIC	Pearson- χ^2	df	χ^2/df
Alternativmodell 1	(Konstanter Term)	- 14,967	0,000	2,689	- 20,24	- 9,70	0,000	2,700	471,8	722	1165,8	472	2,470
	In_Zu_Rf_DTV	0,382	0,000	0,090	0,21	0,56	0,000						
	In_KP_Kfz_ges	1,083	0,000	0,269	0,56	1,61	0,000						
	Bevorrechtfte Zufahrt	- 2,304	0,000	0,255	- 2,80	- 1,80							
	Wartepflichtige Zufahrt	-											
	LSA oder Teil-LSA = ja	- 0,813	0,023	0,357	- 1,51	- 0,11							
Alternativmodell 2	(Konstanter Term)	- 3,647	0,000	0,647	- 4,92	- 2,38	0,000	3,250	474,6	736	1228,7	472	2,603
	Radverkehrsführung In_Zu_Rf_DTV	0,353	0,000	0,100	0,16	0,55	0,000						
	Linksabbiegende Bevorrechtfte Zufahrt	- 2,323	0,000	0,246	- 2,80	- 1,84							
	Wartepflichtige Zufahrt	-											
	LSA = ja	- 0,779	0,010	0,301	- 1,37	- 0,19							
	LSA = nein	-											
Alternativmodell 3	Führung LA Radfahrende = indirekt	0,821	0,001	0,244	0,34	1,30							
	Führung LA Radfahrende = direkt	-											

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 6-6: Alternativmodell Zufahrten Einbiegen/Kreuzen-Unfälle U(P,S)_Typ3

Anlage 7 Unfallstatistik Einfache Modelle

Strecken U(P)	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standardfehler	95%-K.-Intervall			p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max	Vert.-Param.		Pearson-χ ²	AIC	Pearson-χ ²	df	χ ² /df	
Nullmodell	(Konstanter Term)	0,325	0,000	0,037	0,25	0,40	-	1,173	1634,6	5611	6116,7	1457	4,198	
DTV-Rad	(Konstanter Term)	- 2,982	0,000	0,216	- 3,41	- 2,56	0,009	0,731	1946,6	5272	4567,1	1456	3,137	
	In_DTV_Rad	0,437	0,000	0,028	0,38	0,49	0,000							
DTV-Kombi	(Konstanter Term)	- 4,591	0,000	0,472	- 5,52	- 3,67	0,014	0,723	1872,9	5260	4458,6	1455	3,064	
	In_DTV_Rad	0,400	0,000	0,031	0,34	0,46	0,000							
	In_DTV_Kfz	0,196	0,000	0,056	0,09	0,31	0,001							
Endmodell	(Konstanter Term)	- 5,244	0,000	0,501	- 6,23	- 4,26	0,000	0,860	1447,8	5167	3793,7	1450	2,616	
	In_DTV_Rad	0,402	0,000	0,032	0,34	0,47	0,000							
	In_DTV_Kfz	0,261	0,000	0,057	0,15	0,37	0,000							
	[RVA=sonstige Kombination]	- 0,446	0,007	0,166	- 0,77	- 0,12	0,000							
	[RVA=Gemeinsamer Geh- & Radweg]	- 0,438	0,001	0,137	- 0,71	- 0,17	0,000							
	[RVA=Radweg]	- 0,223	0,008	0,084	- 0,39	- 0,06	0,000							
	[RVA=Radfahrstreifen]	0,213	0,066	0,116	- 0,01	0,44	0,000							
	[RVA=Mischverkehr(-skombination)]	-												
	[Straßenbahnschienen=ja]	0,608	0,000	0,070	0,47	0,75	0,000							
	[Straßenbahnschienen=nein]	-												

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 7-1: Endmodell Strecken alle Unfalltypen U(P)

Strecken U(P)	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standardfehler	95%-K.-Intervall			p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max	Vert.-Param.		Pearson-χ ²	AIC	Pearson-χ ²	df	χ ² /df	
Alternativmodell ohne Kfz DTV	(Konstanter Term)	- 3,100	0,000	0,214	- 3,52	- 2,68	0,000	0,975	1456,4	5213	4053,6	1455	2,786	
	In_DTV_Rad	0,429	0,000	0,028	0,37	0,48	0,000							
	[Straßenbahnschienen=ja]	0,661	0,000	0,071	0,52	0,80	0,000							
	[Straßenbahnschienen=nein]	-												

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Abbildung A 7-2: Alternativmodell Strecken alle Unfalltypen U(P)

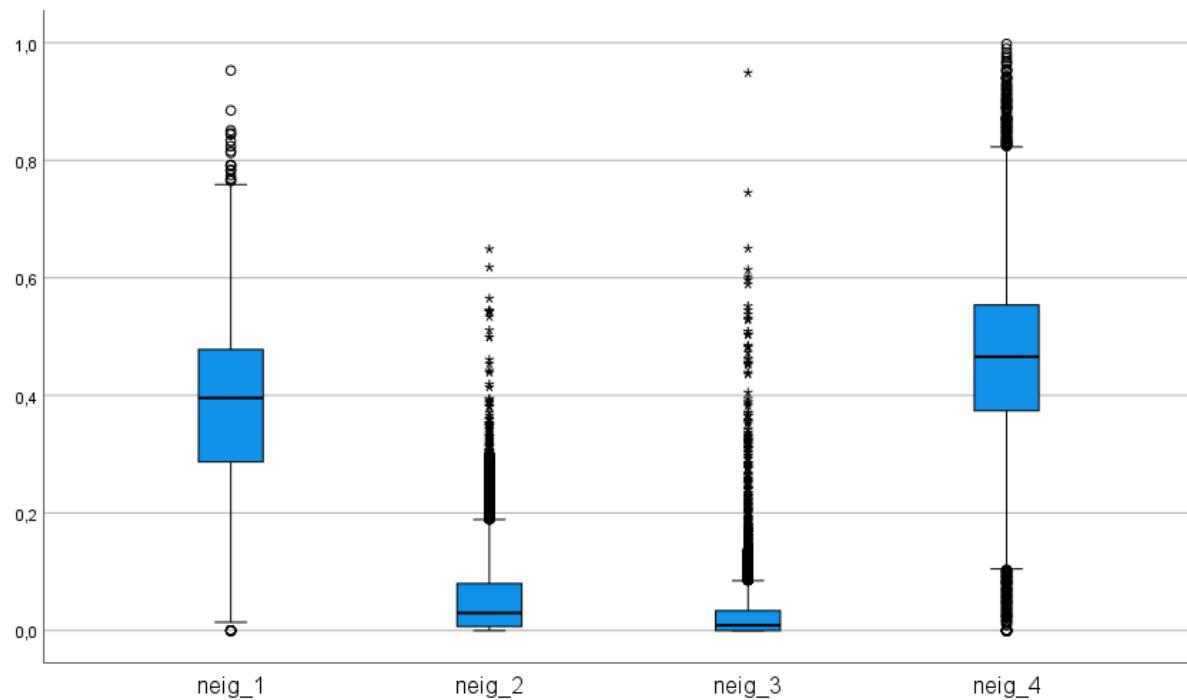
Knoten U(P)	Parameter	Koeff. ^a	Sign. ^b	Standardfehler	95%-K.-Intervall			p ^c	Neg. Bin.-Verteilung			Poisson-Verteilung		
					Min	Max	Vert.-Param.		Pearson-χ ²	AIC	Pearson-χ ²	df	χ ² /df	
Nullmodell	(Konstanter Term)	- 0,125	0,033	0,059	- 0,24	- 0,01	-	0,897	339,1	1728	1681,2	332	5,064	
DTV-Rad	(Konstanter Term)	- 5,501	0,000	0,417	- 6,32	- 4,68	0,000	0,367	352,2	1556	832,7	331	2,516	
	In_DTV_Rad	0,670	0,000	0,051	0,57	0,77	0,000							
DTV-Kombi	(Konstanter Term)	- 9,603	0,000	0,957	- 11,48	- 7,73	0,000	0,375	331,0	1521	757,4	330	2,295	
	In_DTV_Rad	0,560	0,000	0,052	0,46	0,66	0,000							
	In_DTV_Kfz	0,490	0,000	0,105	0,28	0,70	0,000							

^a Schätzung basierend auf der angepassten negativen Binomialverteilung^b Wald Test der Koeffizienten^c Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

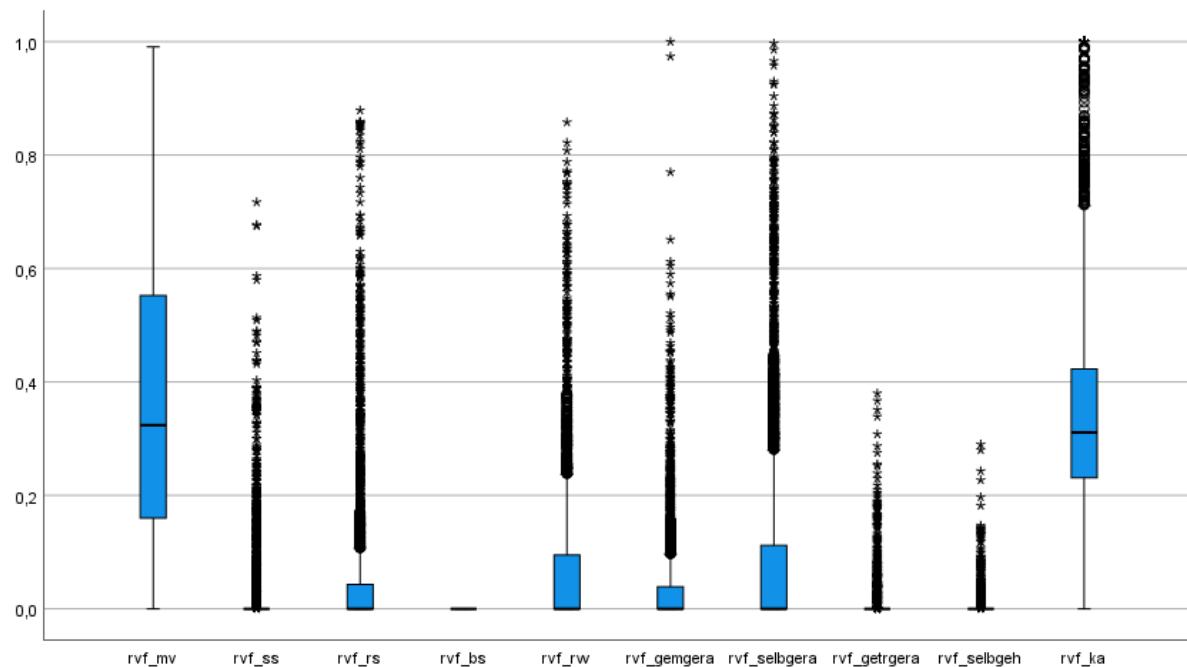
Abbildung A 7-3: Endmodell Knotenpunkte alle Unfalltypen U(P)

