



**Untersuchung von Überholverhalten nicht-motorisierter  
Verkehrsteilnehmer im urbanen Raum im Kontext der  
Verkehrssicherheit**

**Bachelorarbeit**

**ITL-Kennung: 2323**

**Autorin: Joelle Piep**

**Erstprüfer: Prof. Dr. Jürgen Pannek**

**15.09.2023**





Institutsleitung  
Prof. Dr. Jürgen Pannek  
Hermann-Blenk-Straße 42  
38108 Braunschweig  
Deutschland

Tel. +49 (0) 531 391-66300  
Fax +49 (0) 531 391-66399  
j.pannek@tu-braunschweig.de  
itl-office@tu-braunschweig.de  
<http://www.itl.tu-bs.de>

Aufgabenstellung für eine  
**Bachelorarbeit**

<b>Bearbeiter:</b>	Joelle Piep		
<b>Fakultät:</b>	Maschinenbau	<b>Bearbeitungsdauer:</b>	3 Monate
<b>ITL-Kennung:</b>	ITL 2323	<b>Betreuer:</b>	Dominik Wittenberg (ITL) Claudia Leschik (DLR)

**Thema: Untersuchung von Überholverhalten nicht-motorisierter Verkehrsteilnehmender im urbanen Raum im Kontext der Verkehrssicherheit**

**Topic: Analysis of non-motorised road users' overtaking behaviour in urban spaces in a road safety context**

Im Zuge der angestrebten Verkehrswende in der vom Klimawandel beeinflussten Gesellschaft durch die Abkehr von fossilen Energieträgern gewinnt das Fahrrad zunehmende Bedeutung als nachhaltige individuelle Mobilitätslösung. Seit einigen Jahren nehmen zusätzlich E-Scooter eine maßgebliche Rolle als Verkehrsmittel im urbanen Verkehr ein. Beide gelten als Vulnerable Road Users (VRU), deren Sicherheit im Verkehrsgeschehen im Rahmen der Vision Zero als gesellschaftliches Ziel gilt. Ein sicherheitsrelevantes Manöver stellen hierbei Überholvorgänge zwischen VRU dar, die im Gegensatz zu Überholmanövern zwischen PKW bisher wenig untersucht wurden.

Ziel der Arbeit ist die Analyse des Überholverhaltens zwischen VRU anhand von in Messkampagnen im urbanen Raum erhobenen Trajektoriendaten. Die Untersuchung bildet eine Basis für die Modellierung des Verkehrsgeschehens, indem sie Erkenntnisse zum Verkehrsverhalten für realistische mikroskopische Verkehrssimulationen erbringt. Dabei können Rückschlüsse auf die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben, wie z.B. zu Mindestabständen, gezogen werden.

---

Die Arbeit soll folgende Punkte adressieren:

- Recherche:
  - Unfallgeschehen im urbanen Raum, insbesondere unter Beteiligung von VRUs
  - Metriken zur Kritikalitätsbewertung
  - rechtliche Grundlagen im Kontext von Überholvorgängen sowie der Gestaltung von Radinfrastruktur
- Methodik:
  - Auswahl von verfügbaren geeigneten Datensätzen
  - Auswahl relevanter Verkehrsteilnehmender, Szenarien und Parametern
- Analyse und Modellierung:
  - Entwicklung von Algorithmen zur Aufbereitung und Analyse von Trajektorien
  - Analyse von normalen, kritischen und atypischen Überholvorgängen
  - Empirisch deskriptive Analyse der Messdaten mit Empfehlung zu nutzender Parameter für weitere Modellbildung (ggf. mit Empfehlung von Modellerweiterungen)
- Diskussion und Einordnung der Ergebnisse im Kontext der Literaturrecherche

Die Ergebnisse der Arbeit sind ausführlich nach den in der Dokumentenvorlage festgelegten Richtlinien des Instituts für Intermodale Transport- und Logistiksysteme zu dokumentieren. Maßgeblich für die Bewertung der Arbeit ist die zum Abgabetermin vorliegende Fassung. Weitere Einzelheiten sind mit dem Betreuer abzusprechen.

Geistiges und materielles Eigentum, das den Verfassenden zur Verfügung gestellt wird, verbleibt Eigentum der Zurverfügungstellenden. Die Arbeit ist geistiges Eigentum der Verfassenden. Die Verfassenden geben dem Institut für Intermodale Transport- und Logistiksysteme ein einfaches Nutzungsrecht an den Inhalten und Ergebnissen der Arbeit.

Die Arbeit wird als externe Arbeit in Kooperation mit dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) erstellt. Eine Geheimhaltung der Arbeit ist vom DLR nicht gefordert.

Stempel/Unterschrift/Datum (ITL)

---

Prof. Dr. Jürgen Pannek

---

Unterschrift des Studierenden

## EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Prüfungsarbeit *Untersuchung von Überholverhalten nicht-motorisierter Verkehrsteilnehmender im urbanen Raum im Kontext der Verkehrssicherheit* selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe sowie nur mit den von der Lehrperson zuvor bekannt gegebenen zulässigen Hilfsmitteln bearbeitet habe und dass ich die vorliegende Arbeit noch nicht für diese oder eine andere Prüfung eingereicht habe. Alle benutzten Quellen und Hilfsmittel habe ich vollständig angegeben.

Mir ist bekannt, dass Täuschungsversuche –insbesondere nachgewiesene Plagiate sowie unvollständige Quellen-und Hilfsmittelangaben– nach §11, Abs. 4 der Allgemeinen Prüfungsordnung zum endgültigen Nichtbestehen einer Prüfung und somit zum Scheitern im Studiengang führen können.



Braunschweig, 15.09.2023

# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>x</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Motivation . . . . .	1
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	3
1.3 Kurzvorstellung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. . . . .	4
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1 Verkehrsentwicklung . . . . .	7
2.1.1 Vision Zero . . . . .	7
2.1.2 Mobilitätswende . . . . .	8
2.2 Rechtliche Grundlagen . . . . .	10
2.2.1 Straßenverkehrsrechtliche Vorschriften . . . . .	10
2.2.2 Aktuelle Rechtsprechung . . . . .	11
2.2.3 Radverkehrsanlagen . . . . .	12
2.3 Verkehrsdatenanalyse . . . . .	13
2.3.1 Datenerhebung . . . . .	13
2.3.2 Kritikalitätsmetriken . . . . .	16
2.4 Stand der Forschung . . . . .	18
2.4.1 Überholvorgänge zwischen Kraftfahrzeugen . . . . .	18
2.4.2 Überholvorgänge zwischen Kraftfahrzeugen und vulnerablen Verkehrsteilnehmenden . . . . .	20
2.4.3 Überholvorgänge zwischen vulnerablen Verkehrsteilnehmenden . . . . .	22
2.4.4 Unfallstatistik . . . . .	23
<b>3 Methodik</b>	<b>25</b>
3.1 Messkampagne . . . . .	25
3.1.1 Projekthintergrund . . . . .	25

3.1.2	Messort . . . . .	26
3.1.3	Einschränkungen . . . . .	27
3.2	Datenbasis . . . . .	28
3.2.1	Objektdetektion und Datenerzeugung . . . . .	28
3.2.2	Auswertungen zum Verkehrsaufkommen und zur Geschwindigkeitsverteilung . . . . .	30
3.2.3	Datenrelevanz und -güte . . . . .	37
3.3	Methodik der Auswertung . . . . .	39
3.3.1	TASI . . . . .	39
3.3.2	Algorithmische Detektion von Überholvorgängen . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Analyseergebnisse</b>	<b>43</b>
4.1	Ablauf der Vorverarbeitung der Überholvorgänge . . . . .	43
4.1.1	Manuelle Annotation . . . . .	43
4.1.2	Algorithmische Auswertung . . . . .	48
4.1.3	Ergebnis der Vorverarbeitung der Überholvorgänge . . . . .	49
4.2	Analyse der Überholvorgänge . . . . .	50
4.2.1	Time-to-collision . . . . .	51
4.2.2	Seitlicher Überholabstand . . . . .	58
4.2.3	Räumliche Häufungspunkte der Überholvorgänge . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>81</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>98</b>
	<b>Anhang A Python-Code zur Detektion von Überholvorgängen</b>	<b>99</b>

# Tabellenverzeichnis

4.1	Confusion Matrix zur Nutzbarkeit und Detektion von Überholvorgängen durch die manuelle Annotation und algorithmische Auswertung . . . . .	49
-----	---	----

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Die Safety Pyramid nach Hydén zur Einordnung kritischer Situationen in das Verkehrsgeschehen . . . . .	15
3.1	Bildausschnitt des Videomaterials mit den vier Bildbereichen (v.o.l.n.u.r.) linker Erfassungsbereich mit Objektidentifikation, rechter Erfassungsbereich mit Objektidentifikation, linker Erfassungsbereich mit Zeitstempel, rechter Erfassungsbereich mit Zeitstempel . . . . .	28
3.2	Referenzpunkte der Objektkoordinaten exemplarisch an einem vereinfacht dargestellten Verkehrsobjekt . . . . .	30
3.3	Verkehrsaufkommen als Anzahl der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Zufußgehende, Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder und in Summe pro Zeitabschnitt . . . . .	32
3.4	Verkehrsaufkommen als Anzahl der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Zufußgehende, Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder und in Summe im gesamten Messzeitraum . . . . .	33
3.5	Verkehrsaufkommen nach Objektklasse, Zeitabschnitt und Fahrtrichtung Nord-Süd und Süd-Nord . . . . .	33
3.6	Geschwindigkeitsverteilung im linken Erfassungsbereich als Anzahl der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder pro Geschwindigkeitsbereich je Zeitabschnitt und Fahrtrichtung . . . . .	34
3.7	Geschwindigkeitsverteilung im rechten Erfassungsbereich als Anzahl der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder als Histogramm nach Anzahl pro Geschwindigkeitsbereich je Zeitabschnitt und Fahrtrichtung . . . . .	35
3.8	Durchschnittsgeschwindigkeiten der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder je Zeitabschnitt und Erfassungsbereich . . . . .	36
3.9	Durchschnittsgeschwindigkeiten der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder je Zeitabschnitt, Erfassungsbereich und Fahrtrichtung . . . . .	36

3.10	Beispiel für eine unterbrochene Objekterfassung in vier aufeinanderfolgenden Bildausschnitten des Videomaterials mit Objektdetektion im rechten Erfassungsbereich über einen ca. zehnssekündigen Zeitraum . . . . .	38
3.11	Prinzipiskizze im Zeit-Weg-Diagramm mit der Zeit $t$ in Sekunden und dem Weg $s$ in Abhängigkeit von $t$ in Metern zur Verdeutlichung des zeitlichen und räumlichen Ablaufs eines Überholvorgangs . . . . .	40
3.12	Beispiel für Erfassungsbereiche zur Detektion von Überholvorgängen im linken Erfassungsbereich vor dem Kreuzungsbereich Adalbertstraße/Oranienstraße, erzeugt mit dem Tool <i>Draw Polygon</i> auf <a href="http://geojson.io">geojson.io</a> . . . . .	41
3.13	Flussdiagramm zur Veranschaulichung der Funktionsweise des Algorithmus zur Detektion von Überholvorgängen . . . . .	42
4.1	Beispiel für einen Überholvorgang mit nutzbaren Trajektoriendaten der Objekte 5103 (überholend) und 5110 (überholt) auf der linken Kameraseite, aufgetragen als Nord-Süd-Komponente der UTM-Koordinate über dem Zeitstempel . . . . .	44
4.2	Beispiel für einen Überholvorgang mit einer abbrechenden Trajektorie der Objekte 11261 und 11249 auf der rechten Kameraseite, aufgetragen als Nord-Süd-Komponente der UTM-Koordinaten über dem Zeitstempel . . . . .	45
4.3	Aus den IDs 11286 und 11249 zusammengesetzte Trajektorie des überholten Objekts, aufgetragen als Nord-Süd-Komponente der UTM-Koordinaten über dem Zeitstempel . . . . .	46
4.4	Überholvorgang des Objekts 11261 mit der zusammengeführten Trajektorie des Objekts 11249, aufgetragen als Nord-Süd-Komponente der UTM-Koordinaten über dem Zeitstempel . . . . .	46
4.5	Überholvorgang des Objekts 11261 mit der zusammengeführten und interpolierten Trajektorie des Objekts 11249, aufgetragen als Nord-Süd-Komponente der UTM-Koordinaten über dem Zeitstempel . . . . .	47
4.6	Flussdiagramm über den Verlauf der Vorverarbeitung der Überholvorgänge mit der jeweiligen Gesamtsumme und Verteilung auf Vorgänge zwischen VRU und Vorgänge mit MRU-Beteiligung . . . . .	51
4.7	Beispielhafte Anfahrtsituation bei Beginn einer Grünphase für die in Nord-Süd-Richtung fahrenden Verkehrsteilnehmenden am nördlichen Kreuzungsarm mit rot umrahmten VRU und grün umrahmten parkenden Pkw. Eigener Bildschirmausschnitt und eigene Darstellung . . . . .	53
4.8	Verteilung der MTTC als Anzahl der pro Intervall vorliegenden Interaktions-MTTC	54

4.9	Beispiel für den zeitlichen Ablauf einer Interaktion mit Vorliegen eines Kollisionskurses während des Überholvorgangs durch das zeitgleiche Umfahren eines Hindernisses durch beide rot umrahmten Interaktionspartner . . . . .	56
4.10	Beispiel für den zeitlichen Ablauf einer Interaktion mit Vorliegen eines Kollisionskurses der rot umrahmten Interaktionspartner durch die zur Fahrbahnmitte ausgerichtete Bewegung des Fahrrads . . . . .	57
4.11	Beispiel für den zeitlichen Ablauf einer Interaktion mit Vorliegen eines Kollisionskurses der rot umrahmten Interaktionspartner durch Einbiegen eines Fahrrads aus dem westlichen Kreuzungsarm . . . . .	57
4.12	Verteilung der seitlichen Überholabstände als Anzahl der pro Intervall vorliegenden Abstände bei Interaktionen zwischen VRU . . . . .	59
4.13	Beispiel für den zeitlichen Ablauf eines Überholvorgangs der rot umrahmten Interaktionspartner, der durch dritte Verkehrsteilnehmende (gelb und grün umrahmt) beeinflusst wird . . . . .	61
4.14	Beispiel für den zeitlichen Ablauf eines kritischen Überholvorgangs mit geringem lateralen Abstand der rot umrahmten Interaktionspartner durch das Umfahren eines Hindernisses . . . . .	62
4.15	Beispiel für den zeitlichen Ablauf eines atypischen und kritischen Überholvorgangs der rot umrahmten Interaktionspartner durch linkes Überholen und das Umfahren eines Hindernisses . . . . .	62
4.16	Verteilung der seitlichen Überholabstände als Anzahl der pro Intervall vorliegenden Abstände bei Interaktionen zwischen MRU und VRU . . . . .	64
4.17	Drei Beispiele für kritischen Überholvorgänge der rot umrahmten Interaktionspartner im linken Erfassungsbereich aufgrund der Einhaltung eines geringen lateralen Abstands durch die überholenden Pkw . . . . .	65
4.18	Zwei Beispiele für kritischen Überholvorgänge der rot umrahmten Interaktionspartner im rechten Erfassungsbereich aufgrund der Einhaltung eines geringen lateralen Abstands durch die überholenden Pkw . . . . .	66
4.19	Koordinaten der im linken Erfassungsbereich stattfindenden Überholvorgänge zwischen VRU mit Gruppierung überlagernder Koordinaten durch farblich abgesetzte Hexagone . . . . .	68
4.20	Koordinaten der im linken Erfassungsbereich stattfindenden Überholvorgänge unter MRU-Beteiligung mit Gruppierung überlagernder Koordinaten durch farblich abgesetzte Hexagone . . . . .	69
4.21	Koordinaten der im rechten Erfassungsbereich stattfindenden Überholvorgänge zwischen VRU mit Gruppierung überlagernder Koordinaten durch farblich abgesetzte Hexagone . . . . .	70

4.22 Koordinaten der im rechten Erfassungsbereich stattfindenden Überholvorgänge unter MRU-Beteiligung mit Gruppierung überlagernder Koordinaten durch farblich abgesetzte Hexagone . . . . . 71

# KAPITEL 1

## EINLEITUNG

### 1.1. Problemstellung und Motivation

Die Klimakrise bildet im Jahr 2023 ein bestimmendes Thema in der medialen Berichterstattung und gilt als eine gesamtgesellschaftlich relevante ökologische, politische und ökonomische Entwicklung [1]. Zahlreiche Trends und Maßnahmen in diesen Bereichen leiten sich aus den Bestreben zum Aufhalten des Klimawandels beziehungsweise der Abmilderung seiner Folgen ab. Dabei bezeichnet der Klimawandel im Allgemeinen die hauptsächlich durch den Menschen verursachte Erwärmung der erdoberflächennahen Luftschichten und Ozeane seit ungefähr der Mitte des 20. Jahrhunderts. Als Hauptverursacher des Klimawandels gilt der seit der Industrialisierung gestiegene Ausstoß sogenannter Treibhausgase, zu denen in diesem Kontext maßgeblich Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) zählt. [2] [3] Unter der Klimakrise werden ergänzend die weltweiten gesellschaftlichen Auswirkungen und Konsequenzen des Klimawandels verstanden, die es zu verhindern gilt, beispielsweise die Zerstörung von Lebensräumen oder die Gefährdung von Menschenleben durch Extremwetterereignisse [4].

Eine zentrale Rolle spielt in diesem Zusammenhang der Verkehrssektor. Dieser war im Jahr 2019 bedingt durch seine Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen in Deutschland verantwortlich für den Ausstoß von 164,8 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, was einem Anteil von 20,7 Prozent der landesweiten Gesamtemissionen entspricht. Damit stellt der Verkehrs- nach dem Energiesektor den zweitgrößten Verursacher der jährlichen Treibhausgasemissionen in Deutschland dar. [5] Zwar sind die spezifischen Emissionen pro zurückgelegtem Kilometer seit 1995 deutlich gesunken. So hat sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß gegenüber dieses Vergleichsjahres um 11,9 Prozent reduziert. Dies ist vor allem auf politische Maßnahmen wie die Verschärfung von Abgasvorschriften oder Qualitätsvorgaben für eingesetzte Treibstoffe zurückzuführen. Dennoch haben sich die gesam-

ten CO<sub>2</sub>-Emissionen des motorisierten Individualverkehrs (MIV), zu dem Personenkraftwagen (Pkw) und Personenkraftträder zählen, seit 1995 erhöht. Diese Erhöhung geht vor allem auf die Zunahme der Fahrleistung zurück, die in diesem Zeitraum um 28,6 Prozent gestiegen ist. [6] [7]

Ein angestrebter politischer und gesellschaftlicher Trend zur Reduzierung dieser Emissionen und damit einer klimafreundlicheren Ausrichtung des Verkehrssektors ist die sogenannte Verkehrs- oder Mobilitätswende, die eine grundlegende Neuausrichtung des öffentlichen Verkehrs, vor allem in Hinblick auf ökologische Zielsetzungen, fordert [8]. Hierbei lassen sich im Bereich des Personenverkehrs unter anderem zwei Handlungsfelder aufzeigen: Zum einen soll durch den Ausbau der Elektromobilität der Umstieg von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, die auf fossile Brennstoffe angewiesen sind, auf umweltverträglichere Varianten wie elektrisch betriebene Fahrzeuge erfolgen. Die Förderung der E-Mobilität ist beispielsweise im Klimaschutzprogramm 2023 der Bundesregierung festgelegt. [9] Zum anderen wird die Umverteilung des Modal Splits vom MIV auf emissionsärmere beziehungsweise -lose Verkehrsmittel angestrebt. Dazu zählen neben dem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) das Zufußgehen, der Radverkehr sowie die zunehmende Nutzung von Elektrokleinstfahrzeugen wie E-Scooter. [7] [10]

Letztere angestrebte Entwicklung wird vor allem im städtischen (urbanen) Verkehrsgeschehen langfristig für die geplante Zunahme von sogenannten vulnerablen Verkehrsteilnehmenden (vulnerable road users, VRU) sorgen, zu denen Zufußgehende, Fahrradfahrende und die Nutzenden von E-Scootern zählen [11] [12]. Diese zeichnen sich durch ihren mangelnden Schutz im Falle eines Unfalls aus, wie ihn beispielsweise die Fahrgastzelle eines Pkw bietet. Daher sind sie im Verkehrsgeschehen einem besonders hohen Risiko von Verletzungen ausgesetzt. [13] Nach Schätzungen des Umweltbundesamtes ließen sich bis zu 30 Prozent der Fahrten, die im urbanen Raum im MIV gefahren werden, mit dem Fahrrad zurücklegen [11]. Zeitgleich nimmt seit der Einführung im Jahr 2019 die Zahl der Nutzenden von E-Scootern stetig zu [14].

Eine weitere relevante Entwicklung im Mobilitätsbereich stellt das sogenannte autonome Fahren dar, das generell die Nutzung von Fahrzeugen beschreibt, in denen die Mitfahrenden nicht für die Führung des Fahrzeugs verantwortlich sind, sondern dieses alle Fahrfunktionen vollumfänglich selbst ausführt [15]. Zu diesen Fahrfunktionen zählen neben beispielsweise Fahrstreifenwechseln, dem Einordnen in den fließenden Verkehr und Folgefahrten auch Überholvorgänge, die als eine besonders komplexe und herausfordernde Situation im Verkehrsgeschehen gelten [16].

Ein maßgebliches Ziel der Entwicklung von autonomen Fahrzeugen ist die Reduzierung von Unfällen und allgemeine Erhöhung der Verkehrssicherheit durch die Eliminierung menschlicher Fehler und einer menschlichen Fahrenden gegenüber verbesserten Entscheidungsfindung [17].