Anlage 8 Streuung und Ausreißer der Variablen

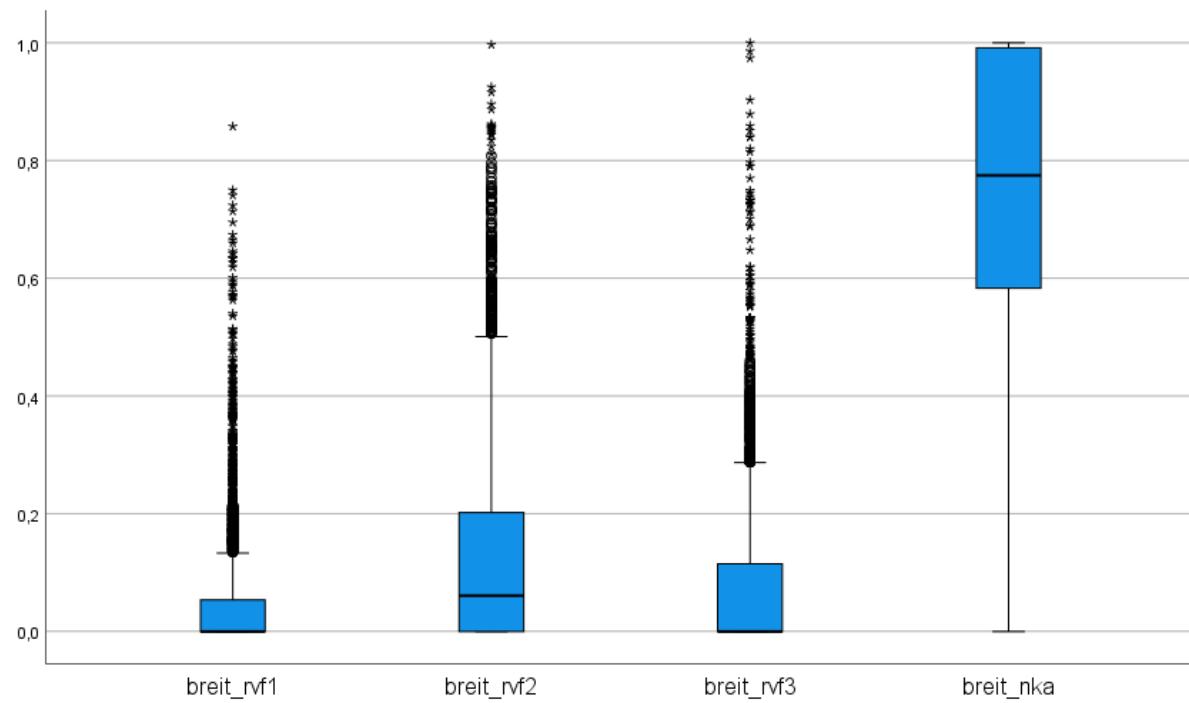
Längsneigung



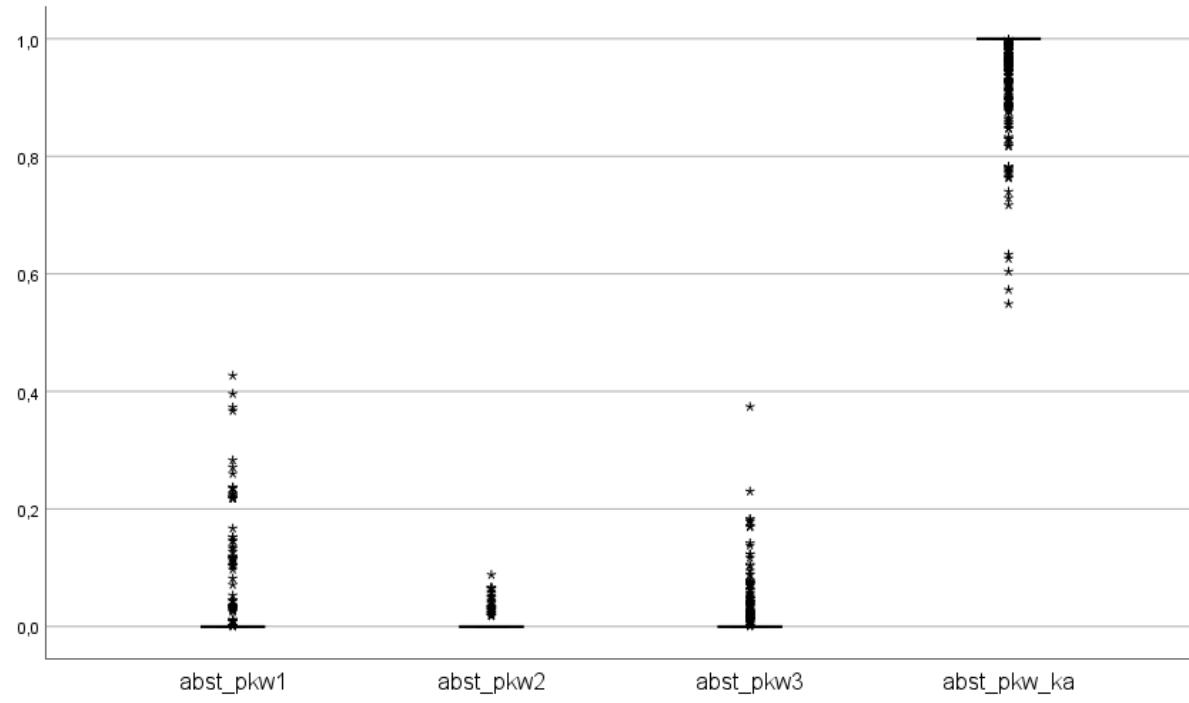
Radverkehrsführung



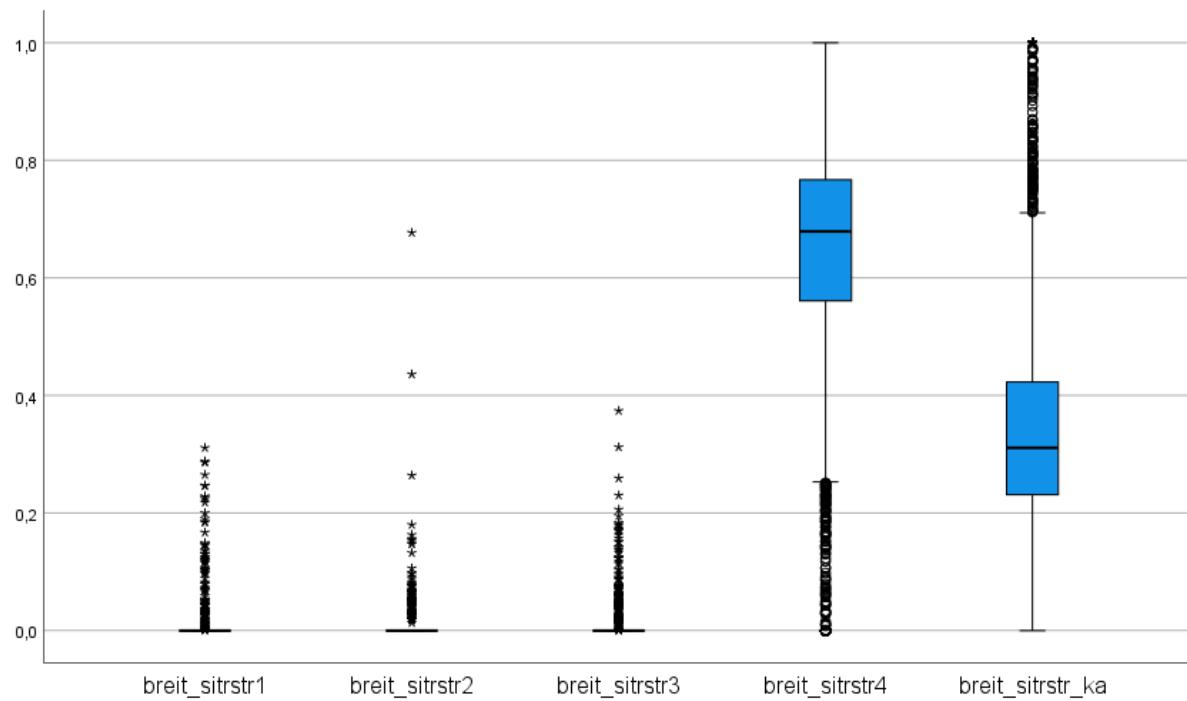
Breite der RVF



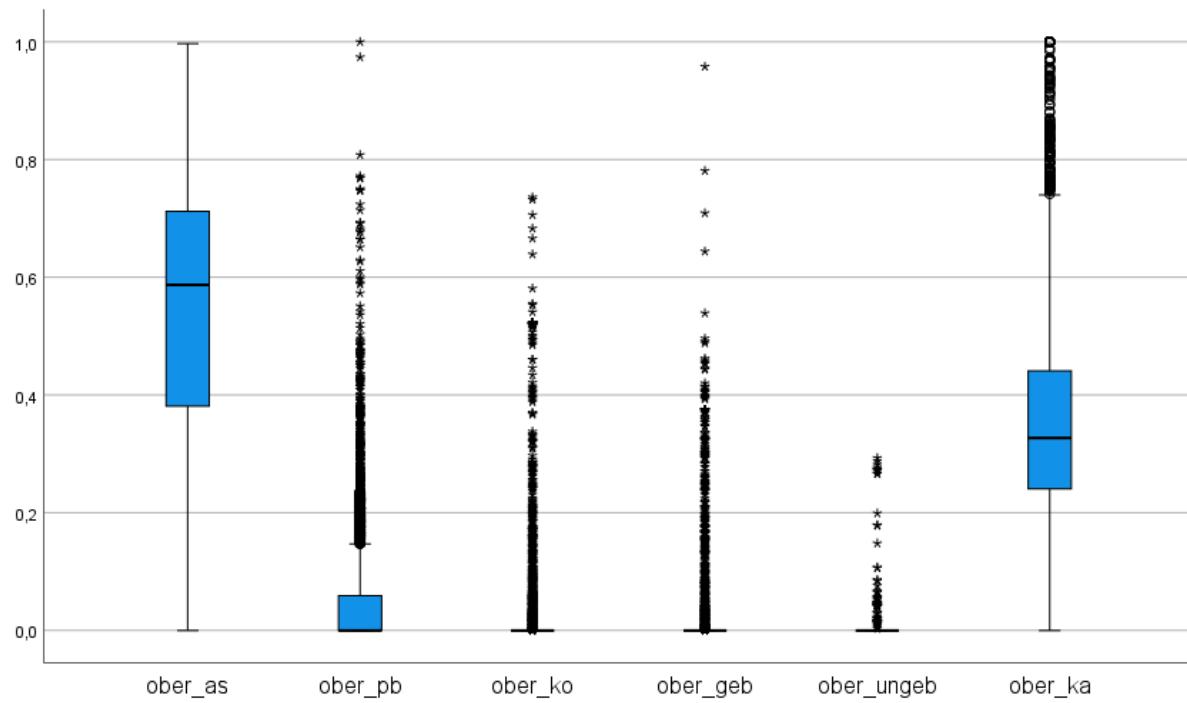
Abstand Radweg – Fahrbahn/ruhender Verkehr



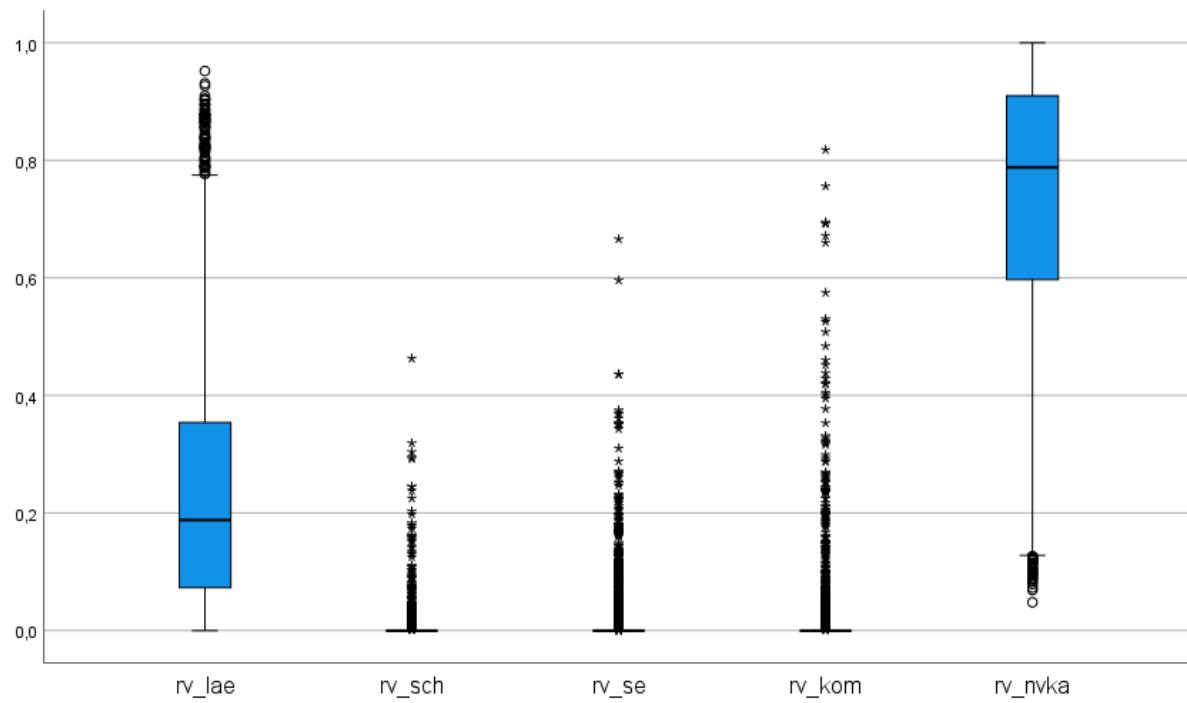
Breite Sicherheitstrennstreifen zum ruhenden Verkehr



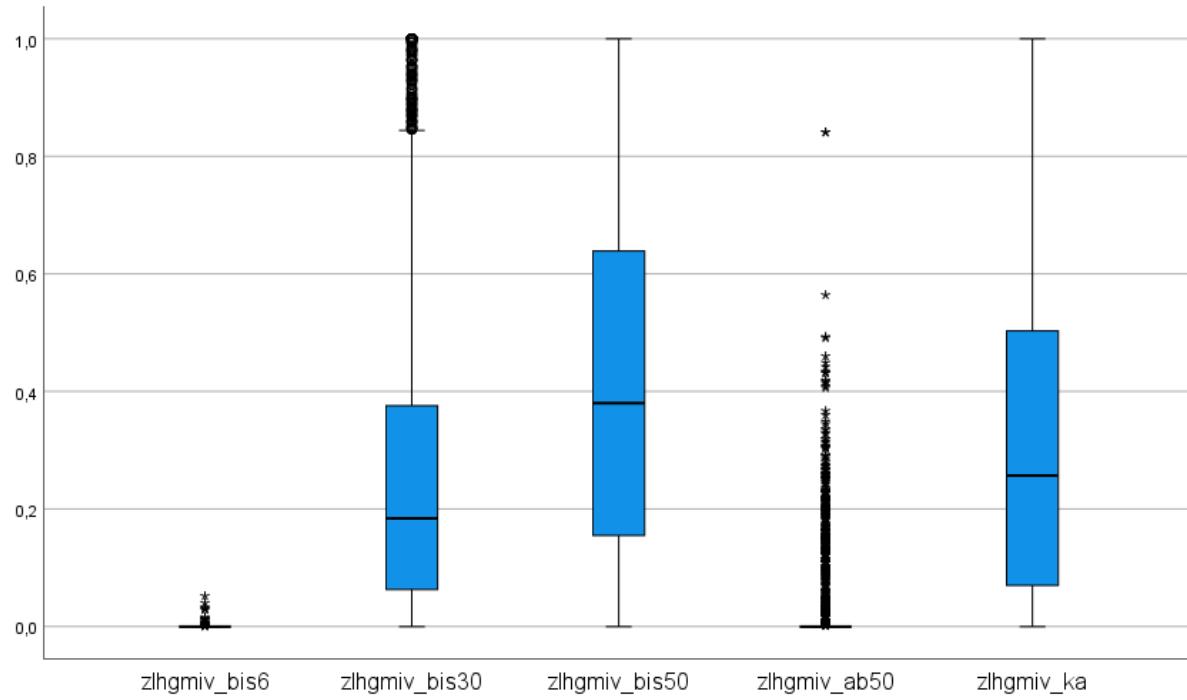
Fahrbahnoberflächen

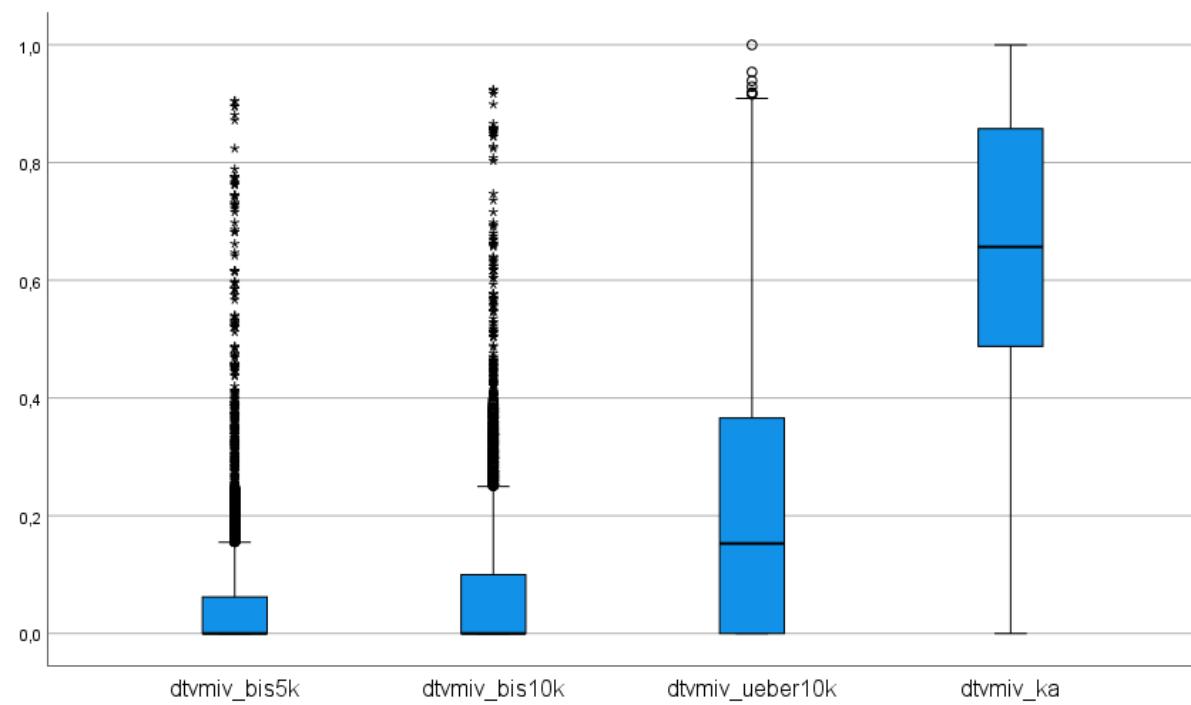
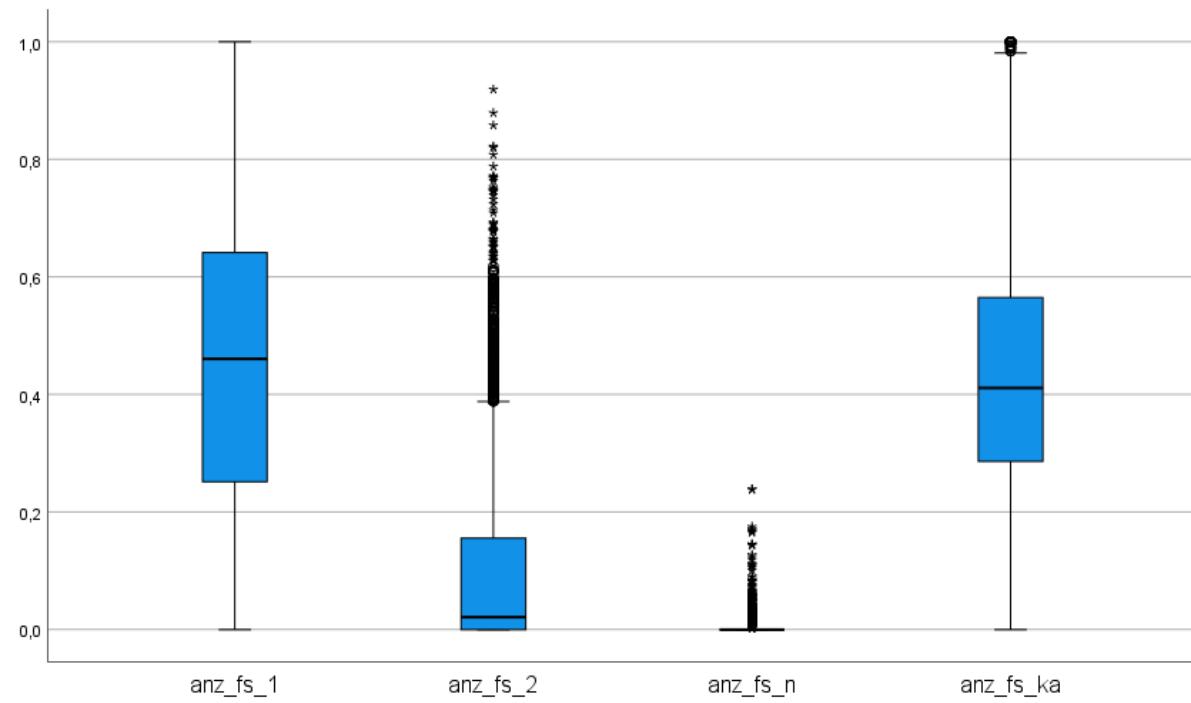