Die ausschließliche Überprüfung dieser autonomen Fahrsysteme im realen Verkehrsgeschehen durch Testfahrten auszuführen ist aufgrund der Vielzahl der möglicherweise auftretenden Verkehrssituationen nicht möglich. Stattdessen werden die Fahrfunktionen zusätzlich anhand realitätsnaher Verkehrsmodellierungen validiert, die wiederum auf Analysen von im realen Verkehr erhobenen Bewegungsdaten basieren. Diese lassen Rückschlüsse auf mögliche und wahrscheinliche Verhaltensweisen aller am Verkehrsgeschehen beteiligten Verkehrsobjekte zu. [15] [18]

Durch die zunehmende Anzahl von VRU im Verkehrsgeschehen, insbesondere im urbanen Raum, und deren generell hohe Gefährdung im Straßenverkehr stellt die Analyse von Interaktionen dieser Verkehrsteilnehmenden eine relevante Basis für derartige Verkehrsmodellierungen dar. Überholvorgänge als besonders komplexe Verkehrssituation werden daher im Rahmen dieser Arbeit anhand von realen im urbanen Raum erhobenen Verkehrsdaten auf relevante Parameter und ihre Kritikalität untersucht.

## 1.2. Aufbau der Arbeit

Nach der Einführung in den thematischen Kontext dieser Arbeit über die begründete Zunahme von VRU im Straßenverkehr sowie deren Relevanz für die Verkehrsmodellierung folgt eine Kurzzvorstellung des Instituts für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR).

Im Anschluss werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen für den thematischen Kontext dieser Arbeit zusammengetragen. Hierzu zählt als erstes die Verkehrsentwicklung, die die sogenannte Vision Zero und weitere Ausführungen zur Mobilitätswende beinhaltet. Die rechtlichen Grundlagen umfassen straßenverkehrsrechtliche Vorschriften, wie die Straßenverkehrs-Ordnung und die Verordnung über die Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr, eine Zusammenfassung der aktuellen Rechtsprechung bezüglich Unfällen bei Überholvorgängen zwischen Radfahrenden sowie eine Unterscheidung der in Deutschland vorhandenen Radverkehrsanlagen.

Im nächsten Schritt folgt eine Einführung in die Verkehrsdatenanalyse mit einer kurzen Historie und Grundlagen der Datenerhebung und die Relevanz der Modellierung von Verkehrsdaten für die Entwicklung autonomer Fahrfunktionen. Weiterhin werden Surrogate Measures of Safety als Maß für die Kritikalität von Verkehrssituationen beschrieben und anhand einiger Beispiele erläutert.

Den letzten Abschnitt der theoretischen Grundlagen bildet der Stand der Forschung, der Überholvorgänge zwischen Kraftfahrzeugen, zwischen Kraftfahrzeugen und vulnerablen Verkehrsteilnehmenden und zwischen vulnerablen Verkehrsteilnehmenden unterscheidet. Außerdem werden Überholvorgänge in das statistische Unfallgeschehen eingeordnet.

Im Kapitel 3 wird zunächst die Messkampagne zur Erhebung der Daten beschrieben, auf denen die Analysen dieser Arbeit basieren. Dies umfasst den Projekthintergrund, den Messort und potentielle Einschränkungen. Im Anschluss folgt eine Untersuchung der Datenbasis hinsichtlich deren Erzeugung, Relevanz und Güte. Außerdem sind grundlegende Auswertungen der Daten hinsichtlich des Verkehrsaufkommens und der gefahrenen Geschwindigkeiten im Messbereich enthalten. Zuletzt wird die Methodik der Auswertung, insbesondere die algorithmische Detektion der Überholvorgänge, erläutert.

Es folgen in Kapitel 4 die Ergebnisse der Analysen, die zunächst den Ablauf der Vorverarbeitung der Überholvorgänge und deren algorithmische Auswertung beinhaltet. Im nächsten Schritt werden die Parameter Time-to-collision und seitlicher Abstand der Überholvorgänge sowie deren räumliche Verteilung analysiert.

Zuletzt erfolgt in Kapitel 5, vor dem abschließenden Fazit (Kapitel 6), in der Diskussion eine kritische Würdigung der erzielten Ergebnisse und deren Einordnung in den theoretischen Kontext, sowie Empfehlungen für die weiterführende Forschung.

### **1.3. Kurzvorstellung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V.**

Die vorliegende Arbeit ist in Zusammenarbeit mit der Gruppe Informationsgewinnung und Modellierung am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) verfasst worden. Das DLR betreibt seit der Gründung 1970 mit aktuell ca. 10 000 Mitarbeitenden Forschung und Entwicklung in der Luft- und Raumfahrt als Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland. Neben der Luft- und Raumfahrt zählen Energie und Verkehr, Sicherheit und Digitalisierung zu den Forschungsbereichen. [19] [20]

Die Hauptaufgabe des Instituts für Verkehrssystemtechnik an den Standorten Braunschweig und Berlin ist die Gestaltung der sicheren und effizienten Mobilität von Menschen und Gütern. Hierzu gehört unter anderem der Betrieb von Großforschungsanlagen wie Simulationslaboren sowie die Entwicklung von anwendungsorientierten Systemen zur Assistenz und Automation. Zu den

Großforschungsanlagen zählt die Anwendungsplattform Intelligente Mobilität, welche alle Bereiche der Verkehrsforschung durch Testfelder, Simulationen und Fahrzeuge abbilden kann. Ein wichtiger Teil davon ist die Forschungskreuzung am Braunschweiger Innenstadtring, deren Daten beispielsweise zur Entwicklung von Algorithmen und Assistenzsystemen für autonomes Fahren verwendet werden. [21] [22]

Die Organisationseinheit Informationsgewinnung und Modellierung ist innerhalb des Instituts für die Verarbeitung und Analyse von zeitlichen und räumlichen Verkehrsdaten, die der Identifikation und Prognose verkehrlicher Situationen und Systemzustände dienen, zuständig [23].



# KAPITEL 2

## THEORETISCHE GRUNDLAGEN

### 2.1. Verkehrsentwicklung

#### 2.1.1. Vision Zero

Die sogenannte Vision Zero bezeichnet eine Sicherheitsstrategie, die unter anderem vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) [24], dem Deutschen Verkehrssicherheitsrat e.V. (DVR) [25] und der Kommission der Europäischen Union (EU) [26] verfolgt wird. Ihr vorangestelltes Ziel ist die Vermeidung von tödlichen Unfällen sowie Unfällen mit schweren Verletzungsfolgen im Straßenverkehr [25]. Die Vision Zero ist ebenfalls in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO), die die Umsetzung der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO, s. Kapitel 2.2.1) durch die Straßenverkehrsbehörden regelt, als oberstes Ziel und Grundlage aller verkehrlichen Maßnahmen festgeschrieben [27].

Der DVR fordert zur Erreichung der Vision Zero eine konsequente Ausrichtung verkehrlicher Regelwerke und politischer Maßnahmen auf die Priorisierung der Verkehrssicherheit [25]. Das BMDV, das Mitglied im DVR ist, strebt ausgehend vom Referenzjahr 2021 eine Verringerung der Verkehrstoten um 40 Prozent bis 2030 an [28]. Um dieses Ziel zu erreichen sollen verschiedene Maßnahmen umgesetzt werden, die im *Verkehrssicherheitsprogramm der Bundesregierung 2021 bis 2030* festgeschrieben sind. Unter anderem soll die Weiterentwicklung des automatisierten, autonomen und vernetzten Fahrens vorangetrieben werden. Da mehr als 90 Prozent aller Unfälle im Straßenverkehr durch menschliches Versagen, beispielsweise in Form von Fahrfehlern, verursacht werden, stellen diese Entwicklungen in Kombination mit der zunehmenden Verbreitung von Fahrassistenzsystemen ein wichtiges Potential zur Reduzierung von Verkehrsunfällen dar. [29] Eine weitere Maßnahme ist die Verbesserung der Sicherheit für Radfahrende durch entsprechen-

de Anpassungen und den Ausbau der spezifischen Infrastruktur im Rahmen der Radverkehrsoffensive. Die Radverkehrsoffensive bezeichnet ein Maßnahmenpaket des BMDV, das den Ausbau des Radverkehrs in Deutschland fördern soll, zum Beispiel durch die Schaffung eines sicheren Radwegenetzes. [30]

Die EU-Kommission hat sich darüber hinaus die vollständige Vermeidung aller Verkehrstoten in allen EU-Mitgliedsstaaten bis zum Jahr 2050 zum Ziel gesetzt [31]. Hierzu werden in den Mitgliedsstaaten Maßnahmen zur erhöhten Sicherheit der Infrastruktur und der verwendeten Verkehrsmittel vorangetrieben [32]. Dazu zählen beispielsweise die Herausgabe von Richtlinien zum sicheren Infrastrukturausbau sowie Regularien mit verbindlichen Vorgaben für zu implementierende Fahrassistenzsysteme neuzugelassener Fahrzeuge [33] [34]. Außerdem soll die Straßennutzung beispielsweise für VRU durch EU-weite Initiativen sicherer gestaltet und die unmittelbare Versorgung von Unfallopfern, zum Beispiel durch die Vorschrift automatischer Notrufsysteme in neuzugelassenen Pkw, verbessert werden [35] [36].

### **2.1.2. Mobilitätswende**

Die Verkehrswende bezeichnet in Deutschland die systematische Ausrichtung des Verkehrssystems auf umweltfreundliche Mobilitätslösungen [8]. Im Hinblick auf die Mobilität, die die Möglichkeiten der Gesellschaft zur Überbrückung räumlicher Distanzen angibt [37], beinhaltet die Verkehrswende Maßnahmen wie die Reduktion des MIV zugunsten des ÖPNV, Fuß- und Radverkehrs. Diese stellen nachhaltige individuelle Mobilitätslösungen dar, die im besonderen Maße ausgebaut werden sollen. Unterstützt wird die Verkehrs- von der Antriebswende, innerhalb derer die Nutzung fossiler Brennstoffe zum Antrieb motorisierter Verkehrsmittel durch klimaneutrale Energieträger, zum Beispiel die Elektromobilität, ersetzt werden soll. Beide Faktoren zielen auf die Reduktion beziehungsweise vollständige Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch verkehrliche Aktivitäten ab. [8]

Die Verkehrswende ist Teil des *Klimaschutzplans 2050* der Bundesregierung. Hier sind zum einen die Dekarbonisierung des Verkehrssystems und die Weiterentwicklung elektrifizierter Fahrzeugantriebe bei gleichzeitiger Sicherung der gesellschaftlichen Mobilität, zum anderen die Ausrichtung der Gestaltung des Straßenraums auf den Anstieg des Fuß- und Radverkehrs festgeschrieben. [38]

Auch der *Bundesverkehrswegeplan 2030* des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) sieht die Förderung des Radverkehrs als wichtige Maßnahme einer umweltschonenden und zusätzlich gesundheitsfördernden Mobilitätsstrategie vor. Zur Förderung zählen

der Ausbau der Radinfrastruktur und Investitionen in die Verkehrssicherheit der Radfahrenden, beispielsweise durch Aufklärungsmaßnahmen. [39]

Die Strategie der Bundesregierung im Bezug auf die Förderung des Radverkehrs ist zusätzlich im *Nationalen Radverkehrsplan 3.0* des BMVI festgehalten. Laut des Radverkehrsplans beträgt die durchschnittliche Strecke, die im Jahr 2017 während einer Fahrradfahrt zurückgelegt wurde, 3,7 Kilometer. Außerdem wird herausgestellt, dass das Fahrrad für 15 Prozent der Wege in Großstädten gegenüber sieben Prozent im ländlichen Raum verwendet wurde. [40]

Dieser Punkt wird durch eine Schätzung des Umweltbundesamts aufgegriffen, die angibt, dass bis zu 30 Prozent aller Autofahrten in Ballungsgebieten auf den Radverkehr verlagert werden können. Vor allem für Autofahrten mit einer Länge unter fünf Kilometern biete sich demnach die Nutzung des Fahrrads durch seine höhere Schnelligkeit an. An dieser Stelle wird außerdem das hohe Potential der Möglichkeit zur Kombination des Radverkehrs mit dem ÖPNV angeführt. Dies beinhaltet beispielsweise an ÖPNV-Knotenpunkten angeordnete Radleihstationen. Mit diesem Konzept kann der Großteil einer üblicherweise mit dem Pkw zurückgelegten Strecke mit dem ÖPNV absolviert werden, während Kurzstrecken im urbanen Raum von der ÖPNV-Haltestelle zum Zielpunkt mit dem Fahrrad gefahren werden. Auch hier zeigt sich die besondere Eignung des Fahrrads als klimaneutrales Verkehrsmittel vor allem im innerstädtischen Verkehr. [11]

Der potentielle Anteil von Elektrokleinstfahrzeugen, insbesondere E-Scootern, an der Verkehrswende ist umstritten. Trotz ihres elektrischen Antriebs gelten sie nur dann als umweltfreundliches Verkehrsmittel, wenn durch ihre Nutzung Fahrten von Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsantrieb ersetzt werden. [41] Laut einer Erhebung der Unfallforschung der Versicherer aus dem Jahr 2021 ersetzen Fahrten mit E-Scootern nur zu etwa 5 Prozent Fahrten des MIV, aber zu fast 30 Prozent Fahrten mit dem ÖPNV und zu über 50 Prozent Fußwege [42]. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt eine Befragung des DLR und des Deutschen Instituts für Urbanistik aus demselben Jahr. Hier gaben 11 Prozent der E-Scooter-Nutzenden an, eine Fahrt mit dem eigenen Pkw substituiert zu haben. [43] Das Umweltbundesamt kommt zu dem Schluss, dass E-Scooter nur dann einen Beitrag zur Verkehrswende leisten können, wenn ein ähnliches Konzept wie im vorigen Absatz umgesetzt wird und E-Scooter zum Zurücklegen der sogenannten letzten Meile nach Nutzung des ÖPNV verwendet werden. Dies könnte zu einem höheren Anteil ersetzter MIV-Fahrten beitragen. [41]

## 2.2. Rechtliche Grundlagen

### 2.2.1. Straßenverkehrsrechtliche Vorschriften

Für den Kontext dieser Arbeit sind maßgeblich die Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) sowie die Verordnung über die Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr als straßenverkehrsrechtliche Vorschriften von Relevanz.

Die StVO ist eine Rechtsverordnung auf Bundesebene, die seit 1934 verbindliche Verhaltensregeln für alle Teilnehmenden am Straßenverkehr in Deutschland beinhaltet. Sie dient der Gewährleistung der Sicherheit aller Verkehrsteilnehmenden unter dem Leitgedanken der gegenseitigen Rücksichtnahme. [44] Die StVO ist in drei Abschnitte unterteilt: Der erste Abschnitt enthält allgemeine Verkehrsregeln, beispielsweise bezogen auf Geschwindigkeitsbegrenzungen, Vorfahrtsregelungen und Pflichten von Fahrzeugführenden. Im zweiten Abschnitt sind Zeichen und Verkehrseinrichtungen erfasst, zu denen unter anderem Lichtsignalanlagen und Verkehrsschilder zählen. Der dritte Abschnitt legt die Durchführungs-, Bußgeld- und Schlussvorschriften fest. [45] Die Umsetzung der StVO ist, wie in Abschnitt 2.1.1 bereits erwähnt, in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO) geregelt [27].

Die Verordnung über die Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr (eKFV) bildet die Grundlage für die Verwendung von Elektrokleinstfahrzeugen (EKF) auf öffentlichen Straßen in Deutschland [10]. Als EKF werden in § 1 elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge definiert, deren Höchstgeschwindigkeit zwischen 6 und 20 Kilometern pro Stunde liegt und die bestimmte Merkmale hinsichtlich ihrer Leistung, Abmessungen und Masse erfüllen. Unter § 10 der eKFV ist für EKF, zu denen als am weitesten verbreiteter Vertreter der E-Scooter zählt, die Nutzung vorhandener Radinfrastruktur vorgeschrieben. Dazu zählen unter anderem baulich angelegte Radwege und Radfahrstreifen auf Fahrbahnen. Ist auf einer öffentlichen Straße keine separate Radinfrastruktur vorhanden dürfen EKF die Fahrbahn nutzen. [10] [46] Dies gilt im Unterschied zu Fahrrädern, denen durch die StVO in § 2 die Wahl zwischen der Radinfrastruktur und der Fahrbahn freigestellt ist, sofern die Nutzung der Radinfrastruktur nicht verpflichtend durch entsprechende Verkehrszeichen gekennzeichnet ist [47] (vgl. Abschnitt 2.2.3). Wenn EKF vorhandene Radverkehrsflächen nutzen sind sie nach § 11 Absatz (4) der eKFV verpflichtet schnelleren Radfahrenden das Überholen zu ermöglichen [46].

Die StVO enthält in ihrem ersten Abschnitt unter § 5 Regelungen für Überholvorgänge. Im Kontext dieser Arbeit sind insbesondere folgende Absätze relevant: Zunächst ist in Absatz (1) die Pflicht zum Überholen auf der linken Seite festgeschrieben. Außerdem gilt, dass der überho-

lende Verkehrsteilnehmende eine wesentlich höhere Geschwindigkeit aufweisen muss als der zu überholende, wobei dies nicht über konkrete Zahlenwerte präzisiert ist. Absätze (2) und (4) besagen, dass ein Überholvorgang nur ausgeführt werden darf, wenn dadurch keine Beeinträchtigung des Gegenverkehrs, respektive des Folgeverkehrs und des überholten Verkehrsteilnehmenden entsteht. Außerdem legt Absatz (4) fest, dass zu letzterem ein ausreichender Sicherheitsabstand eingehalten werden muss. Für das Überholen anderer Kraftfahrzeuge ist kein konkreter Wert vorgegeben. Handelt es sich um einen Überholvorgang eines VRU (Zufußgehende, Radfahrende, Nutzende von EKF) durch ein Kraftfahrzeug muss dieser Abstand innerorts 1,5 Meter (außerorts: zwei Meter) betragen. Dieser Abstand muss jedoch nicht eingehalten werden, wenn sich ein VRU während des Anhaltens an beispielsweise einer Lichtsignalanlage rechts neben dem Kraftfahrzeug einordnet. Diese Form des Einordnens ist nach § 5 Absatz (8) allerdings nur Rad- und Mofafahrenden gestattet, EKF sind von dieser Regelung daher ausgenommen. [47]

### 2.2.2. Aktuelle Rechtsprechung

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Abstandsregelungen für Überholvorgänge der StVO gelten nur, wenn es sich bei dem überholenden Verkehrsteilnehmenden um ein Kraftfahrzeug handelt [47]. Wenn aber Überholvorgänge zwischen VRU stattfinden muss zur Beurteilung der Interaktionen - vor allem, wenn es hierbei zu Unfällen kommt - auf die aktuelle Rechtsprechung verwiesen werden.

Im Jahr 2017 urteilte das Oberlandesgericht Hamm über einen solchen Unfall, dass der in § 5 der StVO festgeschriebene Abstand auch für überholende Radfahrende maßgeblich sei. Allerdings gilt nicht die festgelegte Höhe von 1,5 Metern, sondern der Ausschluss der Gefährdung des überholten Verkehrsteilnehmenden, auf dem der Paragraph beruht. Radfahrende können mit einem geringeren Abstand als Kraftfahrzeugführende überholen, da sie in der Regel mit geringerer Geschwindigkeit fahren. Der im konkreten Fall vorliegende Abstand von 32 Zentimetern zwischen den Körpern der Radfahrenden wurde allerdings als deutlich zu gering bewertet. Begründet wurde dieses Urteil zum einen mit möglichen Schwankungen des überholten Verkehrsteilnehmenden. Dies gilt insbesondere beim Befahren von Wegen mit unebener Beschaffenheit, beispielsweise wie im beurteilten Fall auf Schotter. Zum anderen gilt der Umstand, dass ein überholendes Fahrrad im Gegensatz zu einem Kraftfahrzeug aufgrund der geringeren verursachten Geräusche möglicherweise nicht frühzeitig wahrgenommen wird. [48]

Auch ein Urteil des Kammergerichts Berlin aus dem Jahr 2018 verweist in seinem Urteil zu einem Überholmanöver zwischen zwei Radfahrenden auf das Gebot der gegenseitigen Rücksichtnahme. Es wurde ebenfalls der § 5 der StVO vorgebracht, nach dem auch Radfahrende beim Überholen

einen Seitenabstand einhalten müssen, der die Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmenden ausschließt. Im vorliegenden Fall ist ein Überholabstand von einem Meter zwischen den Körpern der Radfahrenden als ausreichend eingestuft worden. [49] [50]

Ein ähnliches Urteil über einen Unfall durch ein Überholmanöver stammt aus dem Jahr 2021. Hier urteilte das Oberlandesgericht Oldenburg, dass für Überholvorgänge zwischen Radfahrenden innerorts nicht der gleiche Sicherheitsabstand wie für Kraftfahrzeuge (1,5 Meter) gelten muss, da dies Überholmanöver aufgrund der häufig geringeren Breite der vorhandenen Infrastruktur für einen großen Teil des Stadtgebietes ausschließen würde. Über den Sicherheitsabstand müsse, wie in den zuvor beschriebenen Urteilen, im Einzelfall entschieden werden. Auch in diesem Urteil wurde der Ausschluss von Gefährdung beider Beteiligten als maßgeblich angesehen. Verwiesen wird dabei auf das Gebot der gegenseitigen Rücksichtnahme in § 1 der StVO. [51] [52]

Zusammengefasst gilt, dass für Überholvorgänge zwischen Radfahrenden in der StVO kein konkreter einzuhaltender Abstand vorgegeben ist. Überholende Radfahrende müssen nach gelternder Rechtsprechung nicht den gleichen Abstand einhalten wie überholende Kraftfahrzeuge, dürfen aber nach eigener Einschätzung andere Verkehrsteilnehmende, insbesondere den zu Überholenden, durch den Überholvorgang nicht in Gefahr bringen.

### **2.2.3. Radverkehrsanlagen**

In Deutschland gibt es verschiedene Arten von Radverkehrsanlagen, die sich vor allem durch die Art der Trennung von der Fahrbahn des motorisierten Verkehrs und hinsichtlich der Benutzungspflicht durch Radfahrende unterscheiden. Nach § 1 der StVO fahren Radfahrende, wenn es nicht durch entsprechende Verkehrszeichen (beispielsweise die Kennzeichnung einer Autobahn) untersagt wird, auf der Fahrbahn. Eine Pflicht zum Benutzen eines vorhandenen Radwegs besteht nach § 2 Absatz (4) ebenfalls nur, wenn dies durch die entsprechenden Verkehrszeichen 237, 240 oder 241 angeordnet wird. [47] Ein Radweg bezeichnet hierbei einen baulich von der Fahrbahn getrennten Bereich für Radfahrende; eine Benutzungspflicht darf hierfür laut der VwV-StVO zu § 2 Absatz (4) nur angeordnet werden, wenn es die Verkehrssicherheit erfordert. Ist dies der Fall muss der Radweg eine Mindestbreite von 1,50 Meter aufweisen. [27]

Eine andere Variante stellen Radfahrstreifen dar, die einen Sonderweg für Radfahrende auf der Fahrbahn des motorisierten Verkehrs bezeichnen. Sie sind von der Fahrbahn durch eine durchgezogene Linie getrennt und gelten deshalb nicht als Bestandteil der Fahrbahn für den motorisierten Verkehr, weshalb dieser ihn in der Regel nicht befahren darf. Radfahrstreifen sind immer benutzungspflichtig und es gilt ebenfalls die Mindestbreite von 1,50 Meter. [27] Geschützte Radfahr-

streifen bilden einen Sonderfall des Radfahrstreifens, der nicht aus der StVO oder VwV-StVO hervorgeht. Hierbei wird der Radfahrstreifen für einen zusätzlichen Schutz des Radverkehrs vor dem motorisierten Verkehr durch physische Barrieren von der Fahrbahn separiert. [53] Sie verhindern insbesondere die illegale Nutzung des Radfahrstreifens durch den motorisierten Verkehr [54].

Schutzstreifen sind im Gegensatz zu Radfahrstreifen durch eine gestrichelte Markierung von der Fahrbahn getrennt und kommen zum Tragen, wenn keine Möglichkeit zum Anlegen eines Radfahrstreifens besteht. In der VwV-StVO ist für sie keine Mindestbreite festgelegt, sondern lediglich der Hinweis auf eine hinreichende Breite für einen sicheren Bewegungsraum des Radverkehrs. Gleichzeitig muss für die Breite der verbleibenden Fahrbahn gelten, dass zwei entgegengerichtete Pkw einander gefahrlos passieren können. Schutzstreifen dürfen vom motorisierten Verkehr in Ausnahmefällen, beispielsweise zum Ausweichen, genutzt werden. Eine Benutzungspflicht für Radfahrende besteht nicht. [27]

## 2.3. Verkehrsdatenanalyse

### 2.3.1. Datenerhebung

Die Erhebung und Analyse von Verkehrsdaten wird bereits seit der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts durchgeführt. Eine frühe Studie zur Untersuchung der Verkehrskapazität eines Straßenabschnitts aus dem Jahr 1935 fand anhand einer Geschwindigkeitsanalyse der Verkehrsteilnehmenden statt. Die Datenerhebung erfolgte mithilfe einer Filmkamera, über deren Bildrate die Geschwindigkeiten der erfassten Fahrzeuge berechnet werden konnte. [55] Mit der Weiterentwicklung der technologischen Möglichkeiten zur Verkehrsmessung konnten zunehmend genauere Verkehrsdaten erhoben werden. So ermöglichen beispielsweise seit den 1960er-Jahren die Einführungen von Radarsystemen und Induktionsschleifen weitaus genauere Methoden zur Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit. Durch die Nutzung von Induktionsschleifen können zusätzlich Parameter wie Durchflussraten und die Belegungsdauer eines Straßenabschnitts durch ein Fahrzeug erhoben werden. [56] Solche Erhebungen sind vor allem relevant für die Messung von Verkehrsströmen, die maßgeblich für die kapazitative Auslegung und Organisation eines Verkehrssystems sind, beispielsweise hinsichtlich der Gestaltung von Knotenpunkten und deren Verkehrsbeeinflussung [57].

Da es sich hierbei nur um punktuelle Messungen handelt, können mit diesen Methoden allerdings keine Trajektoriendaten erhoben werden. Eine Trajektorie beschreibt den räumlichen und zeitlichen Verlauf der Bewegung eines einzelnen Verkehrsobjekt, indem seine Position im Zeitablauf verfolgt und erfasst wird [58]. Die Erfassung von Trajektoriendaten erlaubt im Gegensatz zu

punktuellen Bewegungs- und Verkehrsflussparametern, die hauptsächlich der Gestaltung des Verkehrssystems im Raum des Messbereichs dienen, die Analyse des Verhaltens von Verkehrsteilnehmenden und der Interaktionen zwischen ihnen. Darauf basierend können realitätsnahe Modelle und Simulationen von Verkehrssystemen erzeugt werden. [56] [59]

Trajektorien können prinzipiell auf zwei verschiedene Arten erhoben werden. Zum einen besteht die Möglichkeit, Verkehrsteilnehmende mit entsprechenden Messsensoren auszustatten, die ihre Bewegungen aufzeichnen. Die Verkehrsteilnehmenden, bei denen es sich in der Regel um Pkw handelt, werden als Floating Cars bezeichnet. Zum anderen kann die Trajektorienfassung über fahrzeugexterne Messungen erfolgen. [58]

Erstere Methode wird hauptsächlich durch den Einsatz von Global Positioning Systemen (GPS) seit ungefähr dem Jahr 2000 ermöglicht. Hierbei können allerdings nur die Trajektorien des Messfahrzeugs erhoben werden, die keine repräsentativen Aussagen über andere Verkehrsobjekte im Messabschnitt ermöglichen. [60] Diese können lediglich über Abstandssensoren zum Messfahrzeug in die Datenerfassung miteinbezogen werden. Einerseits sorgt diese Art der Erfassung für eine hohe Genauigkeit der gemessenen Trajektorien, da sich die Sensoren direkt am zu erfassenden Verkehrsobjekt befinden. [61] Andererseits ist aufgrund der Erfassung lediglich eines Verkehrsobjektes eine hohe Anzahl von Messfahrzeugen und -fahrten notwendig, um valide Aussagen über die Interaktionen und Verhaltensweisen der an zu erfassenden Situationen und Manövern beteiligten Verkehrsteilnehmenden zu treffen [62].

Die Erfassung von Trajektorien über externe Messungen erfolgt im Gegensatz dazu nicht über Daten, die vom Verkehrsobjekt selbst erhoben werden, sondern über die Auswertung von Bildmaterial [63]. Dieses wird von Kameras aufgezeichnet, die sich in der Regel an einer erhöhten Position am zu analysierenden Fahrbahnabschnitt befinden und so einen festen Aufnahmebereich erfassen [56] [64]. Neuere Studien verwenden auch Drohnen zur Bildaufzeichnung [65]. Die Erfassung findet über einen definierten Zeitabschnitt statt und die Erzeugung von Trajektorien erfolgt softwarebasiert über das Tracking der Objekte im Bildmaterial [62] [66]. Der Vorteil ist hierbei, dass Trajektorien für alle im Bildbereich befindlichen Verkehrsteilnehmenden durch eine einzelne Messung generiert werden können, ohne dass separate Sensoren an den Fahrzeugen vorhanden sein müssen [56]. Nachteilig kann sich eine mangelnde Bildqualität durch Witterungsverhältnisse wie Regen oder Nebel auswirken, die sich negativ auf die Genauigkeit der erzeugten Trajektorien niederschlägt. Zusätzlich kann es zu Verzerrungen in den Daten durch den Aufnahmewinkel der Kamera oder Erfassungslücken durch das gegenseitige Verdecken von Verkehrsobjekten kommen. [63]

Die Untersuchung des Verkehrsverhaltens anhand von Trajektorien­daten gewinnt insbesondere im Hinblick auf die zunehmende Automatisierung von Fahrfunktionen im Zuge der Weiterentwicklung des autonomen Fahrens an Bedeutung. Die Verifikation und Validierung in der Entwicklung dieser Fahrfunktionen kann zum einen aus wirtschaftlicher Sicht, zum anderen aus Gründen der Gefährdung der Beteiligten nicht oder nicht ausschließlich durch Überprüfung der Funktionen im realen Verkehr durchgeführt werden. [15] [67] Stattdessen findet sie hauptsächlich softwarebasiert in einer simulierten Verkehrsumgebung statt. Da diese simulierte Umgebung zwingend ein möglichst realistisches Verkehrsverhalten abbilden muss, das auch atypische und kritische Situationen enthält, ist es unerlässlich, dass die Simulation auf realen Verkehrsdaten basiert. [68] [69]

Besonders relevant sind in diesem Zuge Unfallsituationen, die sich durch eine hohe Kritikalität für die beteiligten Verkehrsobjekte auszeichnen sowie besondere und spezifische Anforderungen an die Reaktion autonomer Systeme stellen [17]. Allerdings treten diese auch in umfangreichen Trajektorien­datensätzen, die als Basis für die Simulation dieser kritischen Situationen in einer Testumgebung dienen, sehr selten auf [70]. Dies wird anhand der sogenannten Safety Pyramid [71] verdeutlicht, die in der folgenden Abbildung 2.1 zu sehen ist.

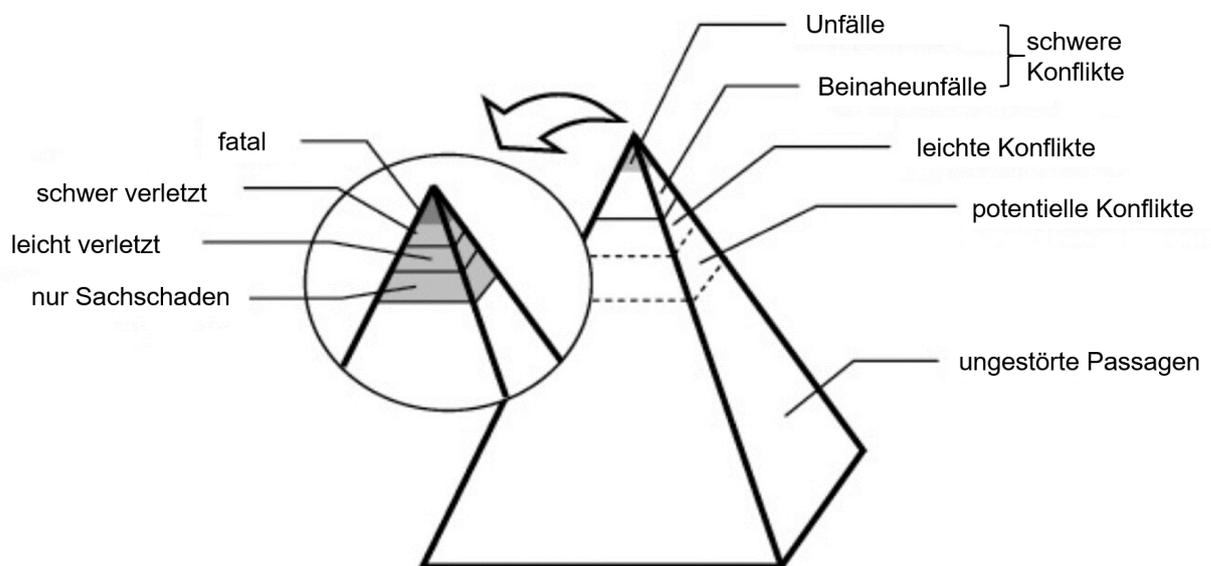


Abbildung 2.1.: Die Safety Pyramid nach Hydén zur Einordnung kritischer Situationen in das Verkehrsgeschehen. Quelle: Eigene Übersetzung in Anlehnung an [72].

Die Pyramide ordnet Verkehrssituationen nach Konsequenzen für die Beteiligten eine generelle Häufigkeit zu. Im obersten Bereich der Pyramide sind *Unfälle* eingeordnet, die den geringsten Anteil am Verkehrsgeschehen haben und sich wiederum nach Art des Schadens in *fatal*, *schwer verletzt*, *leicht verletzt* und *nur Sachschaden* unterteilen lassen. Die *Unfälle* bilden gemeinsam

mit dem darunterliegenden Bereich der *Beinaheunfälle* die *schweren Konflikte* des Verkehrsgeschehens ab. Es folgen mit steigender Häufigkeit *leichte Konflikte*, *potentielle Konflikte* und *ungestörte Passagen*. [71] Ein Konflikt bezeichnet hierbei eine Situation, in der das Risiko einer Kollision zwischen zwei Verkehrsteilnehmenden besteht, wenn sie ihre aktuelle Bewegung beibehalten [73].

Die Betrachtung der Fälle, die zwischen Unfällen und dem ungestörten Verkehr eingeordnet sind, ermöglicht eine deutliche Vergrößerung der Datenbasis zur Analyse kritischer Ereignisse. Dies basiert auf der Annahme, dass diese Konfliktsituationen mit bedeutend größerer Häufigkeit im Verkehrsgeschehen auftreten und dabei in ihrer Entstehung konkreten Unfallsituationen sehr ähnlich sind. [74] Sie unterscheiden sich lediglich hinsichtlich des Erfolgs der Konfliktlösung von den tatsächlichen Unfällen [70]. Auf diesen Zusammenhängen basieren die sogenannten Surrogate Measures of Safety, bei denen es sich um Kritikalitätsmetriken zur Analyse von Konfliktsituationen handelt und die im Folgeabschnitt 2.3.2 erläutert werden.

### 2.3.2. Kritikalitätsmetriken

Surrogate Measures of Safety (SMoS) oder Surrogate Safety Measures (SSMs) bezeichnen Metriken in der Verkehrsforschung, die die Kritikalität von Verkehrssituationen auf quantitativer Ebene beurteilen [75]. Da sie prinzipiell auf alle Verkehrssituationen und nicht nur auf tatsächliche Unfälle angewendet werden können, erhöhen sie das Potenzial zur Identifikation und Beurteilung von riskanten Konflikten im Verkehrsgeschehen maßgeblich, ohne dabei auf eine hohe Anzahl von Unfällen als Datenbasis angewiesen zu sein [74] [76]. Die Auswertung von SMoS stellt damit ein wichtiges Instrument zur Untersuchung und damit Erhöhung der Verkehrssicherheit dar, da sie Rückschlüsse über die Entstehung und bestimmenden Faktoren von Unfallereignissen erlauben, bevor diese eintreten [77]. Sie werden bereits seit den 1960er Jahren im Rahmen der Verkehrsforschung angewendet [73].

SMoS lassen sich nach verschiedenen Kriterien unterteilen. Eine häufige Variante ist die Unterscheidung nach zeit-, orts- und beschleunigungsbasierten Metriken [75]. Außerdem lassen sich Metriken nach einer kontinuierlichen oder einmaligen Messbarkeit im Konfliktverlauf und nach Vorhandensein eines Kollisionskurs der beteiligten Verkehrsteilnehmenden differenzieren [78]. Hierfür werden im Folgenden einige Beispiele aufgeführt.

Zu den am häufigsten angewandten SMoS zählt die *Time-to-Collision* (TTC), die bereits seit den 1970er-Jahren verwendet wird. Sie bezeichnet zu einem bestimmten Zeitpunkt die verbleibende Zeitdauer bis zu einer Kollision zweier Verkehrsteilnehmender, sofern diese ihren aktuellen Kurs

beibehalten. [70] Es handelt sich folglich um eine zeitbasierte Metrik, die kontinuierlich angegeben werden kann, solange ein Kollisionskurs gegeben ist [78]. Die *Minimum Time-To-Collision* (MTTC) ist der geringste und somit kritischste der gemessenen Werte [70]. Zahlreiche weitere Metriken basieren auf einer Abwandlung der TTC. So werden beispielsweise bei der *Enhanced Time-to-Collision* (ETTC) die Beschleunigungen der Verkehrsobjekte in die Berechnung miteinbezogen [79]. Außerdem kann die TTC in eine ortsbasierte Metrik umgewandelt werden, indem beispielsweise die *Distance at minimum Time-to-Collision* (DTTCmin) berechnet wird, die den Abstand der Verkehrsteilnehmenden zum Zeitpunkt der MTTC angibt [80]. Die Berechnung der TTC-basierten Metriken kann zur Untersuchung verschiedener Verkehrssituationen verwendet werden, bei denen ein Kollisionskurs vorliegt. Dazu zählen hauptsächlich Folge- und Gegenfahrten, aber auch Kreuzungsvorgänge, wenn ein Kollisionskurs vorhanden ist [78].

Ebenfalls weit verbreitet ist die Nutzung der *Post Encroachment Time* (PET). Diese gibt die Zeitdifferenz zwischen dem Verlassen der Konfliktzone durch das erste beteiligte Verkehrsobjekt bis zum Eintreffen des zweiten beteiligten Verkehrsobjekts an [78]. Die PET hat demnach nur einen einzelnen messbaren Wert [70]. Sie kann nur berechnet werden, nachdem zwei Verkehrsobjekte explizit nicht kollidiert sind. Sie eignet sich beispielsweise zur Analyse von Kreuzungsvorgängen, die insbesondere bei Abbiegevorgängen mit kreuzendem Gegen- beziehungsweise Folgeverkehr oder auch an Überquerungen für Zufußgehende auftreten. [70] [78]

Eine weitere ortsbasierte Metrik ist die *Projected Minimum Distance* ( $D_{min}$  oder PMD). Sie wird kontinuierlich erhoben und gibt den minimalen Abstand zwischen zwei Interaktionspartnern unter der Annahme der konstanten Verzögerung des Vorderfahrzeugs und der maximalen Verzögerung des Folgefahrzeugs nach einer bestimmten Reaktionszeit an. Sie kann ebenfalls zeitbasiert als *Projected time to  $D_{min}$*  angegeben werden. [75] Vereinfacht existiert die *Minimal Distance*, die die minimale räumliche Distanz zwischen zwei Verkehrsteilnehmenden im Ablauf der Interaktion angibt [80].

Die *Deceleration Rate* (DR) oder *Required Deceleration* ( $a_{rec}$ ) gibt die Verzögerungsrate an, mit der ein Fahrzeug verzögern muss, um eine Kollision mit dem vorausfahrenden beziehungsweise kreuzenden Fahrzeug zu vermeiden. Sie ist beschleunigungsbasiert und kann kontinuierlich erhoben werden [75].

Außerdem können als SMOs kinematische Parameter wie die maximale Beschleunigung eines Verkehrsobjekts im Laufe der betrachteten Interaktion, die Geschwindigkeitsdifferenz der Interaktionspartner sowie der räumliche Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmenden (entspricht in der Regel der *Minimal Distance*) verwendet werden [81].

Bei der Anwendung und Auswertung von SMOs müssen gegenüber dem beschriebenen hohen Nutzen bestimmte Limitationen beachtet werden. Zum einen existiert keine eindeutige Definition für die Einordnung von Interaktionen in die Kategorien der Safety Pyramid (vgl. Abbildung 2.1). Grenzwerte für die zu bestimmenden SMOs und somit die Kritikalität der untersuchten Interaktionen können von den Durchführenden individuell festgelegt werden. [70] [77] [78] So befindet sich der Grenzwert für eine kritische PET in der Regel im Bereich von etwa zwei Sekunden, weicht aber in verschiedenen Studien teilweise stark (mit einem Grenzwert von einer Sekunde) davon ab [82]. Auch die üblichen Grenzwerte der kritischen TTC variieren teilweise erheblich mit Werten zwischen etwa einer und vier Sekunden [83]. Häufig basieren sie auf subjektiven Einschätzungen menschlicher Beobachtenden und sind abhängig von den Gegebenheiten des spezifischen Untersuchungsumfeld, beispielsweise von gefahrenen Geschwindigkeiten und den beteiligten Verkehrsobjekten sowie der potentiellen Schwere einer Unfallsituation. Deshalb ist eine Vergleichbarkeit derselben SMOs in verschiedenen Anwendungsfällen nur bedingt gegeben. [84] Außerdem ist zu beachten, dass die Auswertung von SMOs ohne weiterführende Informationen über die betroffenen Verkehrssituationen nur eine begrenzte Aussagekraft besitzt. So kann eine geringe PET zwar durchaus in kritischen Situationen auftreten, ebenso ist allerdings möglich, dass sich die beteiligten Verkehrsteilnehmenden frühzeitig bemerkt und ihre Geschwindigkeiten entsprechend angepasst haben. In diesem Fall zeigt sich kein riskantes, sondern ein effizient durchgeführtes Fahrmanöver. [75] [79] [85]

## **2.4. Stand der Forschung**

### **2.4.1. Überholvorgänge zwischen Kraftfahrzeugen**

Ein Manöver beschreibt im Rahmen der Verkehrsforschung die Überführung des Verkehrsobjektes als ausführendes System von einem Start- in einen Endzustand durch die zeitliche Veränderung von Steuergrößen. Als Steuergrößen gelten maßgeblich die Geschwindigkeit, Beschleunigung und Lenkung. [86] Bei einem Überholvorgang handelt es sich im engeren Sinne nicht um ein Basismanöver des Straßenverkehrs. Diese sind nicht einheitlich definiert, umfassen aber beispielsweise nach Reschka für die Teilnahme eines Pkw am urbanen Straßenverkehr: Anfahren, Folgen, Annähren, Passieren, Fahrstreifenwechsel, Abbiegen, Umkehren, Parken und sicheres Anhalten [87]. Ein Überholvorgang setzt sich demnach aus mehreren aufeinanderfolgenden Basismanövern zusammen: dem Annähren an ein vorausfahrendes Fahrzeug, einem Fahrstreifenwechsel, einem Beschleunigungsvorgang und einem erneuten Fahrstreifenwechsel sowie gegebenenfalls weiteren Geschwindigkeitsänderungen zwischen diesen Vorgängen.

In der Literatur werden Überholvorgänge entsprechend dieser Manöver in drei Phasen eingeteilt: In der ersten Phase verlässt das überholende Fahrzeug seine aktuelle Fahrspur, führt also den Fahrstreifenwechsel aus. In der zweiten Phase fährt es geradeaus auf der Überholspur am vorausfahrenden Fahrzeug vorbei. In der dritten Phase kehrt es auf seine ursprüngliche Fahrspur zurück. [18] [88] [89] Die Zeitspanne, in der die drei Phasen abgeschlossen werden, bezeichnet die Dauer des Überholvorgangs [90].