Ruhender Verkehr

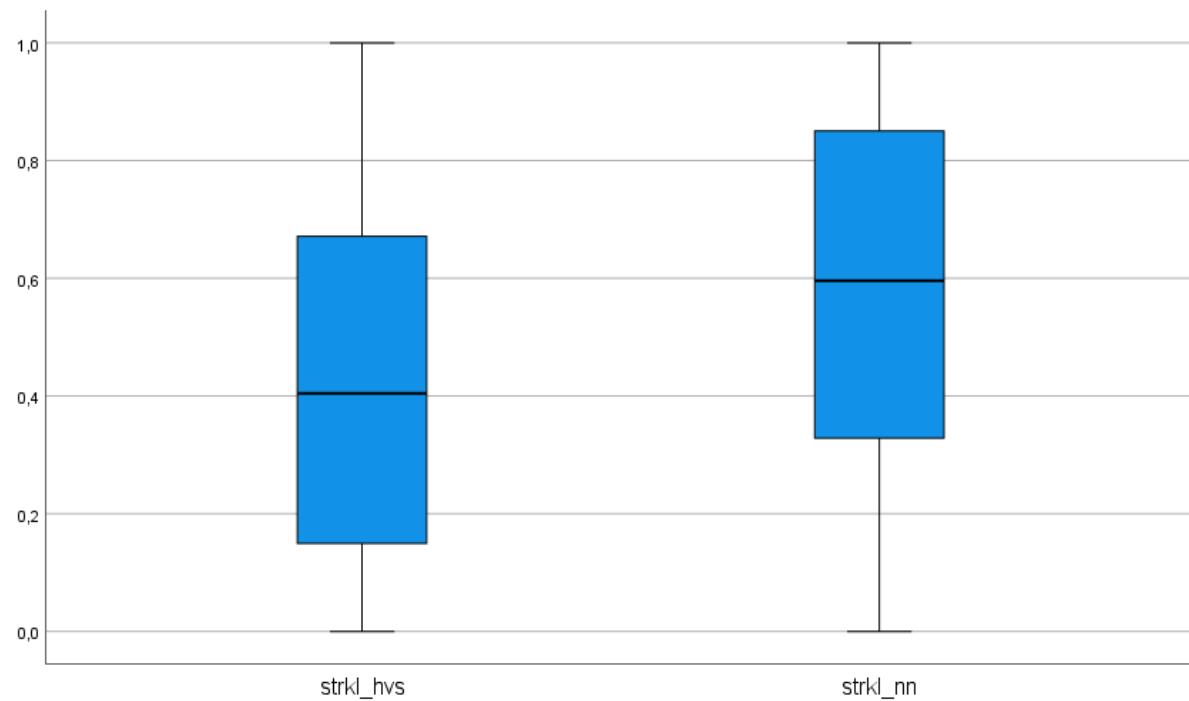


Max. Zulässige Geschwindigkeit des MIV

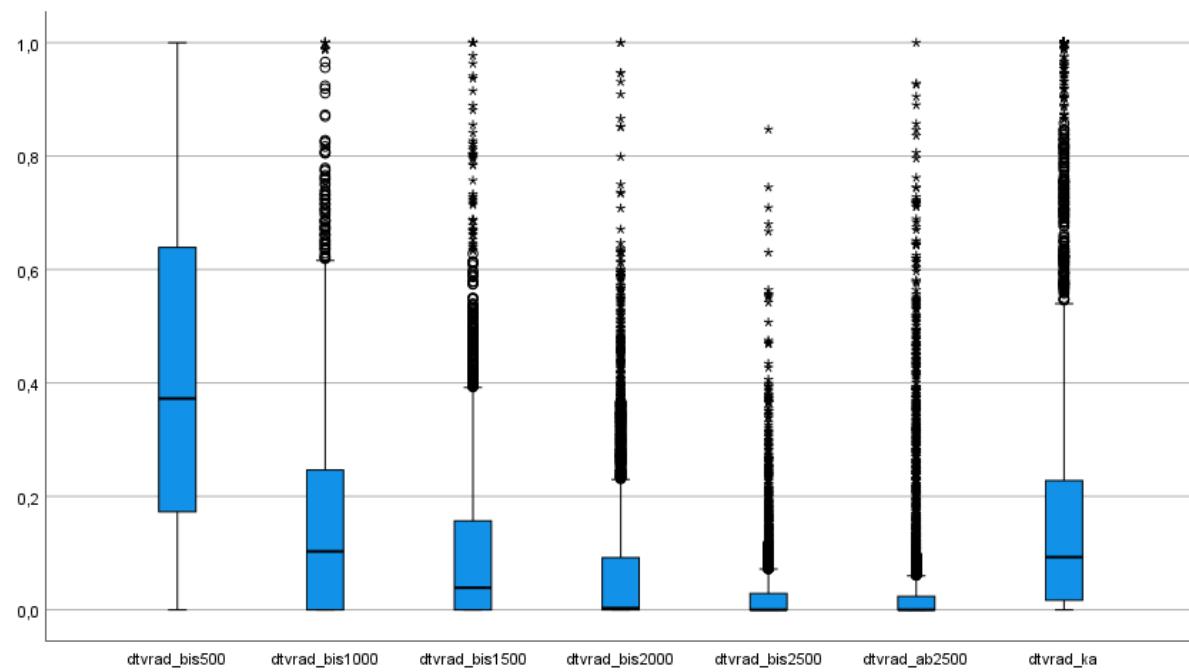


DTV MIV**Anzahl Richtungsfahrstreifen**

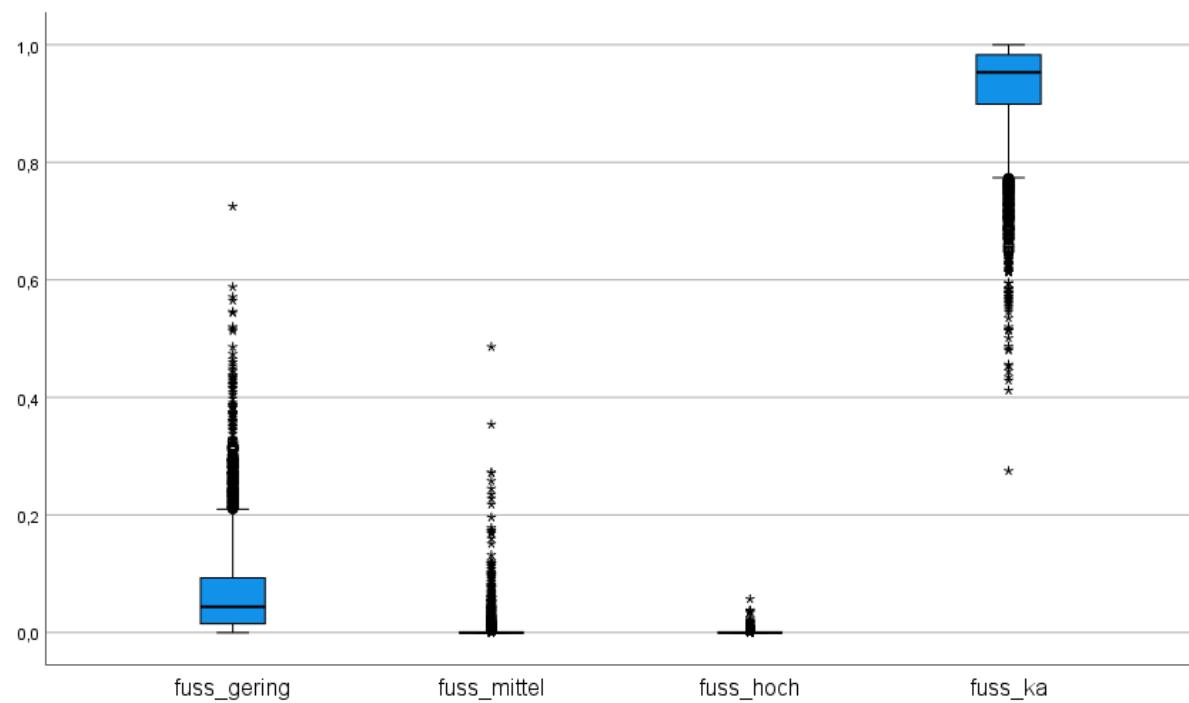
Straßenklasse



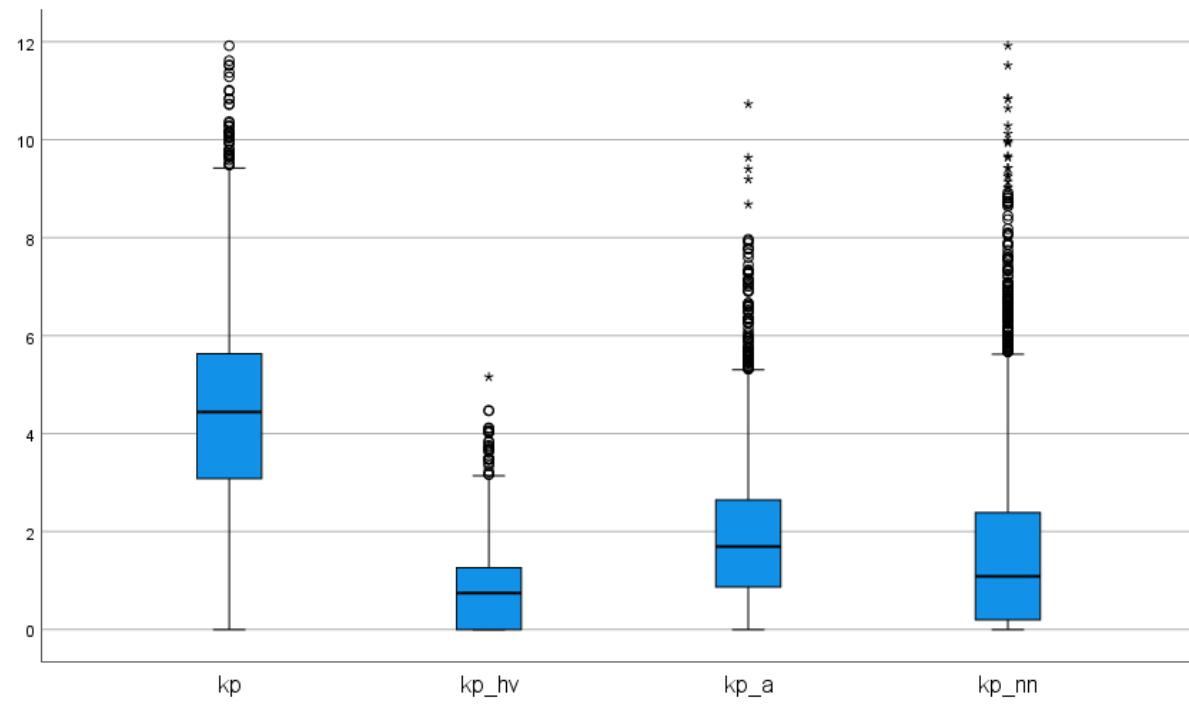
DTV Rad



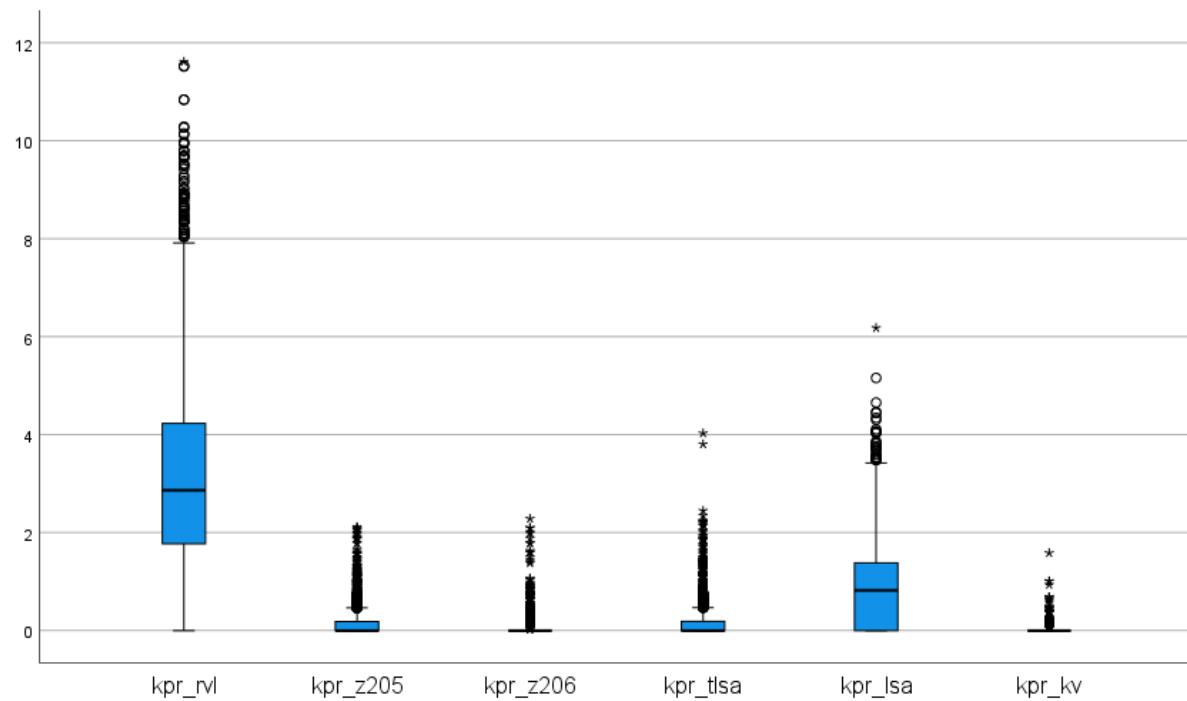
Fußverkehrsdichte



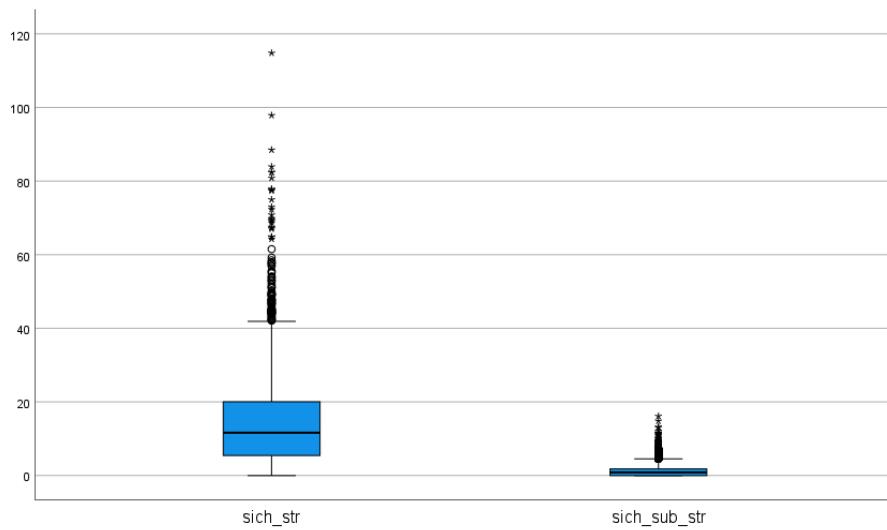
Knotenpunkte

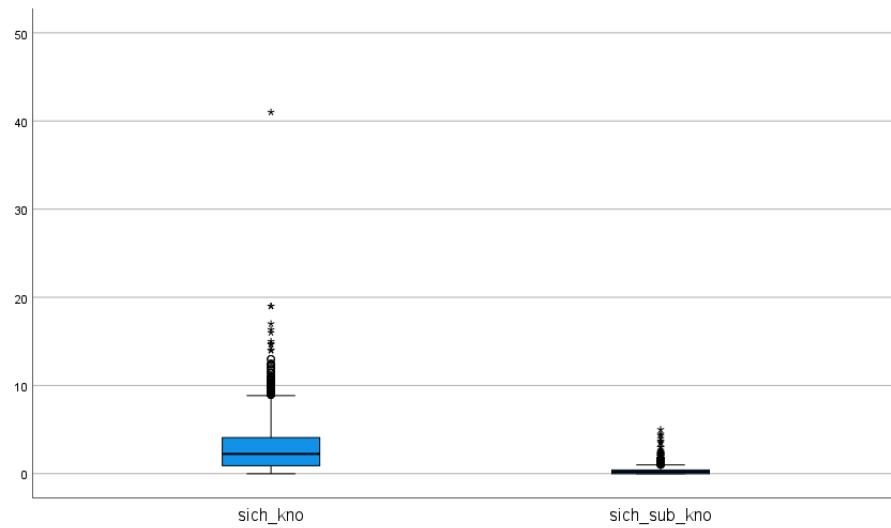


Knotenpunkte und deren Regelungsart

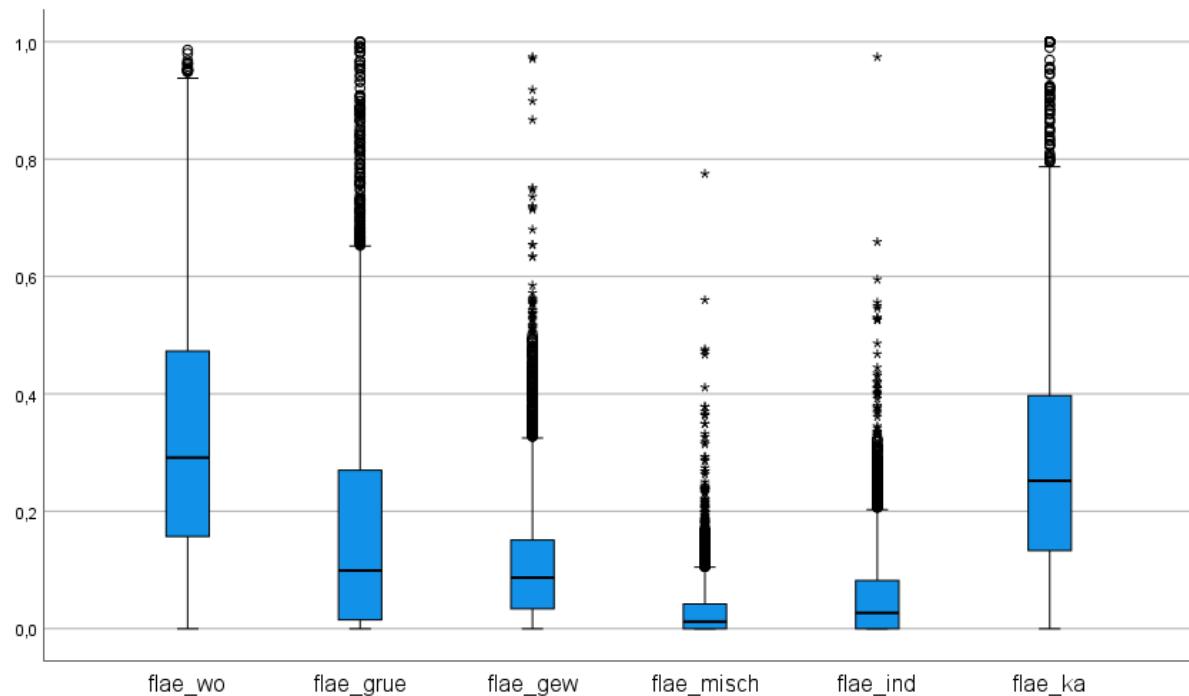


Sicherheit





Umfeldnutzung



Anlage 9 Auswahl, Ausschluss und Aggregation der Variablen

Nutzung
0
1
2

Anlage 10 Korrelationsmatrix Routenwahl

Anlage 11 Kennwerte und Koeffizienten der dezidierten Routenwahlmodelle

Tabelle A 11-1 Kennwerte der Merkmalsausprägung für die Männer in der Stichprobe

Merkmal	Minimum	Median	Mittel	Maximum	Stand.abw.	Streuung
Fahrtweite [km]	0,34	3,30	4,78	60,41	4,47	60,07
Maximal Längsneigung [%]	-	5,81	7,48	112,00	6,89	112,00
Längsneigung <2% [%]	-	0,87	0,84	1,00	0,14	1,00
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	-	0,29	0,29	1,00	0,23	1,00
Asphaltoberfläche [%]	-	0,58	0,53	1,00	0,23	1,00
RV - Längsaufstellung [%]	-	0,17	0,22	0,95	0,20	0,95
v_zul ≤ 30km/h [%]	-	0,18	0,25	1,00	0,24	1,00
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route [Kfz/Tag]	-	5.139	6.415	28.310	5.530	28.310
1 Richtungsfahrstreifen [%]	-	0,45	0,44	1,00	0,25	1,00
DTV > 500 Rad/Tag [%]	-	0,44	0,41	1,00	0,32	1,00
Geringe Fußverkehrsdichte [%]	-	0,05	0,07	0,73	0,08	0,73
KP-Regelung RVL [n/km]	-	2,81	3,03	10,84	1,87	10,84
KP-Regelung durch LSA [n/km]	-	0,80	0,87	6,18	0,80	6,18
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	-	68,00	105,00	700,00	106,64	700,00
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	-	6,00	9,72	56,00	10,85	56,00
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	-	0,28	0,32	0,96	0,23	0,96
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	-	0,12	0,19	1,00	0,21	1,00

n = 2.232

Tabelle A 11-2 Kennwerte der Merkmalsausprägung für die Frauen in der Stichprobe

Merkmal	Minimum	Median	Mittel	Maximum	Stand.abw.	Streuung
Fahrtweite [km]	0,34	2,65	4,02	50,22	3,99	49,88
Maximal Längsneigung [%]	-	4,56	5,88	40,01	5,10	40,01
Längsneigung <2% [%]	0,05	0,90	0,86	1,00	0,14	0,95
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	-	0,27	0,28	0,97	0,23	0,97
Asphaltoberfläche [%]	-	0,60	0,55	0,97	0,23	0,97
RV - Längsaufstellung [%]	-	0,21	0,27	0,93	0,23	0,93
v_zul ≤ 30km/h [%]	-	0,20	0,28	1,00	0,27	1,00
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route [Kfz/Tag]	-	4.810	6.213	30.003	5.332	30.003
1 Richtungsfahrstreifen [%]	-	0,47	0,45	0,97	0,25	0,97
DTV > 500 Rad/Tag [%]	-	0,38	0,40	1,00	0,34	1,00
Geringe Fußverkehrsdichte [%]	-	0,04	0,06	0,59	0,07	0,59
KP-Regelung RVL [n/km]	-	2,99	3,21	11,62	2,00	11,62
KP-Regelung durch LSA [n/km]	-	0,85	0,94	4,65	0,88	4,65
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	-	66,00	98,47	495,00	100,81	495,00
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	-	7,00	10,47	63,00	11,88	63,00
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	-	0,31	0,35	0,98	0,24	0,98
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	-	0,08	0,16	0,99	0,19	0,99

n = 1.701

Tabelle A 11-3 Modellkoeffizienten des Routenwahlmodells der Probanden

Merkmal	Value	Std err	t-test	p-value		Robust Std err	Robust t-test	p-value
Konstante	0,860	0,070	12,210	-	-	0,072	11,990	- -
Fahrtweite	0,371	0,061	6,060	-	-	0,060	6,200	- -
Maximal Längsneigung	-0,071	0,010	-7,430	-	-	0,009	-7,840	- -
Längsneigung <2%	0,869	0,503	1,730	0,080	*	0,408	2,130	0,030 -
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	5,600	0,387	14,490	-	-	0,432	12,980	- -
Asphaltoberfläche	2,890	0,381	7,580	-	-	0,357	8,090	- -
RV - Längsaufstellung	0,938	0,399	2,350	0,020	-	0,448	2,090	0,040 -
v_zul ≤ 30km/h	-0,174	0,304	-0,570	0,570	*	0,319	-0,540	0,590 *
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route	-0,000	0,000	-4,890	-	-	0,000	-4,770	- -
1 Richtungsfahrstreifen	1,810	0,400	4,520	-	-	0,404	4,470	- -
DTV > 500 Rad/Tag	2,920	0,281	10,390	-	-	0,277	10,550	- -
Geringe Fußverkehrsdichte	0,037	0,737	0,050	0,960	*	0,737	0,050	0,960 *
KP-Regelung RVL	0,189	0,046	4,080	-	-	0,045	4,190	- -
KP-Regelung durch LSA	0,115	0,105	1,090	0,280	*	0,111	1,030	0,300 *
Unfallhäufigkeit gesamt	-0,004	0,001	-3,140	-	-	0,001	-3,410	- -
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	0,018	0,008	2,190	0,030	-	0,008	2,340	0,020 -
Umfeldnutzung Wohngebiet	1,090	0,431	2,530	0,010	-	0,437	2,500	0,010 -
Umfeldnutzung Grünfläche	-0,042	0,390	-0,110	0,910	*	0,386	-0,110	0,910 *

* p-value ≥ 0,05

Tabelle A 11-4 Modellkoeffizienten des Routenwahlmodells der Probandinnen

Merkmal	Value	Std err	t-test	p-value		Robust Std err	Robust t-test	p-value
Konstante	0,738	0,072	10,180	-	-	0,070	10,540	- -
Fahrtweite	0,138	0,044	3,150	-	-	0,043	3,200	- -
Maximal Längsneigung	-0,085	0,013	-6,300	-	-	0,013	-6,490	- -
Längsneigung <2%	1,300	0,713	1,830	0,070	*	0,725	1,800	0,070 *
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	6,030	0,467	12,920	-	-	0,489	12,330	- -
Asphaltoberfläche	3,090	0,441	7,010	-	-	0,448	6,900	- -
RV - Längsaufstellung	-0,203	0,421	-0,480	0,630	*	0,464	-0,440	0,660 *
v_zul ≤ 30km/h	0,551	0,317	1,740	0,080	*	0,332	1,660	0,100 *
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route	-0,000	0,000	-4,950	-	-	0,000	-5,080	- -
1 Richtungsfahrstreifen	1,550	0,449	3,460	-	-	0,492	3,160	- -
DTV > 500 Rad/Tag	1,910	0,317	6,040	-	-	0,328	5,840	- -
Geringe Fußverkehrsdichte	-2,800	0,818	-3,420	-	-	1,050	-2,660	0,010 -
KP-Regelung RVL	0,091	0,048	1,900	0,060	*	0,048	1,880	0,060 *
KP-Regelung durch LSA	0,427	0,112	3,810	-	-	0,123	3,480	- -
Unfallhäufigkeit gesamt	-0,006	0,001	-3,940	-	-	0,001	-4,230	- -
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	0,057	0,009	6,620	-	-	0,008	6,700	- -
Umfeldnutzung Wohngebiet	1,810	0,532	3,400	-	-	0,546	3,310	- -
Umfeldnutzung Grünfläche	0,903	0,427	2,110	0,030	-	0,419	2,150	0,030 -

* p-value ≥ 0,05

Tabelle A 11-5 Kennwerte der Merkmalsausprägung für Arbeitswege

Merkmal	Minimum	Median	Mittel	Maximum	Stand.abw.	Streuung
Fahrtweite [km]	0,38	3,98	4,97	35,75	4,06	35,38
Maximal Längsneigung [%]	-	5,53	7,02	112,00	6,31	112,00
Längsneigung <2% [%]	0,12	0,88	0,85	1,00	0,13	0,88
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	-	0,34	0,32	0,99	0,22	0,99
Asphaltoberfläche [%]	-	0,60	0,54	1,00	0,22	1,00
RV - Längsaufstellung [%]	-	0,19	0,23	0,89	0,20	0,89
V_zul < 30km/h [%]	-	0,17	0,24	1,00	0,23	1,00
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route [Kfz/Tag]	-	5.897,56	6.910,21	26.850,75	5.426,51	26.850,75
1 Richtungsfahrstreifen [%]	-	0,45	0,44	0,95	0,24	0,95
DTV > 500 Rad/Tag [%]	-	0,48	0,46	1,00	0,32	1,00
Geringe Fußverkehrsdichte [n/km]	-	0,05	0,07	0,55	0,07	0,55
KP-Regelung RVL [n/km]	-	2,79	2,98	10,84	1,72	10,84
KP-Regelung durch LSA [%]	-	0,92	0,98	5,16	0,81	5,16
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	-	92,00	122,46	571,00	109,28	571,00
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	-	9,00	12,41	57,00	11,66	57,00
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	-	0,28	0,31	0,96	0,21	0,96
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	-	0,11	0,18	1,00	0,20	1,00

n = 2.036

Tabelle A 11-6 Kennwerte der Merkmalsausprägung für Einkaufswege

Merkmal	Minimum	Median	Mittel	Maximum	Stand.abw.	Streuung
Fahrtweite [km]	0,34	1,76	2,80	16,88	2,81	16,54
Maximal Längsneigung [%]	0,16	4,10	5,42	37,17	4,85	37,01
Längsneigung <2% [%]	0,11	0,91	0,85	1,00	0,17	0,89
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	-	0,17	0,22	0,85	0,23	0,85
Asphaltoberfläche [%]	-	0,60	0,55	0,97	0,25	0,97
RV - Längsaufstellung [%]	-	0,21	0,27	0,93	0,25	0,93
V_zul < 30km/h [%]	-	0,21	0,32	1,00	0,31	1,00
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route [Kfz/Tag]	-	4.216,35	5.504,16	21.825,64	5.151,03	21.825,64
1 Richtungsfahrstreifen [%]	-	0,52	0,49	0,97	0,26	0,97
DTV > 500 Rad/Tag [%]	-	0,23	0,32	1,00	0,33	1,00
Geringe Fußverkehrsdichte [n/km]	-	0,04	0,07	0,59	0,09	0,59
KP-Regelung RVL [n/km]	-	3,40	3,58	11,53	2,23	11,53
KP-Regelung durch LSA [%]	-	0,60	0,81	4,11	0,88	4,11
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	-	33,00	66,22	495,00	85,47	495,00
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	-	2,00	6,19	53,00	9,27	53,00
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	-	0,34	0,40	0,98	0,28	0,98
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	-	0,07	0,14	1,00	0,19	1,00

n = 560

Tabelle A 11-7 Kennwerte der Merkmalsausprägung für Freizeitwege

Merkmal	Minimum	Median	Mittel	Maximum	Stand.abw.	Streuung
Fahrtweite [km]	0,34	2,76	4,35	60,41	4,91	60,07
Maximal Längsneigung [%]	-	5,32	7,01	72,00	6,54	72,00
Längsneigung <2% [%]	-	0,89	0,85	1,00	0,14	1,00
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	-	0,23	0,26	1,00	0,24	1,00
Asphaltoberfläche [%]	-	0,57	0,53	1,00	0,24	1,00
RV - Längsaufstellung [%]	-	0,17	0,23	0,95	0,22	0,95
V_zul < 30km/h [%]	-	0,20	0,27	1,00	0,26	1,00
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route [Kfz/Tag]	-	4.245,03	5.786,57	30.003,30	5.497,12	30.003,30
1 Richtungsfahrstreifen [%]	-	0,45	0,44	1,00	0,25	1,00
DTV > 500 Rad/Tag [%]	-	0,33	0,37	1,00	0,33	1,00
Geringe Fußverkehrsdichte [n/km]	-	0,05	0,07	0,73	0,08	0,73
KP-Regelung RVL [n/km]	-	2,78	3,11	11,62	2,06	11,62
KP-Regelung durch LSA [%]	-	0,69	0,83	6,18	0,86	6,18
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	-	51,00	86,34	700,00	96,33	700,00
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	-	4,00	8,06	63,00	10,72	63,00
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	-	0,30	0,34	0,97	0,24	0,97
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	-	0,10	0,19	1,00	0,22	1,00