Überholvorgänge zwischen Kraftfahrzeugen gelten als besonders kritische Verkehrssituation, in der laterale und longitudinale Bewegungen eines Fahrzeugs von den Fahrzeugführenden kombiniert werden müssen [16] [18] [90]. Insbesondere wenn der Überholvorgang auf einer einspurigen Straße ausgeführt wird findet der erste Fahrstreifenwechsel zwangsläufig auf die Fahrspur des Gegenverkehrs statt [91]. Die Fahrzeugführenden treffen hierbei auf eine komplexe Situation mit zahlreichen einzubeziehenden Faktoren, wie die Entfernung des entgegenkommenden Verkehrs, die Geschwindigkeitsdifferenz zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie die Einschätzung der Dauer des Überholvorgangs [90] [92]. Vor dem Beginn des Überholvorgangs müssen sie anhand dieser Faktoren abschätzen, ob der Vorgang unter sicheren Bedingungen durchgeführt werden kann. Als Überholsituationen mit hohem Risiko gelten in der Literatur diejenigen, bei denen die Zeitlücke zum Gegenverkehr gering ist, bei denen sehr dicht auf das zu überholende Fahrzeug aufgefahren oder dicht vor ihm wieder eingeschert wird. [93] [94] [95]

Situationen mit komplexen Entscheidungsfaktoren für menschliche Fahrzeugführende bieten ein besonders hohes Potential zur Erhöhung der Sicherheit durch die Automatisierung von Fahrfunktionen. Allerdings stellen sie in diesem Zuge besonders hohe Anforderungen an diese. Die Automatisierung von Überholvorgängen gilt als eine der größten Herausforderungen hinsichtlich der verschiedenen involvierten Fahrmanöver, weshalb in der Forschung zahlreiche Studien zu diesem Thema durchgeführt wurden und werden. [16] Besonders wird sich hierbei mit der Modellerierung von Überholvorgängen und der Generierung geeigneter Überholtrajektorien für autonome Fahrzeuge auseinandergesetzt. Dies beinhaltet die optimale Auslegung des Vorgangs bezüglich der Durchführung der drei Vorgangsphasen im Hinblick auf Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Abstände zum überholten Verkehrsobjekt sowie die longitudinalen und lateralen Bewegungsabläufe. Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 aufgegriffen basieren diese Modellierungen idealerweise auf im realen Verkehr erhobenen Daten. Diese werden vor allem hinsichtlich der Dauer des Überholvorgangs, der Relativgeschwindigkeit sowie des Abstands zwischen den zwei beteiligten Fahrzeugen untersucht. [88] [90] [96]

## 2.4.2. Überholvorgänge zwischen Kraftfahrzeugen und vulnerablen Verkehrsteilnehmenden

Überholvorgänge, die zwischen einem Pkw und einem Fahrrad stattfinden, werden in der Literatur prinzipiell als kritischer eingestuft also solche zwischen Pkw. Der Hauptgrund hierfür ist die hohe Vulnerabilität der Radfahrenden, für die zu geringe Überholabstände zu einer objektiven Destabilisierung und Sturzgefahr sowie einem subjektiven hohen Angstempfinden führen können. Dies gilt insbesondere für die Phase des Überholvorgangs, in der sich das Fahrzeug direkt neben dem Fahrrad befindet, da hier in der Regel der geringste Abstand zwischen den beiden Verkehrsteilnehmenden vorliegt. [91] [97]

Überholvorgänge von Fahrrädern durch Pkw können analog zu den Vorgängen zwischen Pkw in mehrere Phasen eingeteilt werden. Dabei gibt es Ansätze, den Vorgang wie in Abschnitt 2.4.1 in die drei Phasen der Annäherung mit Fahrstreifenwechsel, dem Vorbeifahren und dem Fahrstreifenwechsel auf die ursprüngliche Fahrspur einteilen. Einige Studien arbeiten mit einer Aufteilung der ersten Phase in zwei separate Phasen der Annäherung und des Fahrstreifenwechsels. [13] [98]

Die Erfassung der Überholvorgänge findet in einer Vielzahl der Studien über mit entsprechenden Sensoren ausgestattete Testfahrräder statt, die den Abstand und die Geschwindigkeit der überholenden Fahrzeuge messen können (beispielsweise über Light Detecting and Ranging (LIDAR)-Sensoren) [98] [99]. Häufig wurden ebenfalls Kameras am Fahrrad genutzt, um Informationen über die Umgebung und die überholenden Fahrzeuge aufzuzeichnen [100] [101] [102]. Weitere Studien fanden außerdem in Fahrsimulatoren statt [13]. Studien, die Überholvorgänge über aus Bildmaterial generierten Trajektorien identifiziert haben, wurden nicht gefunden.

Die Studien zu Überholvorgängen, bei denen Fahrräder von Pkw überholt werden, fokussieren häufig den seitlichen Abstand, den die Fahrzeugführenden während des Vorbeifahrens einhalten, da dieses, wie oben beschrieben, als besonders kritisch eingestufte Phase der Interaktion gilt. Der seitliche Abstand gilt hierbei als SMoS (vgl. Abschnitt 2.3.2), dient also der Beurteilung der Kritikalität des Vorgangs. Die Untersuchungen halten ebenfalls fest, dass es sich hierbei um den geringsten Abstand handelt, der während des Überholens zwischen den Interaktionspartnern vorliegt. Auch der geringste longitudinale Abstand zwischen Pkw und Fahrrad beim Annähern des Fahrzeugs wird untersucht. [13] [98] Die Einhaltung des seitlichen Sicherheitsabstands wird den Ergebnissen nach maßgeblich vom entgegenkommenden Verkehr beeinflusst. In einer Studie führten zahlreiche Fahrzeugführende Überholmanöver trotz entgegenkommender Fahrzeuge, dafür mit einem stark verringerten seitlichen Abstand zu den Radfahrenden aus. Dieser unterschritt dabei häufig einen Meter. [98] Eine weitere Studie kommt zu dem Ergebnis, dass der durch-

schnittliche seitliche Abstand im urbanen Raum in der durchgeführten Studie unter 1,5 Metern betrug [13].

Zusätzlich wird in einigen Untersuchungen der zeitliche Ablauf der Überholvorgänge betrachtet, beispielsweise die Zeitdauer der verschiedenen Phasen der Interaktion [13]. Als weiterer SMOs wird die TTC herangezogen, die weitere Rückschlüsse auf die Kritikalität eines Vorgangs erlaubt. Sie ist vor allem relevant in der Phase des Annäherns des Fahrzeugs an das Fahrrad, da sich hier die Verkehrsteilnehmenden auf derselben Spur bewegen und das Fahrzeug eine höhere Geschwindigkeit aufweist. [13] [98]

Mehrere Studien kategorisieren die Vorgänge nach dem grundsätzlichen Verhalten des Fahrzeugführenden. Es wird unterschieden, ob sich Fahrzeuge mit einer konstanten Geschwindigkeit an das zu überholende Fahrrad annähern und ohne Abzubremsen den Überholvorgang beginnen, oder zunächst mit verringerter Geschwindigkeit an das Fahrrad heranzufahren und dann mit entsprechender Beschleunigung überholen. Dies hat sowohl auf die longitudinalen und lateralen Abstände als auch auf die Geschwindigkeit des Vorbeifahrens Einfluss und trägt maßgeblich zum Sicherheitsgefühl der überholten Radfahrenden bei. [99] Vor allem ersterer Fall zeichnet sich Analysen nach durch eine besonders hohe Kritikalität aus, die mit einer geringen TTC einhergeht [98].

Weitere Einflussparameter können qualitativ Natur sein, beispielsweise das Erscheinungsbild der Radfahrenden hinsichtlich Geschlecht, Kleidung und Fahrweise, ob die Radfahrenden einen Helm tragen, oder die Art des überholenden Fahrzeugs bezüglich Marke und Motorisierung [98] [101] [102].

Als weiterer kritischer Parameter ist in vielen Fällen das Vorhandensein beziehungsweise die Art der vorhandenen Radinfrastruktur auf den eingehaltenen Seitenabstand untersucht worden. Eine Studie fasst zusammen, dass es hierbei zu ambivalenten Ergebnissen kommt. So ergaben mehrere Untersuchungen, dass vorhandene Infrastruktur, die mit dem Konzept des Radfahrstreifens (vgl. Abschnitt 2.2.3) vergleichbar ist, dazu führt, dass die Überholenden größere Abstände einhalten. In anderen Studien hatten die Radverkehrsanlagen jedoch keinen oder sogar einen gegenteiligen Einfluss auf die Überholabstände. [99] Auch eine 2023 in Deutschland durchgeführte Messung der Hochschule Wildau zeigte diese Effekte auf [103].

Ein Aspekt, der in einem großen Teil der Untersuchungen aufgeführt wird, ist der Einfluss von Überholvorgängen durch Pkw auf das Sicherheitsempfinden der Radfahrenden. Mehrere Studien stellen heraus, dass das Sicherheitsempfinden direkt mit dem Vorhandensein sicherer Radinfra-

struktur verknüpft ist und eine Barriere für die Fahrradnutzung darstellt. Dies sei damit begründet, dass Pkw den Radfahrenden insbesondere bei nicht vorhandenen Radverkehrswegen häufig zu nah kommen und so kritische Situationen entstehen. [99] [104]

Studien, die Überholvorgänge von motorisierten Fahrzeugen unter Beteiligung von E-Scootern analysieren, konnten nicht gefunden werden.

### **2.4.3. Überholvorgänge zwischen vulnerablen Verkehrsteilnehmenden**

Zwischen vulnerablen Verkehrsteilnehmenden ohne Beteiligung eines Kraftfahrzeugs stattfindende Überholmanöver sind in der Verkehrsforschung bisher kaum untersucht worden [105], obwohl sich die Bewegungsabläufe und das Verkehrsverhalten dieser Verkehrsobjekte nachweislich vom motorisierten Verkehr unterscheiden. Eine Untersuchung aus dem Jahr 2014 beschreibt, dass Radfahrende beispielsweise stark von der physischen Anstrengung der Fortbewegung beeinflusst werden und daher Geschwindigkeitsschwankungen vermeiden. Außerdem sind VRU aufgrund ihrer geringen Breite dazu in der Lage, die laterale Breite einer Fahrbahn in anderer Weise auszunutzen als ein Pkw, weshalb sie nicht im selben Maße vom vorausfahrenden als auch von entgegenkommenden Verkehr beeinflusst werden. Die Studie bestätigt die Notwendigkeit dieser Unterscheidung zur realistischen Beschreibung und Modellierung von Verkehrssituationen. [106] Zahlreiche weitere Studien bestätigen dies im Hinblick auf die Vorhersehbarkeit des Verhaltens von VRU für autonome Fahrzeug, das in diesem Zusammenhang für die Sicherheit der Verkehrsteilnehmenden sorgt [105] [107] [108].

Eine Untersuchung aus dem Jahr 2021 hat anhand von Videomaterial stattgefunden, aus dem anhand manueller Annotation Überholvorgänge detektiert und analysiert worden. Sie unterteilt die Vorgänge in zwei Phasen: die Vorbereitungs- und Beschleunigungs-, sowie die Überhol- und Erfolgsphase. Überholvorgänge seien dabei am häufigsten ausgeführt werden, wenn die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden VRU besonders groß war. Außerdem stellten die Beobachtenden fest, dass sich die überholenden VRU nicht immer wieder auf ihre ursprüngliche Fahrspur vor der Interaktion zurückbewegen, sondern häufig auf der Spur, die zum Überholen genutzt wurde, ihre Fahrt fortsetzen. Die Dauer des Vorgangs wird für ersteren Fall vom Beginn des Ausscherens bis zur Rückkehr auf die ursprüngliche Fahrspur gemessen. Im zweiten Fall endet der Vorgang, wenn die hintere Abmessung des überholenden Fahrrads mit der vorderen Abmessung des überholten Fahrrads abschließt. Zusätzlich wurde das Geschlecht der Radfahrenden in die Auswertung einbezogen. [108] Eine weitere Ausarbeitung aus dem Jahr 2020 unterscheidet drei Fälle des Überholens, die unter anderem beinhalten, dass das überholende Fahrrad sich be-

reits vor Beginn des Überholvorgangs auf einer seitlich versetzten Spur befindet und deshalb kein Ausscheren stattfindet [107].

Im Jahr 2021 untersuchte eine Studie explizit den Mischverkehr von VRU, in diesem Fall Fahrräder und E-Scooter, auf einer geteilten Infrastruktur. Sie stellte bezüglich des eingehaltenen Überholabstands ein ähnliches Verhalten beider Arten von VRU fest. [109] Eine weitere Untersuchung von Überholinteraktionen auf einem Radweg anhand von Videomaterial fand außerdem im Jahr 2022 statt; die Detektion der Vorgänge im Videomaterial wurde nicht beschrieben [110].

#### 2.4.4. Unfallstatistik

Laut einer Studie der DEKRA kamen im Jahr 2020 277 Personen im Straßenverkehr durch riskante Überholmanöver ums Leben, während über 16.000 dabei verletzt wurden. Etwa ein Drittel aller Todesfälle im Landstraßenverkehr kam durch Unfälle mit dem Gegenverkehr zustande, dessen Entfernung häufig unterschätzt werde. [111]

Der ADAC ermittelte bei der Auswertung von Daten der eigenen Unfallrettung aus den Jahren 2005 bis 2020, dass Überholvorgänge mit ca. drei Prozent bei Pkw-Alleinunfällen und fast zehn Prozent bei Unfällen mit zwei beteiligten Pkw zu den sechs häufigsten Unfallursachen zählen [112].

Auswertungen des Statistischen Bundesamts ergeben außerdem, dass bei Unfällen mit Personenschäden durch das Fehlverhalten von Kraftfahrzeugführenden im Jahr 2022 in Deutschland über 12.000 Mal Fehler beim Überholen die Ursache waren. Das entspricht mit etwa vier Prozent der Fälle der achthäufigsten Ursache. [113] Bei Radfahrenden ergab die gleiche Untersuchung im Jahr 2020 1.773 Fehler beim Überholen und somit die siebthäufigste Ursache mit etwa drei Prozent der Fälle [114].

Das Bundesland Baden-Württemberg ermittelte in einer eigenen Statistik für das Jahr 2020 Überholvorgänge als Ursache für etwa elf Prozent aller tödlichen Unfälle junger Fahrer [115].

Diese Untersuchungen gelten hauptsächlich für Überholvorgänge zwischen Pkw. Zu Unfällen bei Überholvorgängen mit VRU-Beteiligung werden kaum Daten erhoben. Stattdessen existieren Erhebungen zur Einhaltung des vorgegebenen Mindestabstands beim Überholen (vgl. Kapitel 2.2.1). Eine Studie der Hochschule Karlsruhe aus dem Jahr 2021 ergab durch eine Messung von Überholabständen mittels Abstandssensoren, dass in einem Drittel der Fälle der vorgegebene Mindestabstand zu den Radfahrenden nicht eingehalten wurde [116]. Eine ähnliche Studie der

Hochschule RheinMain ergab in 50 Prozent der innerorts und über 80 Prozent der außerorts gemessenen Fälle eine Unterschreitung des Mindestabstands [117].

Generell stellen Radfahrende im Verkehrsgeschehen eine besonders gefährdete Gruppe dar. Im Jahr 2021 waren etwa 25 Prozent aller Verkehrstoten Radfahrende. [118] Wird dies unter dem geringen Anteil, den der Radverkehr am Modal Split aufweist (2020: 3,8 Prozent der Verkehrsleistung im Personenverkehr [119]), betrachtet, handelt es sich hierbei um einen vergleichsweise sehr hohen Wert. Als häufigster Unfallgegner der Radfahrenden gilt der Pkw, der an fast 72 Prozent der Fahrradunfälle mit Personenschaden beteiligt war. Nur in einem Viertel dieser Fälle wurden die Unfälle dabei von den Radfahrenden verursacht. In etwa elf Prozent der Fälle folgen weitere Radfahrende als zweithäufigste Unfallgegner.

Zu Überholvorgängen zwischen VRU, also beispielsweise zwei Radfahrenden oder unter Beteiligung von Nutzenden von E-Scootern, sind ebenfalls nur wenige Daten bekannt. Allerdings listet das Statistische Bundesamt für das Jahr 2021 bezüglich des Fehlverhaltens der Radfahrenden bei Unfällen mit Personenschaden für über 1.400 Fälle das Überholen als Fehlverhalten. Dies entspricht etwa neun Prozent aller Fälle. [118]

Zusammengefasst geht aus dem Kapitel 2 hervor, dass Überholvorgänge als eine kritische Interaktion im Straßenverkehr gelten. Dies gilt unabhängig von der Art der beteiligten Verkehrsteilnehmenden. In Abschnitt 2.1.1 wird die Verkehrssicherheit als oberstes Ziel der Verkehrsentwicklung herausgestellt und Abschnitt 2.4.4 zeigt deutlich, dass Radfahrende generell, aber vor allem in Konfliktsituationen mit Pkw sowie auch mit anderen Radfahrenden, eine besonders vulnerable Gruppe im Straßenverkehr darstellen. Weitere Untersuchungen von Interaktionen zwischen diesen Verkehrsteilnehmenden können der Identifikation von Gefahrenpotentialen und besonders risikoreichen Situationen dienen. Das Kapitel 2.2 zeigt zudem eine Unklarheit über die einzuhaltenen Mindestabstände bei Überholvorgängen zwischen VRU auf, der von den beteiligten Verkehrsteilnehmenden selbst einzuschätzen ist. Eine Untersuchung der tatsächlich vorliegenden Mindestabstände anhand von realen Verkehrsdaten und die damit einhergehende Kritikalität der Vorgänge kann diese Einschätzung unterstützen. Kapitel 2.3 verdeutlicht außerdem die Notwendigkeit zur Erhebung und Auswertung von Verkehrsdaten dieser Art zur Weiterentwicklung und sicheren Auslegung autonomer Fahrfunktionen.

## 3.1. Messkampagne

### 3.1.1. Projekthintergrund

Die Verkehrsdaten, die den Auswertungen dieser Arbeit zugrunde liegen, stammen aus dem Projekt *Mikromobilität auf Geh- und Radwegen – Nutzungskonflikte und verkehrliche Wirkungen* (MMoNK), das von den Instituten für Verkehrsforschung und Verkehrssystemtechnik des DLR in Kooperation mit dem Deutschen Institut für Urbanistik durchgeführt wurde. Das Projekt MMoNK wurde vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr beauftragt und über den Nationalen Radverkehrsplan 2020 vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr im Zeitraum September 2019 bis März 2023 realisiert. Das Projekt diente zum einen der Beurteilung der verkehrlichen Auswirkungen neuer Angebote der Mikromobilität. Hierzu fand die Erhebung von Mobilitätskennzahlen zur Nutzung von Elektrokleinstfahrzeugen statt, die beispielsweise Aufschluss über die Bevölkerungsgruppen der Nutzenden, die zurückgelegten Distanzen und zugehörigen Wegzwecke sowie die durch die Elektrokleinstfahrzeuge substituierten Verkehrsmittel geben. Die Datenerhebung erfolgte sowohl über Onlineumfragen als auch durch Messtechnik. Letztere wird im Verlauf dieses Kapitels näher erläutert. Zum anderen bildete die Untersuchung potenzieller Konflikte im Verkehrsgeschehen einen Forschungsschwerpunkt, indem Konfliktsituationen zwischen Radfahrenden, Zufußgehenden und Nutzenden von Elektrokleinstfahrzeugen erfasst und nach Typ der Konfliktsituation und Konfliktschwere verglichen wurden. [120]

### 3.1.2. Messort

Innerhalb des Projekts MMonK fanden vom 14. bis 16.09.2021 Messkampagnen an täglich wechselnden Orten in Berlin mit dem Messfahrzeug UTRaCar des DLR statt. Bei dem UTRaCar handelt es sich um ein Forschungsfahrzeug, das der mobilen Datenerhebung dient. Es verfügt über 13 Meter hohe Teleskopmasten, auf denen zwei Kameras sowie GPS- und Radarsensoren zur Erfassung von Verkehrsströmen montiert sind und die Bewegungen sowie Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Gierraten der Verkehrsteilnehmenden aufnehmen können. [121]

Die Messorte wurden mit Hinblick auf den Erhebungszweck auf Basis von Experteninterviews, Online-Umfragen und Unfalldaten für Fahrräder und E-Scooter der Berliner Polizei ausgewählt. Zusätzlich wurden Smartphonedaten, Möglichkeiten für einen Stellplatz des Messfahrzeugs sowie Genehmigungen der örtlichen Behörden für die Messungen als Kriterien einbezogen. Letztendlich wurden drei Messorte gewählt, die sich durch abweichende verkehrliche Gegebenheiten auszeichnen: eine gerade verlaufende Straße, ein Kreuzungsbereich und ein multimodal genutzter Platz. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Daten des ersten Messtags verwendet, da der gerade Straßenverlauf sowohl bezüglich der Häufigkeit des Auftretens von Überholvorgängen als auch im Hinblick auf die Möglichkeiten zur Analyse der Vorgänge geeignete Voraussetzungen bietet. [120]

Bei dem Messort handelt es sich konkret um die Adalbertstraße 93 im Bezirk Friedrichshain-Kreuzberg in Berlin. Die Adalbertstraße verläuft über eine Länge von ca. einem Kilometer vom Kottbusser Tor in nordöstliche Richtung. Von den Kameras des Messfahrzeugs wird ein ca. 120 Meter langer Abschnitt der Straße erfasst, der in nördlicher Richtung von der Kreuzung mit der Oranienstraße begrenzt ist. Es handelt sich hierbei um eine in beide Fahrtrichtungen einspurige Straße für motorisierte Kraftfahrzeuge mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 30 km/h. Auf dem betrachteten Abschnitt ist keine gesonderte Infrastruktur für Radfahrende vorhanden, weshalb Radfahrende und E-Scooter-Nutzende auf der Fahrbahn fahren müssen. Von der linken Kamera, die nach Norden gerichtet ist, werden die Fahrbahn, die Fußwege sowie die genannte über eine Lichtsignalanlage gesteuerte Kreuzung erfasst. Zusätzlich befindet sich in ihrem Erfassungsbereich eine Bushaltestelle. Im Bereich der rechten Kamera, die in südliche Richtung die Fahrbahn und Fußwege aufnimmt, liegt während der Messkampagne eine Baustelle, die zu einer Verengung der Fahrbahn in beide Fahrtrichtungen führt. Zwischen den Erfassungsbereichen der Kameras liegt ein ca. 20 Meter breiter Abschnitt, der nicht aufgenommen wird. [122]

### 3.1.3. Einschränkungen

Am Tag der Aufzeichnung herrschten am Messort Temperaturen zwischen 10 und 22 °C bei nahezu Windstille und ohne Niederschlag [123] [124]. Demnach sind bei den folgenden Analysen keine witterungsbedingten Einschränkungen der Verkehrsteilnehmenden zu berücksichtigen, wie beispielsweise Geschwindigkeitsreduzierung durch Wind oder Glätte der Fahrbahnoberfläche oder eingeschränkte Sichtbarkeit durch starke Niederschläge.