n = 1.337

Tabelle A 11-8 Modellkoeffizienten des Routenwahlmodells für Arbeitswege

Merkmal	Value	Std err	t-test	p-value		Robust Std err	Robust t-test	p-value
Konstante	0,760	0,081	9,370	-	-	0,084	9,050	- -
Fahrtweite	0,158	0,076	2,070	0,040	-	0,088	1,800	0,070 *
Maximal Längsneigung	-0,079	0,011	-7,070	-	-	0,011	-7,400	- -
Längsneigung <2%	-0,314	0,697	-0,450	0,650	*	0,763	-0,410	0,680 *
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	8,050	0,480	16,750	-	-	0,523	15,390	- -
Asphaltoberfläche	2,600	0,443	5,870	-	-	0,413	6,300	- -
RV - Längsaufstellung	1,230	0,472	2,620	0,010	-	0,522	2,360	0,020 -
v_zul ≤ 30km/h	-0,492	0,357	-1,380	0,170	*	0,396	-1,240	0,210 *
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route	-0,000	0,000	-7,430	-	-	0,000	-7,190	- -
1 Richtungsfahrstreifen	2,730	0,476	5,740	-	-	0,492	5,550	- -
DTV > 500 Rad/Tag	2,940	0,323	9,110	-	-	0,319	9,220	- -
Geringe Fußverkehrsdichte	-0,929	0,898	-1,040	0,300	*	0,891	-1,040	0,300 *
KP-Regelung RVL	0,213	0,057	3,700	-	-	0,058	3,650	- -
KP-Regelung durch LSA	0,484	0,129	3,760	-	-	0,127	3,820	- -
Unfallhäufigkeit gesamt	-0,006	0,001	-5,150	-	-	0,001	-5,590	- -
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	0,041	0,009	4,720	-	-	0,008	4,870	- -
Umfeldnutzung Wohngebiet	1,880	0,530	3,560	-	-	0,490	3,850	- -
Umfeldnutzung Grünfläche	1,240	0,469	2,640	0,010	-	0,476	2,600	0,010 -

* p-value ≥ 0,05

Tabelle A 11-9 Modellkoeffizienten des Routenwahlmodells für Einkaufswege

Merkmal	Value	Std err	t-test	p-value		Robust Std err	Robust t-test	p-value
Konstante	0,826	0,125	6,610	-	-	0,124	6,650	- -
Fahrtweite	-0,033	0,116	-0,290	0,780	*	0,105	-0,310	0,750 *
Maximal Längsneigung	-0,108	0,023	-4,700	-	-	0,023	-4,720	- -
Längsneigung <2%	2,860	0,993	2,880	-	-	0,857	3,340	- -
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	4,320	0,741	5,820	-	-	0,736	5,870	- -
Asphaltoberfläche	3,370	0,762	4,430	-	-	0,693	4,870	- -
RV - Längsaufstellung	-0,047	0,668	-0,070	0,940	*	0,676	-0,070	0,940 *
v_zul ≤ 30km/h	0,803	0,502	1,600	0,110	*	0,512	1,570	0,120 *
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route	-0,000	0,000	-1,090	0,280	*	0,000	-1,130	0,260 *
1 Richtungsfahrstreifen	0,892	0,764	1,170	0,240	*	0,769	1,160	0,250 *
DTV > 500 Rad/Tag	1,980	0,517	3,830	-	-	0,483	4,100	- -
Geringe Fußverkehrsdichte	-1,650	1,090	-1,510	0,130	*	1,410	-1,170	0,240 *
KP-Regelung RVL	0,197	0,071	2,760	0,010	-	0,076	2,600	0,010 -
KP-Regelung durch LSA	0,054	0,191	0,280	0,780	*	0,206	0,260	0,790 *
Unfallhäufigkeit gesamt	-0,003	0,003	-0,980	0,330	*	0,003	-1,120	0,260 *
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	0,045	0,019	2,370	0,020	-	0,016	2,820	- -
Umfeldnutzung Wohngebiet	1,750	0,809	2,160	0,030	-	0,744	2,350	0,020 -
Umfeldnutzung Grünfläche	0,526	0,670	0,790	0,430	*	0,635	0,830	0,410 *

* p-value ≥ 0,05

Tabelle A 11-10 Modellkoeffizienten des Routenwahlmodells für Freizeitwege

Merkmal	Value	Std err	t-test	p-value		Robust Std err	Robust t-test	p-value
Konstante	0,734	0,082	8,980	-	-	0,082	8,980	- -
Fahrtweite	0,370	0,060	6,140	-	-	0,058	6,330	- -
Maximal Längsneigung	-0,064	0,012	-5,240	-	-	0,012	-5,340	- -
Längsneigung <2%	1,680	0,713	2,360	0,020	-	0,629	2,670	0,010 -
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	4,080	0,464	8,790	-	-	0,483	8,450	- -
Asphaltoberfläche	3,530	0,452	7,810	-	-	0,464	7,600	- -
RV - Längsaufstellung	-0,208	0,447	-0,470	0,640	*	0,485	-0,430	0,670 *
v_zul ≤ 30km/h	0,495	0,342	1,450	0,150	*	0,344	1,440	0,150 *
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route	-0,000	0,000	-3,250	-	-	0,000	-3,250	- -
1 Richtungsfahrstreifen	1,440	0,457	3,150	-	-	0,490	2,940	- -
DTV > 500 Rad/Tag	1,930	0,330	5,850	-	-	0,324	5,940	- -
Geringe Fußverkehrsdichte	-0,894	0,865	-1,030	0,300	*	0,799	-1,120	0,260 *
KP-Regelung RVL	0,048	0,050	0,960	0,340	*	0,046	1,050	0,290 *
KP-Regelung durch LSA	0,200	0,114	1,760	0,080	*	0,121	1,650	0,100 *
Unfallhäufigkeit gesamt	-0,002	0,002	-1,470	0,140	*	0,001	-1,600	0,110 *
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	0,023	0,010	2,430	0,020	-	0,010	2,310	0,020 -
Umfeldnutzung Wohngebiet	0,848	0,512	1,660	0,100	*	0,556	1,530	0,130 *
Umfeldnutzung Grünfläche	-0,451	0,450	-1,000	0,320	*	0,426	-1,060	0,290 *

* p-value ≥ 0,05

Tabelle A 11-11 Kennwerte der Merkmalsausprägung für Fahrten des „ambitionierten“ Radfahr-Typs

Merkmal	Minimum	Median	Mittel	Maximum	Stand.abw.	Streuung
Fahrtweite [km]	0,39	4,44	6,07	50,22	5,51	49,84
Maximal Längsneigung [%]	-	7,59	9,06	38,54	6,67	38,54
Längsneigung <2% [%]	0,04	0,85	0,83	1,00	0,13	0,96
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	-	0,25	0,27	1,00	0,24	1,00
Asphaltoberfläche [%]	-	0,53	0,49	1,00	0,25	1,00
RV - Längsaufstellung [%]	-	0,13	0,19	0,90	0,19	0,90
V_zul < 30km/h [%]	-	0,15	0,23	1,00	0,24	1,00
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route [Kfz/Tag]	-	5.827,01	6.686,33	26.850,75	5.442,99	26.850,75
1 Richtungsfahrstreifen [%]	-	0,45	0,42	0,99	0,24	0,99
DTV > 500 Rad/Tag [%]	-	0,35	0,35	1,00	0,32	1,00
Geringe Fußverkehrsdichte [n/km]	-	0,04	0,06	0,52	0,07	0,52
KP-Regelung RVL [n/km]	-	2,40	2,77	10,12	1,88	10,12
KP-Regelung durch LSA [%]	-	0,65	0,80	6,18	0,84	6,18
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	-	57,00	114,74	495,00	127,34	495,00
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	-	5,00	11,44	63,00	13,64	63,00
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	-	0,26	0,30	0,96	0,22	0,96
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	-	0,11	0,19	1,00	0,22	1,00

n = 759

Tabelle A 11-12 Kennwerte der Merkmalsausprägung für Fahrten des „funktionellen“ Radfahr-Typs

Merkmal	Minimum	Median	Mittel	Maximum	Stand.abw.	Streuung
Fahrtweite [km]	0,34	2,72	4,04	35,75	3,84	35,41
Maximal Längsneigung [%]	-	4,52	6,36	112,00	7,34	112,00
Längsneigung <2% [%]	0,13	0,90	0,86	1,00	0,14	0,87
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	-	0,32	0,31	0,97	0,24	0,97
Asphaltoberfläche [%]	-	0,61	0,57	1,00	0,22	1,00
RV - Längsaufstellung [%]	-	0,20	0,26	0,93	0,23	0,93
V_zul < 30km/h [%]	-	0,20	0,27	1,00	0,27	1,00
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route [Kfz/Tag]	-	4.650,07	6.092,70	28.953,62	5.656,80	28.953,62
1 Richtungsfahrstreifen [%]	-	0,46	0,45	0,97	0,25	0,97
DTV > 500 Rad/Tag [%]	-	0,42	0,40	1,00	0,32	1,00
Geringe Fußverkehrsdichte [n/km]	-	0,04	0,07	0,57	0,09	0,57
KP-Regelung RVL [n/km]	-	2,99	3,28	11,52	1,96	11,52
KP-Regelung durch LSA [%]	-	0,72	0,80	4,11	0,75	4,11
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	-	59,00	91,44	491,00	92,35	491,00
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	-	5,00	8,27	54,00	9,36	54,00
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	-	0,31	0,36	0,94	0,24	0,94
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	-	0,12	0,18	0,98	0,20	0,98

n = 955

Tabelle A 11-13 Kennwerte der Merkmalsausprägung für Fahrten des „funktionellen“ Radfahr-Typs

Merkmal	Minimum	Median	Mittel	Maximum	Stand.abw.	Streuung
Fahrtweite [km]	0,34	2,87	3,94	60,41	4,00	60,07
Maximal Längsneigung [%]	-	4,75	5,52	40,01	4,42	40,01
Längsneigung <2% [%]	0,04	0,91	0,86	1,00	0,14	0,97
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	-	0,27	0,28	1,00	0,23	1,00
Asphaltoberfläche [%]	-	0,60	0,53	0,97	0,24	0,97
RV - Längsaufstellung [%]	-	0,19	0,24	0,93	0,21	0,93
V_zul < 30km/h [%]	-	0,18	0,26	1,00	0,26	1,00
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route [Kfz/Tag]	-	5.115,63	6.242,72	30.003,30	5.096,07	30.003,30
1 Richtungsfahrstreifen [%]	-	0,47	0,45	1,00	0,26	1,00
DTV > 500 Rad/Tag [%]	-	0,43	0,42	1,00	0,33	1,00
Geringe Fußverkehrsdichte [n/km]	-	0,05	0,08	0,73	0,08	0,73
KP-Regelung RVL [n/km]	-	2,94	3,18	11,53	2,01	11,53
KP-Regelung durch LSA [%]	-	0,92	0,99	4,34	0,87	4,34
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	-	75,00	105,36	700,00	104,92	700,00
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	-	7,00	10,99	59,00	11,74	59,00
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	-	0,32	0,35	0,98	0,24	0,98
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	-	0,07	0,15	1,00	0,20	1,00

n = 1.154

Tabelle A 11-14 Kennwerte der Merkmalsausprägung für Fahrten des „pragmatischen“ Radfahr-Typs