Im gesamten Messbereich, insbesondere auf Höhe der Baustelle, sind keine Beschädigungen oder Verunreinigungen der Fahrbahn auszumachen, durch die Verkehrsteilnehmende beeinflusst oder behindert werden könnten.

Der Sonnenaufgang fand kurze Zeit nach Beginn der Messkampagne um 6:40 Uhr statt [125]. Folglich herrschte während des gesamten Aufzeichnungszeitraums ausreichendes Tageslicht und es ist nicht von Einschränkungen der Sicht der Verkehrsteilnehmenden auszugehen.

Zum Zeitpunkt der Datenaufzeichnungen lagen im Bundesland Berlin keine Einschränkungen des Individualverkehrs durch Schutzmaßnahmen im Rahmen der Coronapandemie vor. Es galten lediglich Regelungen hinsichtlich der Nutzung des ÖPNV, die im Rahmen dieser Arbeit nicht von Relevanz sind. [126] Da die Aufzeichnung an einem Dienstag stattgefunden hat kam es möglicherweise zu einer Reduzierung des Berufsverkehrs, da Arbeitnehmende vermehrt im Home Office tätig waren, oder einer Reduzierung des Freizeitverkehrs durch freiwillige soziale Isolation. Da keine Vergleichsdaten für den Messort aus einem Zeitraum vor oder nach der Pandemie vorliegen kann deren Einfluss nicht bestimmt werden. Da für die Auswertungen dieser Arbeit aber lediglich die Höhe des Verkehrsaufkommen sowie die Anzahl der zu untersuchenden Verkehrsszenarien relevant sind, wird er als vernachlässigbar angenommen und im Folgenden nicht berücksichtigt.

Bei dem 14.09.2021 handelt es sich weder um einen Feier- noch einen Ferientag im Bundesland Berlin [127]; dieser kann demnach als repräsentativ für den werktäglichen Verkehr am Messort angenommen werden.

## 3.2. Datenbasis

### 3.2.1. Objektdetektion und Datenerzeugung

Die Ergebnisse der Messkampagne, die für die Auswertungen in dieser Arbeit verwendet werden, liegen als eine Kombination von sowohl Video- als auch Comma-separated values (CSV)-Dateien vor. Die Videodateien umfassen in einstündige Zeitabschnitte unterteilt die vollständige Aufzeichnung des Verkehrsgeschehens am Messort. Ausnahmen bilden der erste Zeitabschnitt, der den 45-minütigen Zeitraum von 6:15 Uhr bis 7:00 Uhr umfasst, sowie der letzte Zeitabschnitt, der den einminütigen Zeitraum von 15:00 Uhr bis 15:01 Uhr umfasst. Das Videomaterial ist in vier Bildbereiche unterteilt und enthält in der unteren Bildhälfte jeweils die unbearbeiteten Aufzeichnungen der linken und rechten Kamera (respektive auf der linken und rechten Bildhälfte), die zusätzlich mit einem Zeitstempel versehen sind, sowie die um Bounding Boxes (s.u.) und IDs der Verkehrsteilnehmenden ergänzten Aufzeichnungen in der oberen Bildhälfte. Ein exemplarischer Bildausschnitt ist in der folgenden Abbildung 3.1 dargestellt.



Abbildung 3.1.: Bildausschnitt des Videomaterials mit den vier Bildbereichen (v.o.l.n.u.r.) linker Erfassungsbereich mit Objektidentifikation, rechter Erfassungsbereich mit Objektidentifikation, linker Erfassungsbereich mit Zeitstempel, rechter Erfassungsbereich mit Zeitstempel. Eigener Bildschirmausschnitt.

Die Speicherung der Videos erfolgt aus Datenschutzgründen in einer verringerten Auflösung von

0,3 Megapixeln, damit weder Gesichter der Verkehrsteilnehmenden noch Kennzeichen von motorisierten Fahrzeugen erkennbar sind [128]. Die Objekterkennung und -klassifizierung erfolgt über ein KI-basiertes Verfahren, das die Verkehrsteilnehmenden detektiert und über den Erfassungsbereich verfolgt, ihre Größe bestimmt und sie automatisch einer Objektklasse zuordnet, beispielsweise Zufußgehende, Fahrräder oder Autos. Alle Objekte werden, wie in Abbildung 3.1 zu erkennen, von einer Bounding Box umrahmt, die mit ihren äußeren Abmessungen abschließt. Eine Verfolgung der Objekte vom linken in den rechten oder vom rechten in den linken Bildbereich erfolgt nicht, das heißt ein Objekt, das beide Erfassungsbereiche durchquert, ist durch zwei separate Trajektorien und IDs beschrieben, zwischen denen im Datensatz keine Zusammengehörigkeit besteht. Die Bewegungen aller detektierten Objekte werden aufgezeichnet und über den erfassten Zeitraum in Abschnitten von ca. 0,07 Sekunden über ihre jeweilige Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ausrichtung gespeichert. Jedem Objekt wird außerdem eine fortlaufend nummerierte ID zugewiesen, anhand derer die erhobenen Daten dem Objekt eindeutig zugeordnet werden können. [129]

Diese aufgezeichneten Parameter bilden die Trajektorienparameter, die zu jeder Videodatei für die jeweils linke und rechte Kameraaufzeichnung separat als CSV-Datei vorliegen. Die vollständige Trajektorie einer Objekt-ID ergibt sich aus folgenden Parametern:

- Zeitstempel (timestamp): Datum und Uhrzeit mit einer Genauigkeit von einer Mikrosekunde
- Geschwindigkeit (velocity): nördliche Komponente, östliche Komponente, Betrag, Abweichung in Metern pro Sekunde
- Klassifikation (classification): binäre Variable 0 oder 1 für jede Objektklasse (Motorbike, Car, Truck, Bus, Pedestrian, Bicycle, E-Scooter, Parked E-Scooter)
- Dimension (dimension): Länge und Breite des Objekts sowie jeweils Abweichung in Metern
- Ausrichtung/Fahrtrichtung (heading) in Grad
- Position (location) als Messergebnis der Objektdetektion: nördliche Komponente, östliche Komponente, Betrag, Zone, Abweichung
- Bounding Box: jeweils x- und y-Koordinaten der vorderen linken (front left), vorderen rechten (front right), hinteren linken (rear left) und hinteren rechten (rear right) Begrenzung des Objekts
- hintere Koordinaten (rear): nördliche Komponente, östliche Komponente

- vordere Koordinaten (front): nördliche Komponente, östliche Komponente
- Koordinaten des Mittelpunktes (center): nördliche Komponente, östliche Komponente
- Ursprungskoordinate (origin) in der Frontmitte des Objekts: nördliche Komponente, östliche Komponente [130]

Die Angabe der Koordinaten erfolgt im Universal Transverse Mercator (UTM)-Format. In der folgenden Abbildung 3.2 sind die verschiedenen Koordinatenangaben anhand eines vereinfacht dargestellten Objekts verdeutlicht.

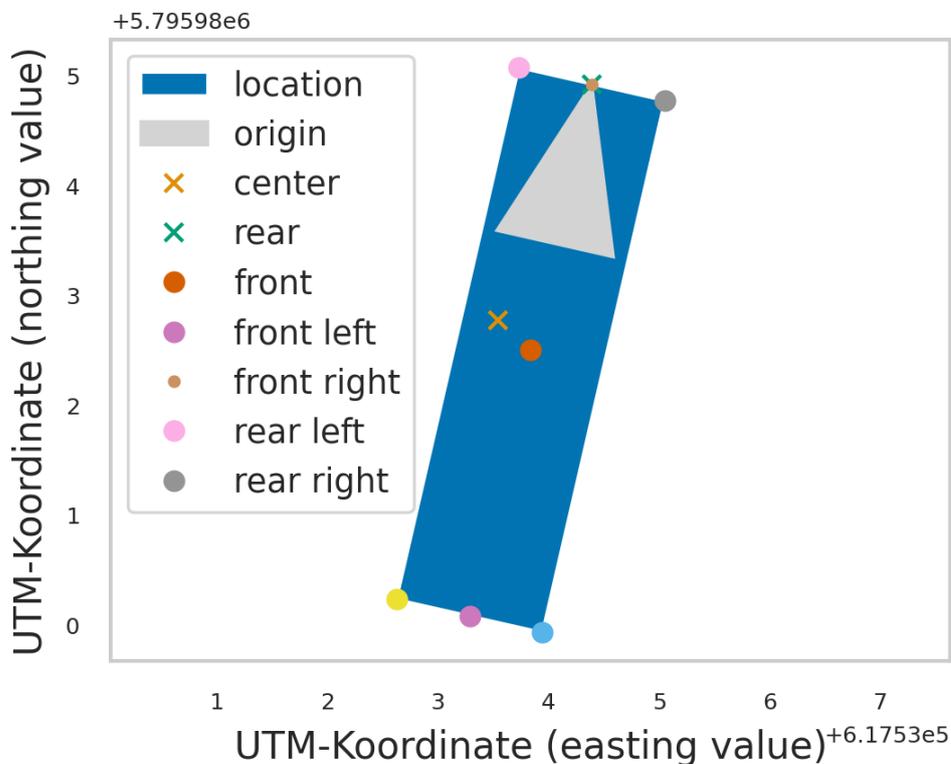


Abbildung 3.2.: Referenzpunkte der Objektkoordinaten exemplarisch an einem vereinfacht dargestellten Verkehrsobjekt. Quelle: [130].

### 3.2.2. Auswertungen zum Verkehrsaufkommen und zur Geschwindigkeitsverteilung

Um einen grundlegenden Überblick über den Umfang der Messdaten zu geben folgen an dieser Stelle Auswertungen zum Verkehrsaufkommen der verschiedenen Verkehrsteilnehmenden und den gefahrenen Geschwindigkeiten.

In den Messdaten sind nicht alle Verkehrsobjekte mit einer durchgehenden Trajektorie erfasst worden. In einigen Fällen ist aus verschiedenen Gründen die Objekterkennung unterbrochen, was zu einer Erfassung eines einzelnen Objektes durch mehrere IDs mit jeweils einer eigenen Trajektorie führt. Diese Problematik wird ausführlicher in Kapitel 3.2.3 beschrieben. An dieser Stelle ist lediglich relevant, dass für die Auswertung des Verkehrsaufkommens Trajektorien mit einer sehr kurzen Länge nicht berücksichtigt werden, da sonst durch eine mehrfache Detektion desselben Objektes das Auswertungsergebnis nach oben verfälscht würde. Als Grenzwert werden hierfür zwei Sekunden gewählt, da nach der ausführlichen Begutachtung des Videomaterials davon ausgegangen werden kann, dass die fehlerhafte Objekterkennung im Großteil der Fälle Trajektorien mit kürzerer Dauer erzeugt.

Zur Auswertung des Verkehrsaufkommens wurden die Daten der linken Kamera verwendet. Die Objekterkennung erfolgt nach Beurteilung des Videomaterials auf der linken Seite zuverlässiger, das heißt Trajektorien sind seltener unterbrochen oder Objekte einer falschen Klasse zugeordnet. Dem Videomaterial ist zusätzlich zu entnehmen, dass der Großteil aller der die Fahrbahn nutzenden Verkehrsteilnehmenden sowohl den linken als auch den rechten Bildabschnitt durchqueren, da im Zwischenbereich keine Möglichkeit zum Abbiegen und dem Verlassen des Bildbereichs gegeben ist. Die Anzahl der Verkehrsteilnehmenden, die nur in einem Bildabschnitt zu sehen sind (beispielsweise Autos, die geparkt, oder Fahrräder, die abgestellt werden) ist vernachlässigbar. Lediglich die Anzahl der Zufußgehenden ist im rechten Bildabschnitt als geringer anzunehmen, da sich im linken Bildabschnitt eine Bushaltestelle, an der Zufußgehende in Busse ein- und aussteigen, und zahlreiche Geschäfte befinden, die Zufußgehende betreten.

Zusätzlich wird für die Auswertung der Kreuzungsbereich Adalbertstraße/Oranienstraße abgeschnitten und nicht betrachtet, da der Verkehr in Ost-West-Richtung für die Analysen in dieser Arbeit nicht relevant sind. Ebenfalls nicht berücksichtigt wird der letzte Messabschnitt von 15:00 Uhr bis 15:01 Uhr, da wegen des kurzen Zeitintervalls keine Vergleichbarkeit zu den vorherigen Zeiträumen besteht.

In der folgenden Abbildung 3.3 ist das Verkehrsaufkommen gruppiert nach den Zeitabschnitten der Datenerfassung und den Objektklassen der Verkehrsteilnehmenden aufgetragen. Zusätzlich ist für jeden Zeitabschnitt die Gesamtsumme der Objekte angegeben.

Von den in Kapitel 3.2.1 genannten Objektklassen wurden Motorbike, Car, Truck, Bus, Pedestrian, Bicycle und E-Scooter ausgezählt. Die Klasse Parked E-Scooter wird vernachlässigt, da sie speziell für Analysen im ursprünglichen Projektkontext angelegt wurde, aber im engeren Sinne keine Objekte abbildet, die aktiv am Verkehrsgeschehen teilnehmen.

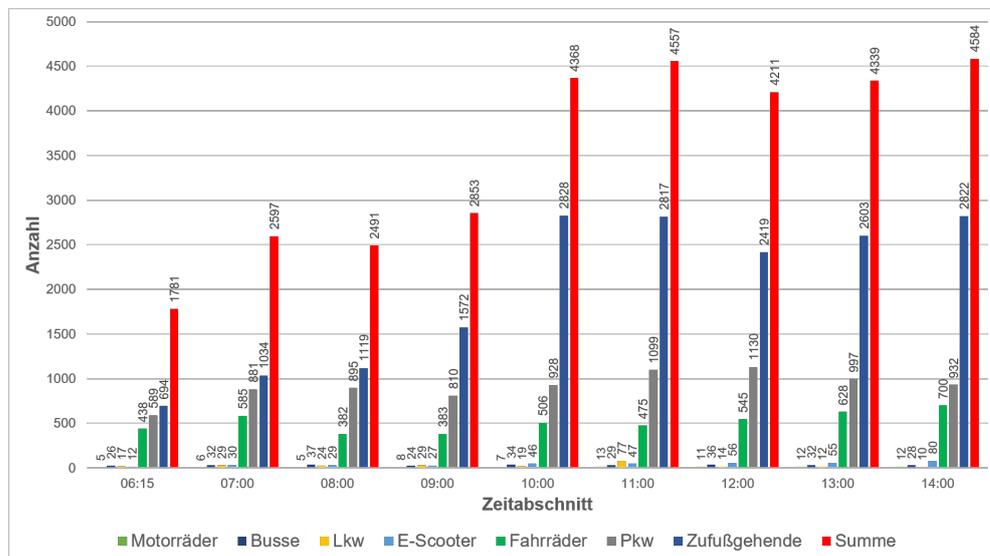


Abbildung 3.3.: Verkehrsaufkommen als Anzahl der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Zufußgehende, Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder und in Summe pro Zeitabschnitt. Eigene Darstellung.

Die Auswertung zeigt einen Anstieg der Verkehrsobjekte im Verlauf der ersten Hälfte des Messzeitraums, beginnend bei in Summe 1.781 Objekten, und ein konstant hohes Aufkommen von etwa 4.400 Objekten pro Stunde in der zweiten Hälfte. An dieser Stelle wird erneut angemerkt, dass der erste Zeitabschnitt um 15 Minuten kürzer ist als die folgenden. Den größten Anteil haben mit ca. 49 bis 65 Prozent in allen Abschnitten die Zufußgehenden, gefolgt von Pkw mit ca. 20 bis 36 Prozent und Fahrrädern mit ca. zehn bis 25 Prozent. Die einzelnen Anteile der übrigen Objektklassen übersteigen zu keinem Zeitpunkt zwei Prozent.

Dies wird in der folgenden Abbildung 3.4 verdeutlicht, die das Aufkommen der verschiedenen Objektklassen über den gesamten Verlauf der Messung darstellt.

In der Abbildung 3.5 wird das Verkehrsaufkommen zusätzlich in Abhängigkeit der Fahrtrichtung dargestellt. Hierbei wird neben den geparkten E-Scootern die Objektklasse der Zufußgehenden vernachlässigt, da sie eine separate Infrastruktur nutzen, auf der sie nicht an die Fahrtrichtungen der Fahrbahn gebunden sind. Da die Adalbertstraße mit geringer Abweichung in Nord-Süd-Richtung verläuft sind die zwei möglichen Fahrtrichtungen mit Nord-Süd (NS) und Süd-Nord (SN) bezeichnet.

Diese Auswertung zeigt einen relativ geringen Unterschied im Verkehrsaufkommen der beiden

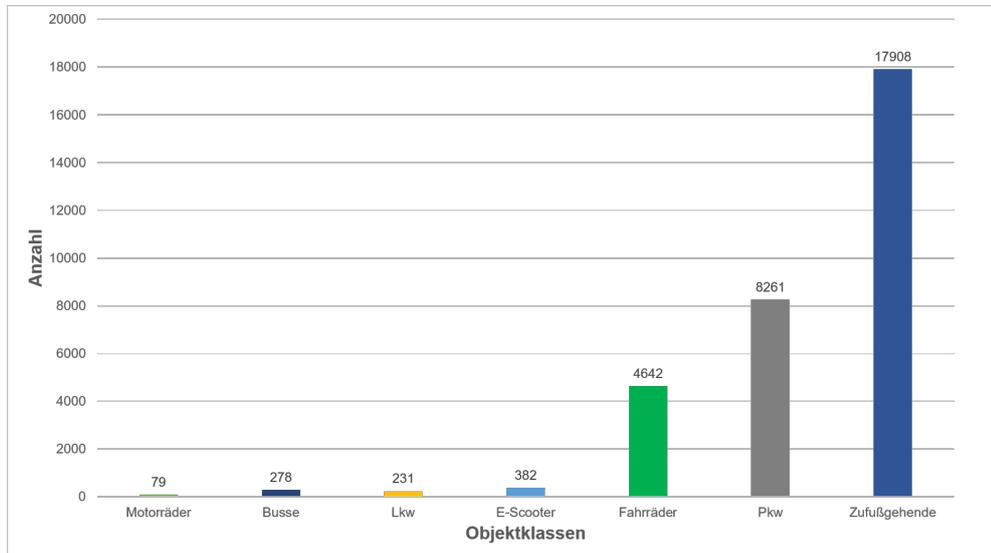


Abbildung 3.4.: Verkehrsaufkommen als Anzahl der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Zufußgehende, Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder und in Summe im gesamten Messzeitraum. Eigene Darstellung.

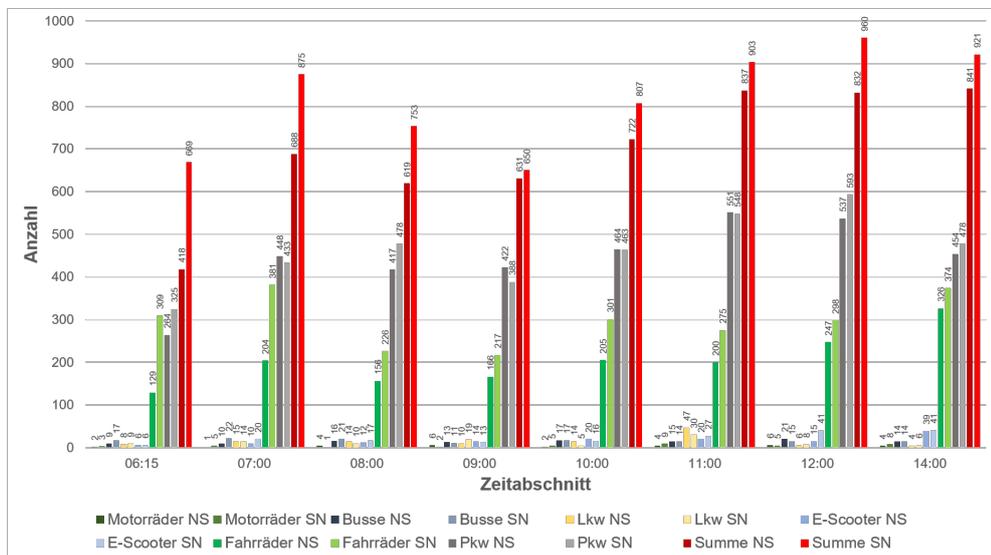


Abbildung 3.5.: Verkehrsaufkommen nach Objektklasse, Zeitabschnitt und Fahrtrichtung Nord-Süd und Süd-Nord. Eigene Darstellung.

Fahrtrichtungen. Insgesamt entfallen auf die Nord-Süd-Richtung ca. 46 Prozent und auf die Süd-Nord-Richtung ca. 54 Prozent der Verkehrsteilnehmenden. Grundlegende Trends im Verlauf der Messkampagne sind nicht ersichtlich.

Neben dem Verkehrsaufkommen bietet die Auswertung der Geschwindigkeitsverteilungen und

Durchschnittsgeschwindigkeiten einen guten Überblick über das Verkehrsgeschehen. In den Abbildungen 3.6 und 3.7 ist jeweils für den linken und rechten Erfassungsbereich ein Histogramm der gefahrenen Geschwindigkeitsbereiche für alle Verkehrsteilnehmenden im Tagesverlauf dargestellt.

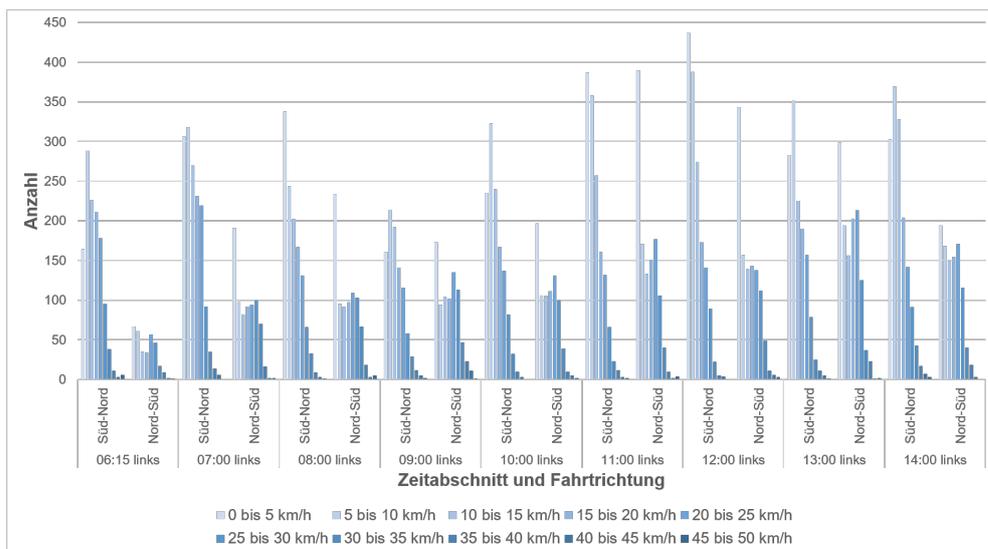


Abbildung 3.6.: Geschwindigkeitsverteilung im linken Erfassungsbereich als Anzahl der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder als Histogramm nach Anzahl pro Geschwindigkeitsbereich je Zeitabschnitt und Fahrtrichtung. Eigene Darstellung.

Für diese Auswertung werden neben geparkten E-Scooter die Zufußgehenden nicht berücksichtigt. Der Grund ist hierfür, dass diese sich abseits der Fahrbahn auf einer separaten Infrastruktur bewegen und nach den Ergebnissen der Untersuchung des Verkehrsaufkommens in hoher Zahl vorhanden sind (vgl. Abbildung 3.4). Ihr Miteinbeziehen würde das Ergebnis maßgeblich beeinflussen und teilweise verfälschen, da sich alle anderen Objektklassen unter gegenseitiger Beeinflussung auf der Fahrbahn bewegen. Die Anzahl von Fahrrädern und E-Scootern, die den Fußweg nutzen und von Zufußgehenden in ihrer Geschwindigkeitswahl beeinflusst werden, ist aus der Beurteilung des Videomaterials als vernachlässigbar anzusehen. Zusätzlich wurden, wie zuvor, der Kreuzungsbereich und der letzte einminütige Messabschnitt nicht berücksichtigt. In der Grafik ebenfalls nicht dargestellt sind vereinzelt Verkehrsobjekte, denen eine Geschwindigkeit von mehr als 50 Kilometer pro Stunde zugeordnet wurde. Diese sind auf Messungenauigkeiten zurückzuführen und in vernachlässigbar geringer Anzahl vorhanden (links 23 und rechts 27 von jeweils etwa 20.000 Erfassungen).

Die Auswertungen des linken Erfassungsbereich zeigen, dass in Süd-Nord-Richtung in jedem

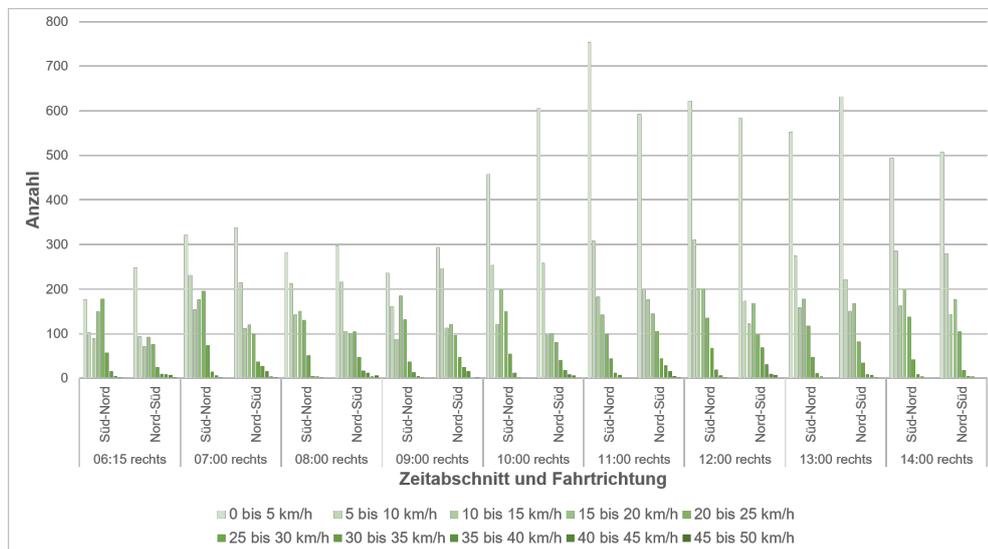


Abbildung 3.7.: Geschwindigkeitsverteilung im rechten Erfassungsbereich als Anzahl der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder pro Geschwindigkeitsbereich je Zeitabschnitt und Fahrtrichtung. Eigene Darstellung.

Zeitabschnitt geringere Geschwindigkeiten gefahren werden als in Nord-Süd-Richtung. Dies ist hauptsächlich auf die Lichtsignalanlage zurückzuführen, aufgrund derer es in Süd-Nord-Richtung zu häufigen Haltezeiten kommt, während die Fahrbahn in Nord-Süd-Richtung nach Anfahrvorgängen im Kreuzungsbereich in den meisten Fällen frei befahrbar ist. Im rechten Bereich sind die Unterschiede der Fahrtrichtungen weniger stark ausgeprägt. Es kommt in beide Richtungen zu Haltezeiten: In Nord-Süd-Richtung treten Rückstaus von einer außerhalb des Erfassungsbereichs liegenden Kreuzung auf, in Süd-Nord-Richtung kommt es bei hohem Verkehrsaufkommen zu Wartezeiten durch die Lichtsignalanlage im linken Erfassungsbereich.

Im Zeitablauf ist für beide Erfassungsbereiche eine generelle Zunahme aller Geschwindigkeitsbereiche, vor allem aber der Bereiche geringer Geschwindigkeiten erkennbar. Dies geht mit der Zunahme des Verkehrsaufkommens (vgl. Abbildung 3.3) einher.

Dies wird durch die Darstellung der Durchschnittsgeschwindigkeiten in den folgenden Abbildungen 3.8 und 3.9 verdeutlicht. Hierfür gelten die Einschränkungen und Annahmen zur Auswertung wie zuvor.

In Abbildung 3.8 ist gut die Abnahme der Durchschnittsgeschwindigkeit im Zeitverlauf zu erkennen, die sich aus der Zunahme des Verkehrsaufkommens ergibt. In Abbildung 3.9 erfolgt zusätzlich die Aufteilung nach Fahrtrichtung. Für den linken Erfassungsbereich ist die Durchschnittsgeschwindigkeit analog zur Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung in Nord-Süd-

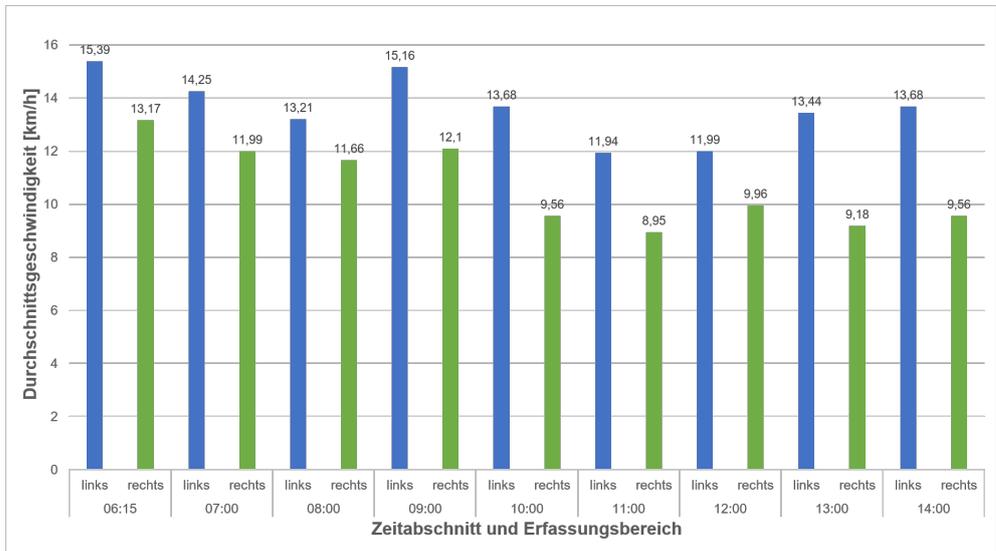


Abbildung 3.8.: Durchschnittsgeschwindigkeiten der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder je Zeitabschnitt und Erfassungsbereich. Eigene Darstellung.

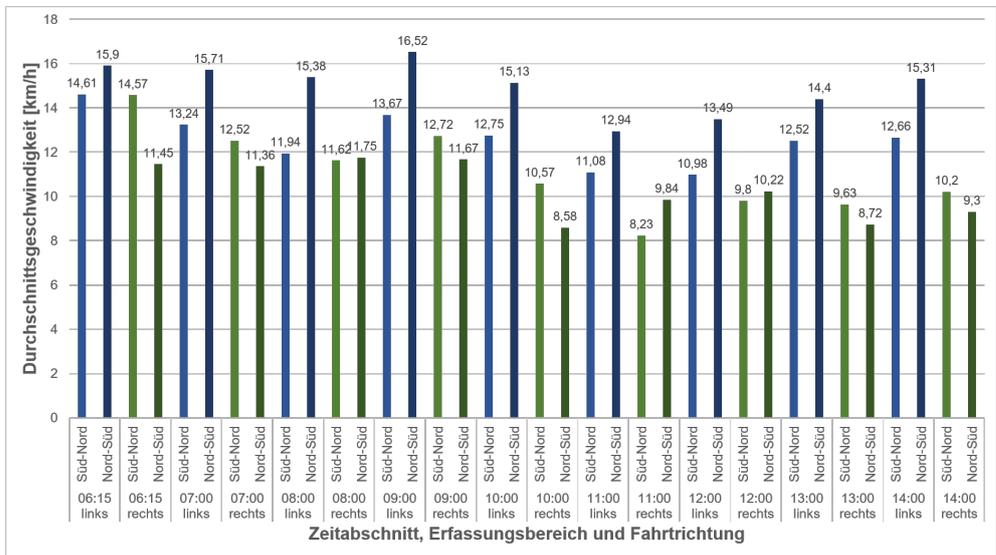


Abbildung 3.9.: Durchschnittsgeschwindigkeiten der Verkehrsobjekte für die Objektklassen Pkw, Fahrräder, E-Scooter, Lkw, Busse und Motorräder je Zeitabschnitt, Erfassungsbereich und Fahrtrichtung. Eigene Darstellung.

Richtung deutlich höher als in Süd-Nord-Richtung, während im rechten Erfassungsbereich die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen den beiden Fahrtrichtungen wechselt und die Unterschiede je Zeitabschnitt weniger stark ausgeprägt sind.

Zu den vorangegangenen Auswertungen ist anzumerken, dass die realen Zahlen womöglich leicht

von den ermittelten Werten abweichen, da es innerhalb der Objektklassifikation (s. 3.2.1) zu Fehldetektionen kommen kann. Dies ließe sich allerdings nur durch eine manuelle Überprüfung aller Objektklassifikationen anhand des Videomaterials überprüfen, was mit hohem manuellen Aufwand verbunden wäre.

### 3.2.3. Datenrelevanz und -güte

Die Erhebung der Daten, die in dieser Arbeit analysiert werden, fand ursprünglich statt, um das Verhalten und die Auswirkungen von E-Scootern im urbanen Raum zu untersuchen; der Messort wurde entsprechend ausgewählt (s. Kapitel 3.1.1). Die Auswertungen im Abschnitt 3.2.2 zeigen, dass E-Scooter trotz ihres vergleichsweise hohen Aufkommens am Messort nur einen sehr geringen Anteil des gesamten Verkehrsaufkommens ausmachen. Einen weitaus höheren Anteil haben neben Zufußgehenden die Fahrräder und Pkw, deren Verhalten im Folgenden schwerpunktmäßig untersucht wird. Für alle Verkehrsteilnehmenden sind im Messzeitraum vollständige Trajektorienendaten erhoben worden. Sie fanden allerdings nur Verwendung, wenn die Objekte in Interaktion mit E-Scootern getreten sind, was aufgrund deren geringen Vorkommens selten geschieht.

Außerdem ergeben sich durch die örtlichen Gegebenheiten, wie die vorhandene Lichtsignalanlage, den Kreuzungsbereich und die Fahrbahnbegrenzung durch die Baustelle vielfältige Verkehrssituationen, die in Kombination mit der hohen Variation der Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmenden (s. Abbildungen 3.6 und 3.7) eine relevante Basis für die Analyse von Überholvorgängen bilden.

Zusätzlich befindet sich der Messort im urbanen Raum und weist keine separate Infrastruktur für Radfahrende oder andere VRU auf. Aus den Kapiteln 2.2.3 und 2.4.2 ist ersichtlich, dass diese Bereiche ein besonderes hohes Gefährdungspotential für VRU aufweisen, da diese hier nicht durch eine optische oder bauliche Trennung vor dem motorisierten Verkehr geschützt sind. Insgesamt sind die vorliegenden Daten, wenngleich nicht zweckbezogen erhoben, als geeignet für den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit zu bewerten.

Hinsichtlich der Datengüte bestehen einige Einschränkungen für die durchzuführenden Analysen. Bereits im Abschnitt 3.2.2 ist die Problematik aufgegriffen worden, dass Trajektorien der Verkehrsteilnehmenden teilweise unterbrochen sind und dasselbe Objekt nach einer Unterbrechung von einer neuen ID erfasst wird. Ein Beispiel für eine solche Objekterfassung ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

Hier sind von oben links nach unten rechts aufeinanderfolgende Bildschirmausschnitte der rech-

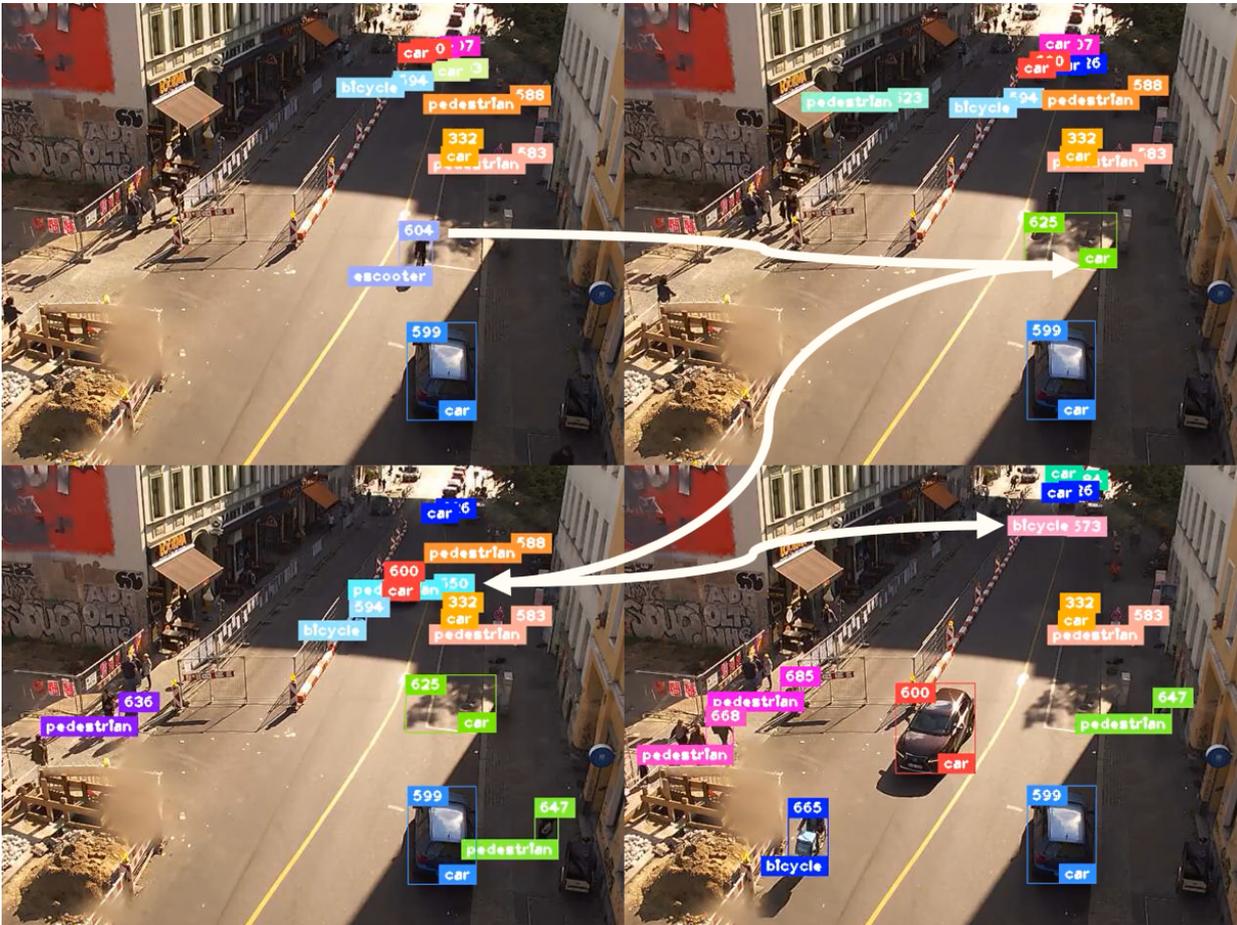


Abbildung 3.10.: Beispiel für eine unterbrochene Objekterfassung in vier aufeinanderfolgenden Bildausschnitten des Videomaterials mit Objektdetektion im rechten Erfassungsbereich über einen ca. zehnssekündigen Zeitraum. Eigene Bildschirmausschnitte und Darstellung.

ten Kamera im 13:00 Uhr-Zeitabschnitt abgebildet. Es ist zu erkennen, dass ein Fahrrad, das aus Richtung Süden in den Erfassungsbereich einfährt, zunächst als E-Scooter mit der ID 604 detektiert wird (oben links). Beim Überqueren des von einem Schatten bedeckten Parkstreifens am rechten Fahrbahnrand unterbricht die Trajektorie und auf dem Parkstreifen wird ein nicht vorhandener Pkw mit der ID 625 erfasst (oben rechts). Das Fahrrad fährt für einige Sekunden undetektiert weiter, bevor ihm die neue ID 650 und die Objektklasse Fußgänger zugeordnet werden. Kurz danach unterbricht die Erfassung erneut, bevor schließlich die Zuordnung als Fahrrad mit der ID 673 stattfindet.

Aus der Beurteilung des Videomaterials wird ersichtlich, dass Fehldetektionen vor allem im rechten Kamerabild auftreten. Zum einen findet hier im Verlauf der Fahrbahn ein Wechsel von einem sehr sonnigen und somit hellen zu einem dunkleren schattigen Bereich statt, an dem die Objekterkennung aufgrund der stark veränderten Lichtverhältnisse häufig unterbrocht. Zum anderen sind

die Objekte, wenn sie aus südlicher Richtung in den oberen Bildbereich einfahren, sehr weit von der Kamera entfernt und werden deshalb aufgrund ihrer geringen Größe schlecht detektiert. Dies trifft vor allem zu, wenn mehrere Objekte eng beieinander fahren und nur schwierig voneinander abzugrenzen sind. Generell sind kleinere Objekte wie Fahrräder durch ihre geringe Breite häufiger von Fehldetektionen betroffen als Pkw oder andere größere Verkehrsteilnehmende. Häufig wird die Erkennung auch dann unterbrochen, wenn durch einen Überholvorgang oder die Fahrt in einer Gruppe ein Objekt durch ein anderes zeitweise verdeckt wird.

Diese Fehldetektionen sind nur durch die manuelle Analyse des Videomaterials zu erkennen; im Datensatz besteht keine Zusammengehörigkeit mehrerer Trajektorien eines einzelnen Objekts. Der Umgang mit dieser Problematik wird jeweils an den relevanten Stellen in dieser Arbeit beschrieben.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass es im Erfassungsbereich, der sich nah am Messfahrzeug befindet, zu Ungenauigkeiten in der Trajektorienerfassung kommen kann. Dies ist mit Verzerrungen des Kamerabildes in den Randbereichen begründet. Diese sorgt dafür, dass Trajektorien, die den Bereich zwischen den Kameras durchqueren, laut ihren Koordinaten am selben Punkt beginnen beziehungsweise enden, obwohl in der Realität der Bereich zwischen den Kameras nicht erfasst wird. [131] Demnach kann es zu fehlerhaften Analysen kommen, wenn bei Auswertungen nur Trajektorienbereiche berücksichtigt werden, die sich direkt im Bereich des Messfahrzeugs bewegen.