Merkmal	Minimum	Median	Mittel	Maximum	Stand.abw.	Streuung
Fahrtweite [km]	0,34	3,14	4,21	37,69	3,66	37,36
Maximal Längsneigung [%]	0,11	5,51	6,93	72,00	6,03	71,89
Längsneigung <2% [%]	-	0,87	0,84	1,00	0,15	1,00
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden [%]	-	0,28	0,28	0,90	0,22	0,90
Asphaltoberfläche [%]	-	0,60	0,55	0,95	0,21	0,95
RV - Längsaufstellung [%]	-	0,22	0,25	0,95	0,20	0,95
V_zul < 30km/h [%]	-	0,20	0,27	1,00	0,25	1,00
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route [Kfz/Tag]	-	4.664,76	6.376,17	26.497,49	5.608,56	26.497,49
1 Richtungsfahrstreifen [%]	-	0,48	0,46	0,95	0,24	0,95
DTV > 500 Rad/Tag [%]	-	0,47	0,44	1,00	0,33	1,00
Geringe Fußverkehrsdichte [n/km]	-	0,04	0,06	0,54	0,07	0,54
KP-Regelung RVL [n/km]	-	2,95	3,12	11,62	1,82	11,62
KP-Regelung durch LSA [%]	-	0,91	0,97	4,65	0,86	4,65
Unfallhäufigkeit gesamt [n]	-	72,00	99,39	571,00	93,48	571,00
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt [n]	-	6,00	9,62	54,00	10,35	54,00
Umfeldnutzung Wohngebiet [%]	-	0,27	0,31	0,97	0,22	0,97
Umfeldnutzung Grünfläche [%]	-	0,11	0,19	0,91	0,20	0,91

n = 1.065

Tabelle A 11-15 Modellkoeffizienten des Routenwahlmodells für den „ambitionierten“ Radfahr-Typ

Merkmal	Value	Std err	t-test	p-value		Robust Std err	Robust t-test	p-value
Konstante	0,731	0,126	5,800	-	-	0,135	5,420	- -
Fahrtweite	0,371	0,081	4,580	-	-	0,086	4,310	- -
Maximal Längsneigung	-0,083	0,016	-5,230	-	-	0,015	-5,550	- -
Längsneigung <2%	1,360	0,953	1,420	0,150	*	0,835	1,620	0,100 *
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	6,970	0,752	9,270	-	-	0,793	8,790	- -
Asphaltoberfläche	3,030	0,734	4,120	-	-	0,698	4,340	- -
RV - Längsaufstellung	0,262	0,796	0,330	0,740	*	0,846	0,310	0,760 *
v_zul ≤ 30km/h	-0,231	0,592	-0,390	0,700	*	0,618	-0,370	0,710 *
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route	-0,000	0,000	-4,060	-	-	0,000	-4,320	- -
1 Richtungsfahrstreifen	0,340	0,770	0,440	0,660	*	0,721	0,470	0,640 *
DTV > 500 Rad/Tag	4,040	0,651	6,210	-	-	0,583	6,940	- -
Geringe Fußverkehrsdichte	-0,188	1,430	-0,130	0,890	*	1,280	-0,150	0,880 *
KP-Regelung RVL	0,382	0,088	4,330	-	-	0,081	4,730	- -
KP-Regelung durch LSA	0,122	0,212	0,580	0,560	*	0,196	0,620	0,530 *
Unfallhäufigkeit gesamt	-0,003	0,002	-1,270	0,200	*	0,002	-1,510	0,130 *
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	0,039	0,014	2,710	0,010	-	0,012	3,390	- -
Umfeldnutzung Wohngebiet	0,540	0,822	0,660	0,510	*	0,806	0,670	0,500 *
Umfeldnutzung Grünfläche	0,070	0,699	0,100	0,920	*	0,681	0,100	0,920 *

* p-value ≥ 0,05

Tabelle A 11-16 Modellkoeffizienten des Routenwahlmodells für den „funktionellen“ Radfahr-Typ

Merkmal	Value	Std err	t-test	p-value		Robust Std err	Robust t-test	p-value
Konstante	0,662	0,107	6,210	-	-	0,103	6,420	- -
Fahrtweite	0,497	0,102	4,850	-	-	0,091	5,440	- -
Maximal Längsneigung	-0,073	0,016	-4,570	-	-	0,016	-4,550	- -
Längsneigung <2%	1,540	0,963	1,600	0,110	*	0,842	1,830	0,070 *
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	6,530	0,645	10,120	-	-	0,722	9,040	- -
Asphaltoberfläche	3,510	0,634	5,520	-	-	0,619	5,660	- -
RV - Längsaufstellung	0,913	0,659	1,390	0,170	*	0,778	1,170	0,240 *
v_zul ≤ 30km/h	-0,207	0,462	-0,450	0,660	*	0,469	-0,440	0,660 *
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route	-0,000	0,000	-4,040	-	-	0,000	-3,520	- -
1 Richtungsfahrstreifen	0,492	0,680	0,720	0,470	*	0,760	0,650	0,520 *
DTV > 500 Rad/Tag	2,050	0,414	4,950	-	-	0,438	4,670	- -
Geringe Fußverkehrsdichte	-1,400	1,100	-1,270	0,200	*	1,190	-1,170	0,240 *
KP-Regelung RVL	0,241	0,069	3,510	-	-	0,069	3,480	- -
KP-Regelung durch LSA	0,338	0,161	2,100	0,040	-	0,173	1,960	0,050 *
Unfallhäufigkeit gesamt	-0,005	0,002	-2,530	0,010	-	0,002	-2,460	0,010 -
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	0,013	0,016	0,850	0,390	*	0,015	0,890	0,370 *
Umfeldnutzung Wohngebiet	0,615	0,707	0,870	0,380	*	0,727	0,850	0,400 *
Umfeldnutzung Grünfläche	0,147	0,596	0,250	0,800	*	0,558	0,260	0,790 *

* p-value ≥ 0,05

Tabelle A 11-17 Modellkoeffizienten des Routenwahlmodells für den „passionierten“ Radfahr-Typ

Merkmal	Value	Std err	t-test	p-value		Robust Std err	Robust t-test	p-value
Konstante	0,840	0,089	9,470	-	-	0,089	9,450	- -
Fahrtweite	0,125	0,060	2,070	0,040	-	0,051	2,450	0,010 -
Maximal Längsneigung	-0,052	0,017	-3,030	-	-	0,016	-3,210	- -
Längsneigung <2%	1,260	0,644	1,960	0,050	*	0,548	2,300	0,020 -
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	4,640	0,519	8,930	-	-	0,541	8,570	- -
Asphaltoberfläche	2,960	0,514	5,750	-	-	0,479	6,180	- -
RV - Längsaufstellung	-0,006	0,477	-0,010	0,990	*	0,513	-0,010	0,990 *
v_zul ≤ 30km/h	-0,354	0,371	-0,950	0,340	*	0,405	-0,870	0,380 *
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route	-0,000	0,000	-3,540	-	-	0,000	-3,700	- -
1 Richtungsfahrstreifen	2,000	0,554	3,600	-	-	0,616	3,240	- -
DTV > 500 Rad/Tag	2,250	0,378	5,940	-	-	0,367	6,130	- -
Geringe Fußverkehrsdichte	-1,170	0,909	-1,290	0,200	*	1,030	-1,140	0,260 *
KP-Regelung RVL	0,100	0,061	1,650	0,100	*	0,062	1,630	0,100 *
KP-Regelung durch LSA	0,223	0,135	1,650	0,100	*	0,144	1,540	0,120 *
Unfallhäufigkeit gesamt	-0,004	0,002	-2,360	0,020	-	0,001	-2,720	0,010 -
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	0,079	0,012	6,810	-	-	0,012	6,710	- -
Umfeldnutzung Wohngebiet	1,760	0,585	3,020	-	-	0,590	2,990	- -
Umfeldnutzung Grünfläche	1,630	0,519	3,140	-	-	0,502	3,250	- -

* p-value ≥ 0,05

Tabelle A 11-18 Modellkoeffizienten des Routenwahlmodells für den „pragmatischen“ Radfahr-Typ

Merkmal	Value	Std err	t-test	p-value		Robust Std err	Robust t-test	p-value
Konstante	0,822	0,099	8,310	-	-	0,099	8,330	- -
Fahrtweite	0,129	0,075	1,730	0,080	*	0,066	1,950	0,050 *
Maximal Längsneigung	-0,103	0,015	-6,870	-	-	0,015	-7,010	- -
Längsneigung <2%	0,717	0,967	0,740	0,460	*	0,851	0,840	0,400 *
Radverkehrsinfrastruktur vorhanden	5,840	0,591	9,880	-	-	0,674	8,670	- -
Asphaltoberfläche	3,060	0,569	5,370	-	-	0,570	5,360	- -
RV - Längsaufstellung	0,810	0,572	1,420	0,160	*	0,649	1,250	0,210 *
v_zul ≤ 30km/h	1,010	0,447	2,260	0,020	-	0,451	2,250	0,020 -
Durchschnittlicher DTV des MV entlang einer Route	-0,000	0,000	-3,820	-	-	0,000	-3,730	- -
1 Richtungsfahrstreifen	2,430	0,560	4,340	-	-	0,555	4,380	- -
DTV > 500 Rad/Tag	2,720	0,399	6,820	-	-	0,414	6,580	- -
Geringe Fußverkehrsdichte	-0,683	1,060	-0,640	0,520	*	1,030	-0,660	0,510 *
KP-Regelung RVL	0,012	0,065	0,190	0,850	*	0,067	0,180	0,850 *
KP-Regelung durch LSA	0,356	0,151	2,360	0,020	-	0,166	2,150	0,030 -
Unfallhäufigkeit gesamt	-0,007	0,002	-4,170	-	-	0,002	-4,400	- -
Häufigkeit kritischer Situationen gesamt	0,006	0,011	0,520	0,610	*	0,010	0,560	0,580 *
Umfeldnutzung Wohngebiet	2,360	0,655	3,610	-	-	0,638	3,700	- -
Umfeldnutzung Grünfläche	-0,757	0,587	-1,290	0,200	*	0,622	-1,220	0,220 *

* p-value ≥ 0,05