Von der weiteren Verarbeitung vollständig ausgeschlossen sind die Datensätze des linken Erfassungsbereich in den um 9:00 und 10:00 Uhr beginnenden Zeitabschnitten sowie die Datensätze des rechten Erfassungsbereich im um 06:15 Uhr beginnenden Zeitabschnitt ab 6:42 und im um 11:00 Uhr beginnenden Zeitabschnitt ab 11:46 Uhr. In diesen Zeiträumen ist aufgrund fehlerhafter Objektdetektion am Messtag keine Zuordnung des Videomaterials zu den Datensätzen möglich.

## 3.3. Methodik der Auswertung

### 3.3.1. TASI

Für die Auswertungen der Trajektorien Daten in dieser Arbeit wird hauptsächlich die Python-Bibliothek *Traffic Situation analysis and Interpretation* (TASI) verwendet, die vom Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR eigens zur einheitlichen Verarbeitung und Analyse von verkehrlichen Bewegungsdaten entwickelt wurde. TASI ist speziell auf das Datenformat und die Verarbeitung der in Kapitel 3.2.1 genannten Erfassungsgrößen ausgelegt und baut zum großen Teil

auf bekannten Bibliotheken wie pandas, NumPy und Matplotlib auf. Neben der Möglichkeit zur Trajektorienanalyse bietet TASI Optionen zur Trajektorienvisualisierung und -generierung. [132] Die Programmierung in Python ist der DLR-Standard zur Datenauswertung und wird deshalb für alle Analysen in dieser Arbeit verwendet.

### 3.3.2. Algorithmische Detektion von Überholvorgängen

Das Prinzip zur algorithmischen Detektion von Überholvorgängen aus dem vorliegenden Datensatz nutzt die Beschreibung der Bewegungen der Verkehrsteilnehmenden durch UTM-Koordinaten mit zugehörigen Zeitstempeln. Ein Überholvorgang zwischen zwei Verkehrsobjekten ist folgendermaßen charakterisiert: Eine bestimmte Koordinate wird zu einem bestimmten Zeitpunkt von der Trajektorie eines Objektes und zu einem späteren Zeitpunkt von der Trajektorie des anderen Objektes durchquert. Eine Koordinate, die zu einem späteren Zeitpunkt vom ersten Objekt durchquert wird, wird hingegen schon vorher von dem zweiten Objekt durchquert. Zwischen den beiden betrachteten Objekten hat folglich das zweite Objekt das erste überholt. Die folgende Prinzipskizze in Abbildung 3.11 verdeutlicht dies.

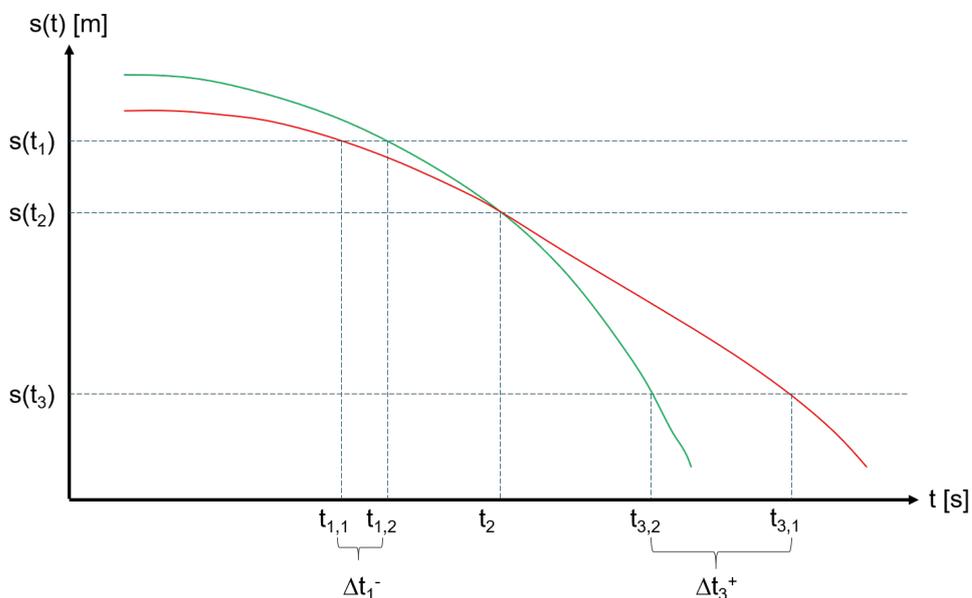


Abbildung 3.11.: Prinzipskizze im Zeit-Weg-Diagramm mit der Zeit  $t$  in Sekunden und dem Weg  $s$  in Abhängigkeit von  $t$  in Metern zur Verdeutlichung des zeitlichen und räumlichen Ablaufs eines Überholvorgangs. Eigene Darstellung.

Hier sind exemplarisch zwei Trajektorien aufgetragen, die sich zum Zeitpunkt  $t(t_2)$  am Punkt  $s(t_2)$  schneiden. Der davor liegende Punkt  $s(t_1)$  wird von der in rot dargestellten Trajektorie zum

Zeitpunkt  $t_{1,1}$  und von der in grün dargestellten Trajektorie zum Zeitpunkt  $t_{1,2}$  geschnitten. Die Zeitdifferenz  $\Delta t_1$  zwischen  $t_{1,1}$  und  $t_{1,2}$  ist negativ. Der dahinter liegende Punkt  $s(t_3)$  wird hingegen in  $t_{3,2}$  zuerst von der grün dargestellten Trajektorie und danach in  $t_{3,1}$  von der rot dargestellten Trajektorie geschnitten. Die Zeitdifferenz  $\Delta t_3$  zwischen  $t_{3,1}$  und  $t_{3,2}$  ist positiv.

Da zwei Objekte innerhalb eines Überholvorgangs nur selten exakt dieselben Koordinatenpunkte durchfahren, werden stattdessen Koordinatenbereiche festgelegt, die von beiden Objekten geschnitten werden müssen. Ein Beispiel ist in der folgenden Abbildung 3.12 gezeigt.



Abbildung 3.12.: Beispiel für Erfassungsbereiche zur Detektion von Überholvorgängen im linken Erfassungsbereich vor dem Kreuzungsbereich Adalbertstraße/Oranienstraße, erzeugt mit dem Tool *Draw Polygon* auf [geojson.io](http://geojson.io). Eigener Bildschirmausschnitt aus [133].

Die Erfassungsbereiche sind durch die grün umrahmten Polygone gekennzeichnet. Die Polygone werden mithilfe der Website [geojson.io](http://geojson.io) [133] erzeugt. Diese wandelt auf Basis von OpenStreet-Map die Festlegung der Bereiche auf dem Kartenausschnitt in GeoJSON-Dateien um, die der Repräsentation geografischer Daten dienen. Diese können wiederum zur Weiterverarbeitung in TASI genutzt werden.

Der Algorithmus, der anhand der festgelegten Polygone die Überholvorgänge aus dem Datensatz detektiert, wird durch das folgende Flussdiagramm in Abbildung 3.13 verdeutlicht.

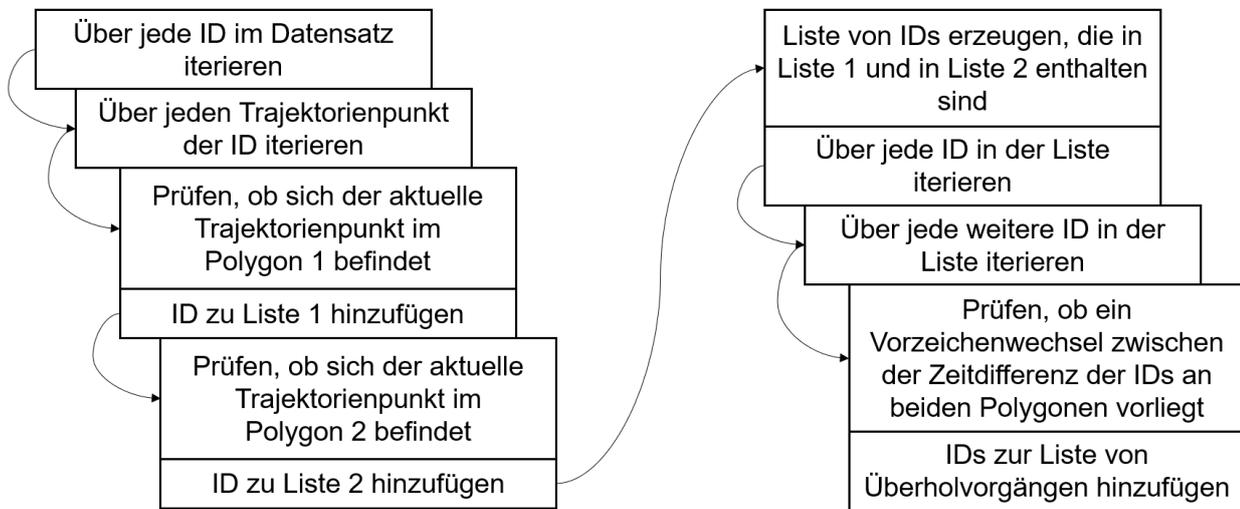


Abbildung 3.13.: Flussdiagramm zur Veranschaulichung der Funktionsweise des Algorithmus zur Detektion von Überholvorgängen. Eigene Darstellung.

Zunächst wird aus dem eingelesenen Datensatz eine Liste derjenigen Objekt-IDs erzeugt, deren Trajektorien beide Polygone schneiden. Dies erfolgt über den Vergleich der innerhalb einer Trajektorie erfassten Koordinaten mit den Koordinaten der Polygone. Alle IDs, die beide Polygone durchqueren, werden im Anschluss hinsichtlich ihrer Zeitstempel miteinander verglichen. Ist die Zeitdifferenz zweier Objekte am ersten Polygon positiv und am zweiten Polygon negativ oder umgekehrt hat im Bereich zwischen den Polygonen ein Überholvorgang stattgefunden.

Dieses Vorgehen dient exemplarisch als Grundlage für die im Kapitel 4.1 beschriebene Auswertung und wird dort erneut aufgegriffen. Der zugehörige Python-Code ist in Anhang A beigefügt.

## KAPITEL 4

# ANALYSEERGEBNISSE

### 4.1. Ablauf der Vorverarbeitung der Überholvorgänge

Die Auswertung der Messdaten beginnt mit dem Extrahieren aller im Messzeitraum stattfindenden Überholvorgänge. Auf Basis dieser Ergebnisse kann im nächsten Schritt die Analyse der zur Charakterisierung der Vorgänge ausgewählten Parameter erfolgen. Die Erkennung der Überholvorgänge läuft in fünf grundlegenden Abschnitten ab, die im Folgenden beschrieben werden.

#### 4.1.1. Manuelle Annotation

Bevor die Auswertung algorithmisch durchgeführt wird findet im ersten Schritt die händische Annotation des Videomaterials statt. Als Basis dienen die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Videodateien. Die in den Videos sichtbaren Überholvorgänge werden, zunächst ohne Berücksichtigung der Trajektoriengüte oder Nutzbarkeit für weitere Auswertungen, notiert. Die so manuell herausgearbeiteten Interaktionspaare bilden die Grundlage für die Überprüfung der späteren algorithmischen Auswertung, da davon ausgegangen werden kann, dass durch die Annotation alle stattfindenden Vorgänge vollständig gefunden werden können. Für jeden Überholvorgang werden ein Zeitstempel, der betrachtete Erfassungsabschnitt (linke oder rechte Kamera), die Art der beteiligten Interaktionspartner und ihre IDs notiert, um alle Vorgänge eindeutig zuordnen zu können. In Summe wurden durch die manuelle Annotation 475 Überholvorgänge im gesamten Messzeitraum gefunden. Davon entfallen 193 auf Vorgänge zwischen nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmenden (Fahrräder, E-Scooter, Skateboards) und 282 auf Vorgänge zwischen jeweils einem nicht-motorisierten und einem motorisierten Verkehrsteilnehmenden (motorised road users, MRU), die Pkw, Nutzkraftwagen (Nkw), Motorräder und -roller umfassen.

Im zweiten Schritt werden die manuell annotierten Vorgänge auf ihre Nutzbarkeit für weiterführende Analysen untersucht und gegebenenfalls dazu notwendige Anpassungen im Datensatz vorgenommen. Voraussetzungen für die Eignung eines Überholvorgangs sind in erster Linie die während des Vorgangs durchgängig vorhandenen Trajektorien für beide Interaktionspartner, da nur diese mit der in Kapitel 3.3 beschriebenen Methodik erfasst werden können. Die im Datensatz bestehende Problematik der unterbrochenen Objekterfassung ist bereits in Kapitel 3.2.3 erläutert worden. An dieser Stelle soll die Problematik für die im vorherigen Schritt bestimmten Trajektorien, die an Überholvorgängen beteiligt sind, behoben werden.

Die Überprüfung erfolgt ebenfalls manuell durch die Beurteilung der Trajektorien Daten. Dazu werden diese für jeden Interaktionsvorgang grafisch dargestellt, indem für beide Interaktionspartner über jeden vorhandenen Zeitstempel die zugehörige Nord-Süd-Koordinate aufgetragen wird. Da die Adalbertstraße nur mit geringer Abweichung in Nord-Süd-Richtung verläuft und Überholvorgänge demnach über die Nord-Süd-Bewegungen der Objekte erfasst werden kann die Ost-West-Koordinate bei dieser Betrachtung vernachlässigt werden. Ein beispielhafter Trajektorienplot ist in der folgenden Abbildung 4.1 dargestellt. Abgebildet ist ein Zeitabschnitt von ca. zwölf Sekunden und eine Strecke in Nord-Süd-Richtung von etwa 73 Metern.

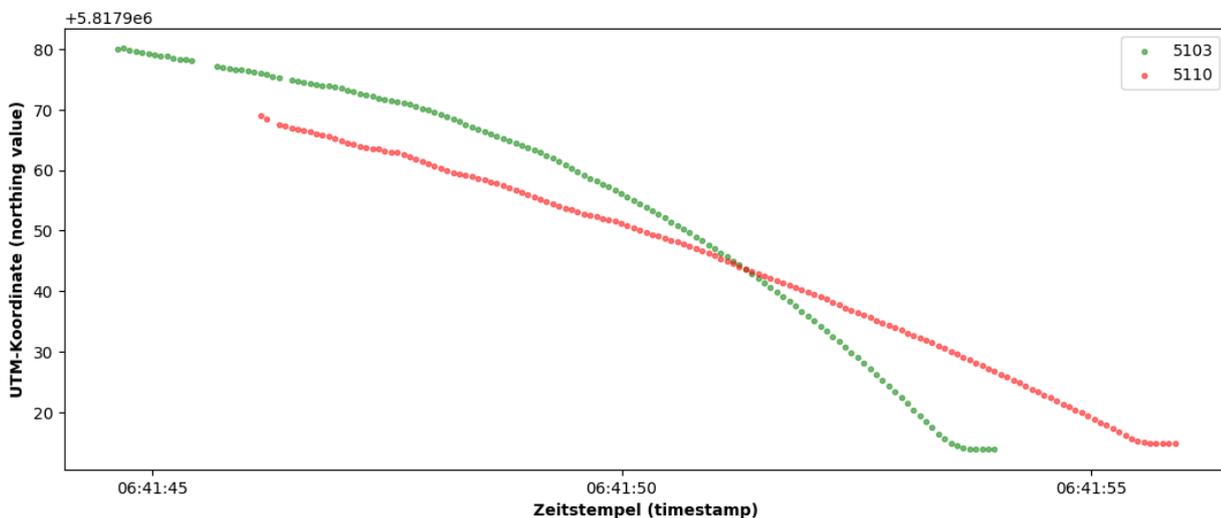


Abbildung 4.1.: Beispiel für einen Überholvorgang mit nutzbaren Trajektorien Daten der Objekte 5103 (überholend) und 5110 (überholt) auf der linken Kameraseite, aufgetragen als Nord-Süd-Komponente der UTM-Koordinate über dem Zeitstempel. Eigene Darstellung.

In der Abbildung 4.1 ist ein Überholvorgang zum Zeitpunkt 06:41:51 durch den Schnittpunkt der beiden Trajektorien zu erkennen. Die Trajektorien verlaufen ohne maßgebliche Unterbrechung: Objekt 5103 wird über eine Strecke von ca. 73 Metern und Objekt 5110 durch die später einsetzende Erfassung über ca. 60 Meter durchgehend detektiert. Außerdem dauern sie für mehrere

Sekunden vor (ID 5103: 7 Sekunden, ID 5110: 5 Sekunden) und nach (ID 5103: 3 Sekunden, ID 5110: 5 Sekunden) dem Überholvorgang an. Dadurch eignen sie sich gut für Analysen des Verhaltens der Interaktionspartner vor, während und nach dem Überholvorgang.

Ein anderes Beispiel ist in der folgenden Abbildung 4.2 dargestellt.

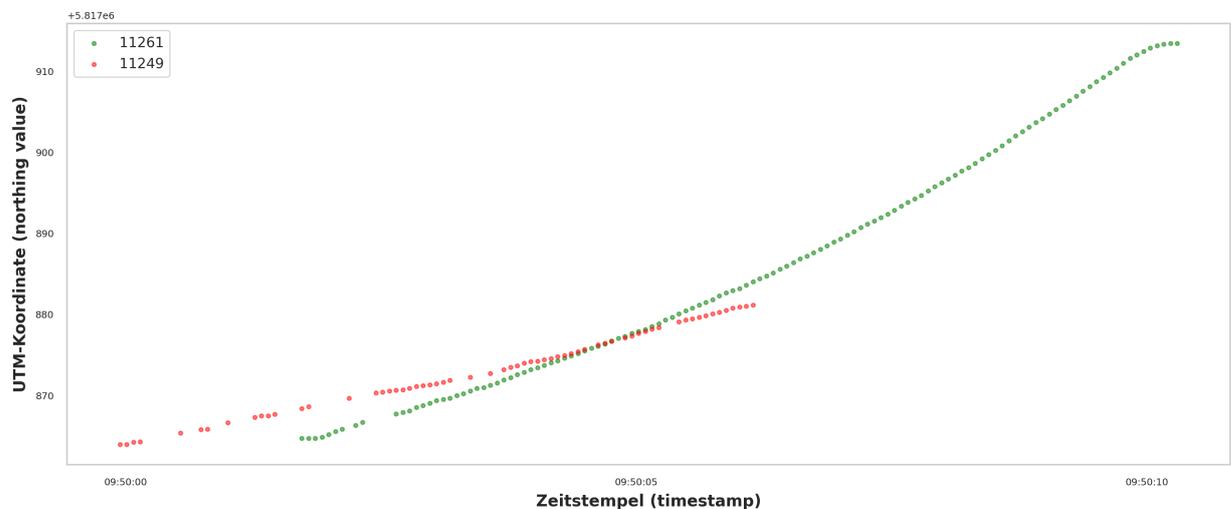


Abbildung 4.2.: Beispiel für einen Überholvorgang mit einer abbrechenden Trajektorie der Objekte 11261 und 11249 auf der rechten Kameraseite, aufgetragen als Nord-Süd-Komponente der UTM-Koordinaten über dem Zeitstempel. Eigene Darstellung.

Dort ist zu erkennen, dass die Trajektorie des überholten Objekts mit der ID 11249 kurz nach dem Überholvorgang abbricht und nicht wieder einsetzt. Aus dem Video ist ersichtlich, dass dasselbe Objekt nach einer kurzen Unterbrechung mit der neuen ID 11286 erfasst wird. Dies ist im folgenden Trajektorienplot der Abbildung 4.3 gut zu sehen.

Die kurz nach dem Überholvorgang endende Trajektorie erschwert die algorithmische Detektion der Interaktion mit dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Verfahren und die vollständige Analyse des Vorgangs. Daher wird im zweiten Schritt der Datensatz hinsichtlich dieser Fälle aufgebessert. Im abgebildeten Beispiel wird in allen Datensätzen der ID 11286 die ID auf 11249 geändert. So entsteht eine gesamte Trajektorie (s. Abbildung 4.4) für das erfasste Objekt, die lediglich durch eine kurze Unterbrechung kurz nach dem Überholvorgang gekennzeichnet ist.

Um die erkennbare Lücke in der Trajektorie zu schließen wird mithilfe einer bestehenden Funktion in TASI eine Interpolation über die gesamte Trajektorie durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.5 zu sehen.

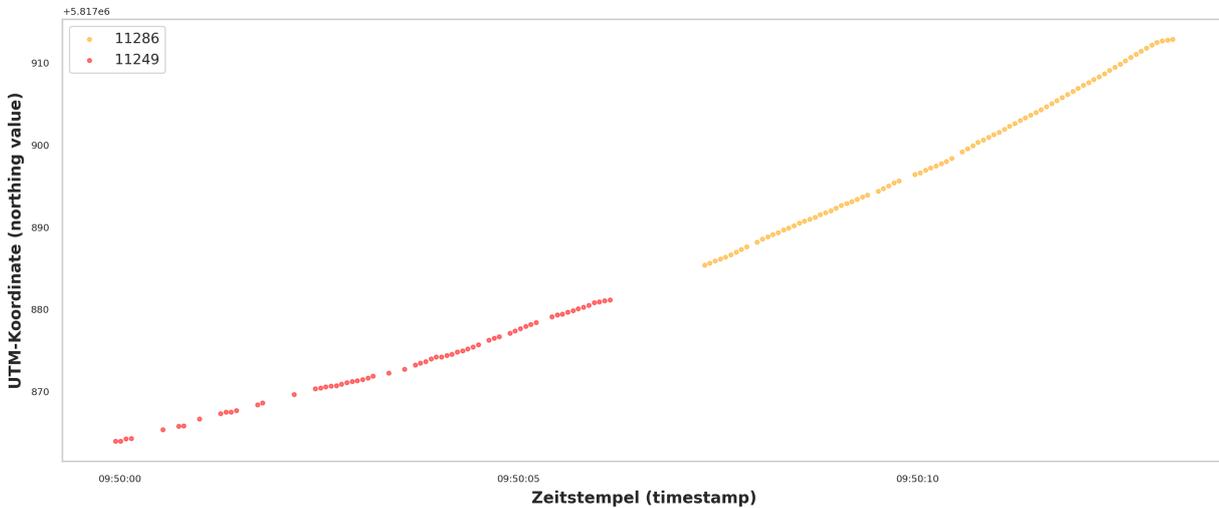


Abbildung 4.3.: Aus den IDs 11286 und 11249 zusammengesetzte Trajektorie des überholten Objekts, aufgetragen als Nord-Süd-Komponente der UTM-Koordinaten über dem Zeitstempel. Eigene Darstellung.

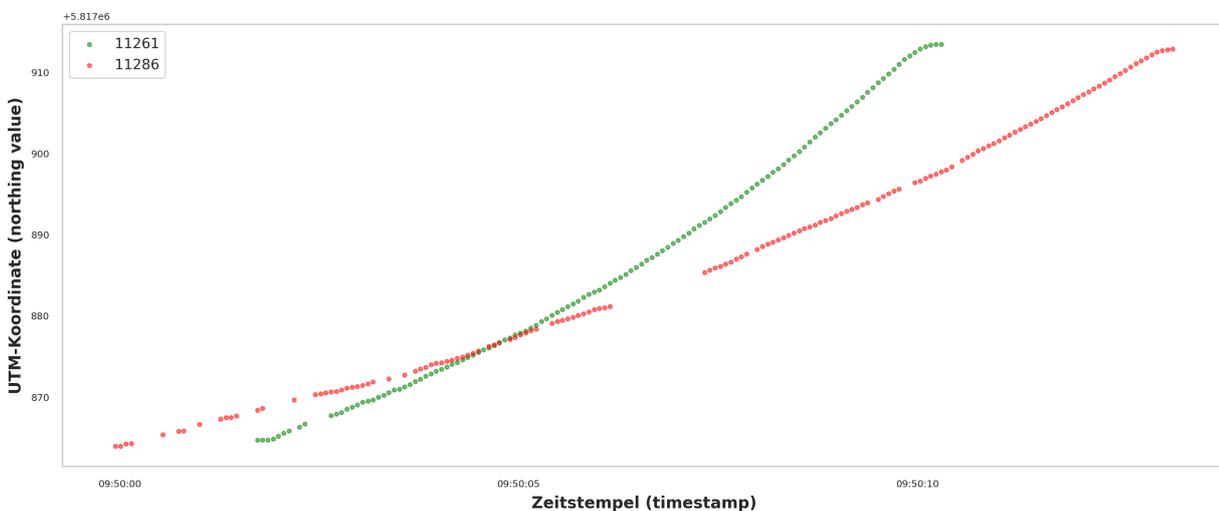


Abbildung 4.4.: Überholvorgang des Objekts 11261 mit der zusammengeführten Trajektorie des Objekts 11249, aufgetragen als Nord-Süd-Komponente der UTM-Koordinaten über dem Zeitstempel. Eigene Darstellung.

Gleichermaßen wird mit allen anderen betroffenen Verkehrsobjekten verfahren.

Dieses Vorgehen kann alternativ algorithmisch stattfinden, indem der Datensatz nach jeweils zwei Trajektorien gefiltert wird, die innerhalb eines geringen definierten zeitlichen und räumlichen Abstands enden beziehungsweise beginnen. So können diese so als zusammengehörig identifiziert

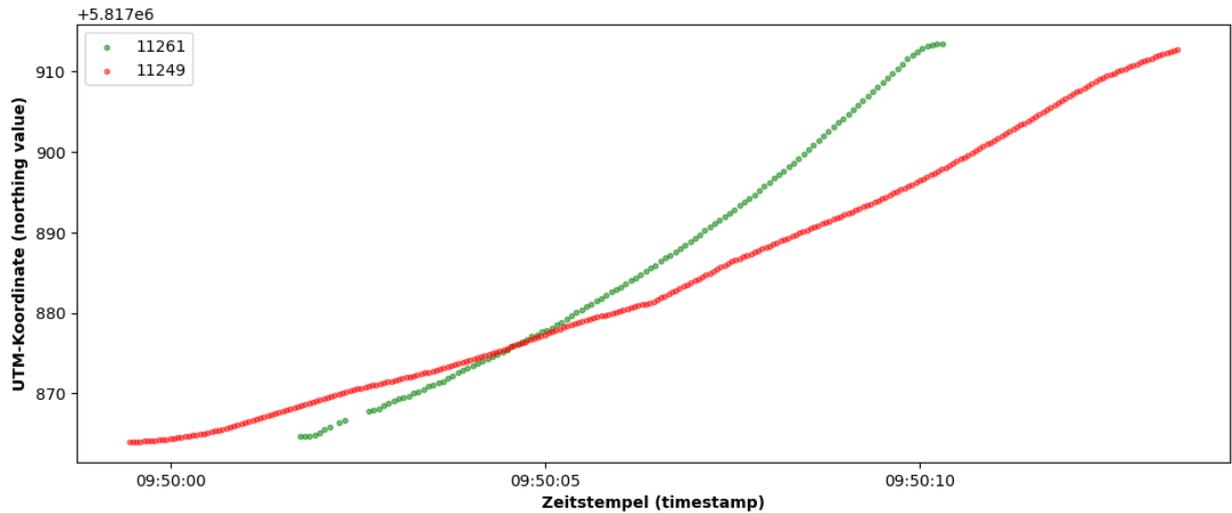


Abbildung 4.5.: Überholvorgang des Objekts 11261 mit der zusammengesetzten und interpolierten Trajektorie des Objekts 11249, aufgetragen als Nord-Süd-Komponente der UTM-Koordinaten über dem Zeitstempel. Eigene Darstellung.

und unter einer gemeinsamen ID kombiniert werden. Dieses Vorgehen ist allerdings fehleranfällig und würde zusätzlichen manuellen Aufwand durch die Überprüfung der Ergebnisse anhand des Videomaterials erzeugen, weshalb es im Rahmen dieser Arbeit nicht umgesetzt wird. Insbesondere bei Fahrten mehrerer Verkehrsteilnehmer in Gruppen oder während Überholvorgänge kommt es, wie im Abschnitt 3.2.3 erläutert wurde, häufig zu Fehlern in der Objektdetektion. Da in diesen Situationen immer mehrere Verkehrsobjekte involviert sind ist das Risiko einer falschen Kombination der unterbrochenen Trajektorien besonders hoch.

Nachdem die möglichen Korrekturen im Datensatz vorgenommen wurden können insgesamt 330 der 475 Vorgänge als nutzbar für weitere Analysen deklariert werden. Gründe für die Einstufung eines Vorgangs als nicht nutzbar sind:

- Die Objekterkennung eines der oder beider Interaktionspartner setzt erst nach dem Überholvorgang ein.
- Die Trajektorien eines Interaktionspartners oder beider Interaktionspartner sind für die gesamte Dauer des Überholvorgangs unterbrochen.
- Der Beginn eines Überholvorgangs ist im Videomaterial zu erkennen, der tatsächliche Überholvorgang findet aber im Bereich zwischen den Kamera statt, der nicht erfasst wurde.
- An einem Überholvorgang sind mehr als zwei Interaktionspartner beteiligt, beispielsweise überholt ein Pkw zwei nebeneinander fahrende Fahrräder oder die Interaktionspartner

befinden sich innerhalb einer größeren Gruppe von Verkehrsteilnehmenden, die nah beieinander fahren und einander beeinflussen.

- Das überholte Objekt hält während oder kurz nach dem Überholvorgang an.

Folglich zeichnet sich ein nutzbarer Überholvorgang durch vollständige Trajektorien beider Interaktionspartner, das Stattfinden im Erfassungsbereich der Kameras, nicht mehr als zwei beteiligten Objekte und keinen gleichzeitig stattfindenden Anhaltevorgang aus.

### 4.1.2. Algorithmische Auswertung

Im dritten Schritt wird mit der algorithmischen Auswertung des Datensatzes begonnen. Das Ziel ist es, alle durch die manuelle Annotation gefundenen und als nutzbar eingestuften Überholvorgänge auch algorithmisch bestimmen zu können, um das Verfahren für zukünftige Datenanalysen zu verifizieren. Das hierzu angewandte Verfahren ist in seinen Grundzügen bereits in Abschnitt 3.3.2 beschrieben worden. Um dieses Verfahren anwenden zu können wird zunächst der gesamte Datensatz hinsichtlich der Fahrtrichtungen der Verkehrsobjekte aufgeteilt, da Überholvorgänge nur zwischen Verkehrsteilnehmenden stattfinden können, die in dieselbe Richtung fahren (Nord-Süd- oder Süd-Nord-Richtung). Zur Bestimmung der Fahrtrichtung werden für jede ID im Datensatz der erste und letzte Punkt der Trajektorie verglichen. Als Vergleichsparameter dient, wegen des bereits beschriebenen Verlaufs des Erfassungsbereichs, die Nord-Süd-Koordinate. Die Koordinatenpunkte lassen sich im UTM-Format durch einfache Differenzbildung miteinander verrechnen. Der Wert der Nord-Süd-Koordinate nimmt in Nord-Süd-Richtung ab; bei einer positiven Differenz zwischen der ersten und letzten Koordinate findet folglich eine Bewegung in Nord-Süd-Richtung statt, bei einer negativen Differenz in Süd-Nord-Richtung.

Nach diesen vorbereitenden Schritten kann mit der tatsächlichen Auswertung der Überholvorgänge begonnen werden. Die in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Polygone werden so definiert, dass sie jeweils den im Bildmaterial erkennbaren linken und rechten Erfassungsbereich begrenzen. Die Auswertung erfolgt getrennt nach linkem und rechtem Erfassungsbereich sowie der Fahrtrichtungen für alle Datensätze mit dem beschriebenen Verfahren. Der Algorithmus gibt für jeden detektierten Überholvorgang die IDs und Objektklassen der beteiligten Interaktionspartner aus.

In dieser ersten Auswertungsrunde sind 226 Überholvorgänge aus dem Datensatz detektiert worden. Das entspricht etwa der Hälfte aller durch die manuelle Annotation gefundenen Vorgänge. Für alle nicht detektierten Vorgänge gilt, dass mindestens eine am Vorgang beteiligte Trajektorie entweder erst nach dem ersten definierten Polygon einsetzt oder schon vor Passieren des zweiten Polygons endet (vgl. Abbildung 3.12). Dies ist beispielsweise auf der linken Kameraseite der

Fall, wenn Verkehrsteilnehmende aus dem östlichen oder westlichen Kreuzungsarm in den Erfassungsbereich einbiegen und dann an einem Überholvorgang beteiligt sind. Diese durchqueren zu keinem Zeitpunkt das aus Sicht der Kamera hinter dem Kreuzungsbereich am Bildrand definierte Polygon und können demnach nicht erfasst werden. Auf der rechten Kameraseite erfolgt die Erfassung der in den hinteren Bildbereich einfahrenden Objekte aufgrund der weiten Entfernung häufig erst nach mehreren Sekunden und damit räumlich gesehen nach dem am Bildrand definierten Polygon.

Zur Erfassung der zweiten Hälfte der Überholvorgänge findet als fünfter und letzter Schritt der algorithmischen Auswertung ein iterativer Prozess durch die schrittweise Anpassung der Polygone statt. Zuerst wird der chronologisch erste nicht erfasste Überholvorgang gewählt und im Abgleich mit dem Videomaterial und den Trajektorien Daten die Lage der Polygone so angepasst, dass sie von beiden Interaktionspartnern durchquert werden und der Überholvorgang im Zwischenbereich stattfindet. Mit diesen veränderten Polygonen wird der Datensatz erneut ausgewertet. Neben dem Referenzvorgang werden so weitere vormals nicht erfasste Vorgänge detektiert, die dem Referenzvorgang im Bezug auf den räumlichen Verlauf und die Objekterkennung ähneln. Für den rechten Erfassungsbereich werden 14 und für den linken Erfassungsbereich zehn Anpassungen der Polygone vorgenommen und insgesamt 111 weitere Überholvorgänge detektiert.

### 4.1.3. Ergebnis der Vorverarbeitung der Überholvorgänge

Die Summe der algorithmisch detektierten Vorgänge übersteigt mit 337 die 330 als nutzbar eingestuften Vorgänge der manuellen Annotation. Dieser Umstand wird in der folgenden Confusion Matrix in Tabelle 4.1 veranschaulicht.

Tabelle 4.1.: Confusion Matrix zur Nutzbarkeit und Detektion von Überholvorgängen durch die manuelle Annotation und algorithmische Auswertung. Eigene Darstellung.

	<b>Detektiert</b>	<b>Nicht detektiert</b>
<b>Nutzbar</b>	True positives 318	False negatives 12
<b>Nicht nutzbar</b>	False positives 19	True negatives 111

True positives bezeichnet diejenigen Vorgänge, die durch die manuelle Annotation als nutzbar deklariert und durch die algorithmische Auswertung detektiert wurden. True negatives wurden als nicht nutzbar deklariert und konnten algorithmisch nicht detektiert werden. Verantwortlich für die genannte Abweichung sind die Vorgänge in den Zellen False positives (detektiert, aber nicht

nutzbar) und False negatives (nicht detektiert, aber nutzbar).

False positives bilden diejenigen Interaktionen ab, die aufgrund der Beteiligung von mehr als zwei Interaktionspartnern als nicht nutzbar eingestuft werden. Diese Vorgänge, beispielsweise ein Überholvorgang innerhalb einer Gruppe von Radfahrenden, werden durch das verwendete Verfahren detektiert, sind aber aufgrund der Beeinflussung durch dritte unbeteiligte Verkehrsteilnehmende von weiteren Analysen ausgeschlossen.

In den False negatives finden sich Überholvorgänge, die erst kurz vor dem Ende der Bilderfassung im Bereich des Messfahrzeugs stattfinden. Wie im Abschnitt 3.2.3 bereits beschrieben sind in diesem Bereich die Trajektorien stark von Verzerrungen betroffen und die Detektion daher nicht für alle Überholvorgänge erfolgreich.

Die 337 algorithmisch detektierten Vorgänge werden durch die Summe der True und False positives abgebildet. Die 330 nutzbaren Vorgänge finden sich wiederum in der Summe aus True positives und False negatives. Diese werden für die weiterführenden Auswertungen in diesem Kapitel verwendet und sind auf 112 Interaktionen zwischen VRU und 218 Interaktionen mit MRU-Beteiligung verteilt. Im Flussdiagramm in Abbildung 4.6 ist der Verlauf der Auswertungen über die einzelnen Schritte mit der jeweiligen Summe der Überholvorgänge zusammengefasst veranschaulicht. Die 318 nutzbaren und detektierten Vorgänge im letzten Block entsprechen den True positives in Tabelle 4.1.

## 4.2. Analyse der Überholvorgänge

In diesem Kapitel werden die Überholvorgänge, die im vorigen Abschnitt aus dem vorliegenden Datensatz extrahiert wurden, weiteren Analysen unterzogen. Aus den Abschnitten 2.2 und 2.4.2 geht hervor, dass aus verkehrsrechtlicher sowie sicherheitsrelevanter Perspektive der Parameter des Abstands zwischen den am Überholvorgang beteiligten Verkehrsteilnehmenden von besonderem Interesse ist. Zusätzlich wird als klassischer SMOs die TTC ausgewertet. Bei der Annäherungsphase eines Überholvorgangs handelt es sich um eine Folgefahrt der beiden Interaktionspartner, deren Kritikalität über die TTC beurteilt werden kann. So wird, wie in Abschnitt 2.4.2 beschrieben, neben dem lateralen auch der longitudinale Abstand zwischen den Verkehrsteilnehmenden berücksichtigt. Zuletzt wird die räumliche Verteilung der Überholinteraktionen im Messraum betrachtet, um mögliche Rückschlüsse auf das Auslösen der Interaktionen ziehen zu können und diese hinsichtlich ihrer Ähnlichkeiten zu beurteilen. Insbesondere die Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Interaktionen mit und ohne Beteiligung motorisierter Verkehrs-

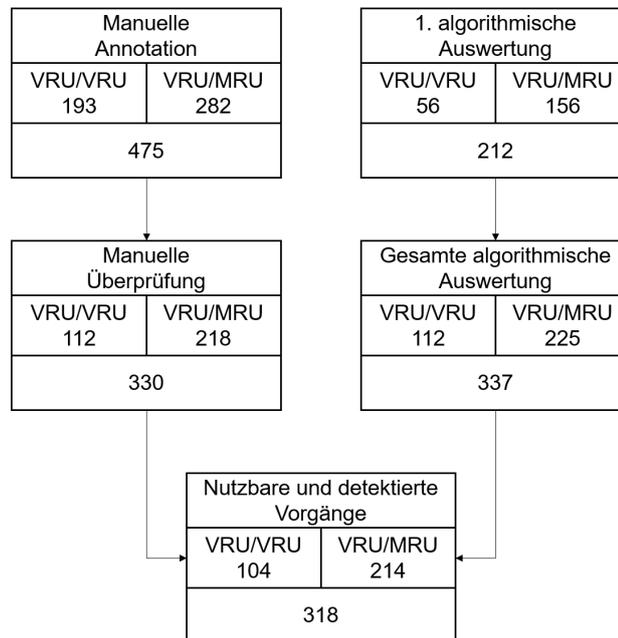


Abbildung 4.6.: Flussdiagramm über den Verlauf der Vorverarbeitung der Überholvorgänge mit der jeweiligen Gesamtsumme und Verteilung auf Vorgänge zwischen VRU und Vorgänge mit MRU-Beteiligung. Eigene Darstellung.

teilnehmender und E-Scooter-Nutzender im Hinblick auf diese Parameter werden im Folgenden betrachtet.

### 4.2.1. Time-to-collision

Bei der TTC handelt es sich, wie in Abschnitt 2.3.2 erläutert, um eine Kritikalitätsmetrik, die die verbleibende Zeitdauer bis zu einer Kollision zweier Verkehrsobjekte angibt, sofern diese sich auf einem Kollisionskurs befinden, von dem nicht abgewichen wird. Die MTTC bezeichnet darauf aufbauend den innerhalb einer Interaktion auftretenden minimalen TTC-Wert, der folglich in Bezug auf diese Metrik den kritischsten Punkt der Interaktion angibt. [70] [78] Wie oben beschrieben handelt es sich bei der Annäherung der Verkehrsteilnehmenden vor dem Überholvorgang um eine Folgefahrt, wobei der Zeitpunkt der MTTC in diesem Fall den Punkt der größten Gefahr eines Auffahrunfalls darstellt.

Für die aus den vorliegenden Daten detektierten Vorgänge erfolgt die Analyse der TTC über eine zu diesem Zweck bestehende Funktion in TASI. Diese berechnet die TTC als Quotient aus der Entfernung der Verkehrsteilnehmenden vom Kollisionspunkt und deren Relativgeschwindigkeit. [134] Zur Bestimmung der MTTC wird für die jeweiligen Interaktionspartner die TTC zu jedem gemessenen Trajektorienpunkt vor Stattfinden des Überholvorgangs ermittelt. Der Über-

holzeitpunkt wird näherungsweise über den minimalen Abstand der Koordinaten der Mittelpunkte zwischen den beiden Trajektorien bestimmt, da dieser in der Regel vorliegt, wenn sich die beiden Objekte genau nebeneinander befinden. Um Geschwindigkeitsschwankungen durch Messungenauigkeiten, die durch die teilweise fehlerhafte Objekterkennung begründet sind, auszugleichen wird eine gleitende Mittelwertrechnung über die jeweils fünf vorausgegangenen Werte der TTC durchgeführt. Hierzu wird die entsprechende Standardfunktion *rolling* der Python-Bibliothek *pandas* [135] zur Datenanalyse verwendet. Bei der Schrittweite von fünf handelt es sich um einen Erfahrungswert des Instituts für Verkehrssystemtechnik, der im Falle der vorliegenden Daten etwa einem Zeitschritt von einer halben Sekunde entspricht. Aus den so ermittelten TTC-Werten wird die MTTC als minimaler Wert bestimmt.

### Gründe für die nicht mögliche Ermittlung einer TTC

Für 68 der 330 ausgewerteten Interaktionsvorgänge, also etwa 20 Prozent, konnte mit diesem Algorithmus keine TTC bestimmt werden. Wie bereits mehrfach erwähnt ist die Ermittlung einer TTC nur dann möglich, wenn sich zwei Verkehrsteilnehmende auf einem Kollisionskurs befinden; dies war folglich nicht der Fall. Anhand des Videomaterials können Gründe für die nicht vorhandene TTC und damit einhergehend den nicht vorhandenen Kollisionskurs der jeweiligen Interaktionspartner gefunden werden.

Die grundlegende Ursache ist, dass die Interaktionspartner sich bereits vor dem Überholvorgang auf lateral versetzten Trajektorien bewegen. Dieser Fall tritt insbesondere dann auf, wenn die zwei Interaktionspartner nebeneinander an der Lichtsignalanlage der nördlichen Kreuzungsseite im linken Erfassungsbereich warten. Sie setzen bei grünem Lichtsignal dadurch ihre Fahrt mit einem seitlichen Abstand fort, weshalb vor dem anschließend stattfindenden Überholvorgang kein Kollisionskurs auftritt. Hierbei fällt außerdem ein Unterschied im Verhalten zwischen MRU und VRU auf. Schon während des Annäherns an die Kreuzung ordnen sich VRU zunehmend am äußeren Fahrbahnrand an. In der folgenden Abbildung 4.7 ist eine beispielhafte Situation gezeigt.

Hier ist zu erkennen, dass die rot umrahmten VRU, die während des Wartevorgangs vom Betrachtenden aus rechts neben dem grün umrahmten parkenden Pkw gehalten hatten, sich beim Anfahren zunehmend links einordnen, um den ebenfalls anfahrenen Pkw das Überholen zu ermöglichen. Somit befinden sich die Trajektorien dauerhaft im lateralen Versatz und die Bestimmung der TTC ist nicht möglich.

Ähnliche Fälle treten auf, wenn VRU aus dem westlichen Kreuzungsarm in Nord-Süd-Richtung einbiegen. Aus dem Videomaterial ist zu sehen, dass diese sich dabei am äußeren Fahrbahnrand

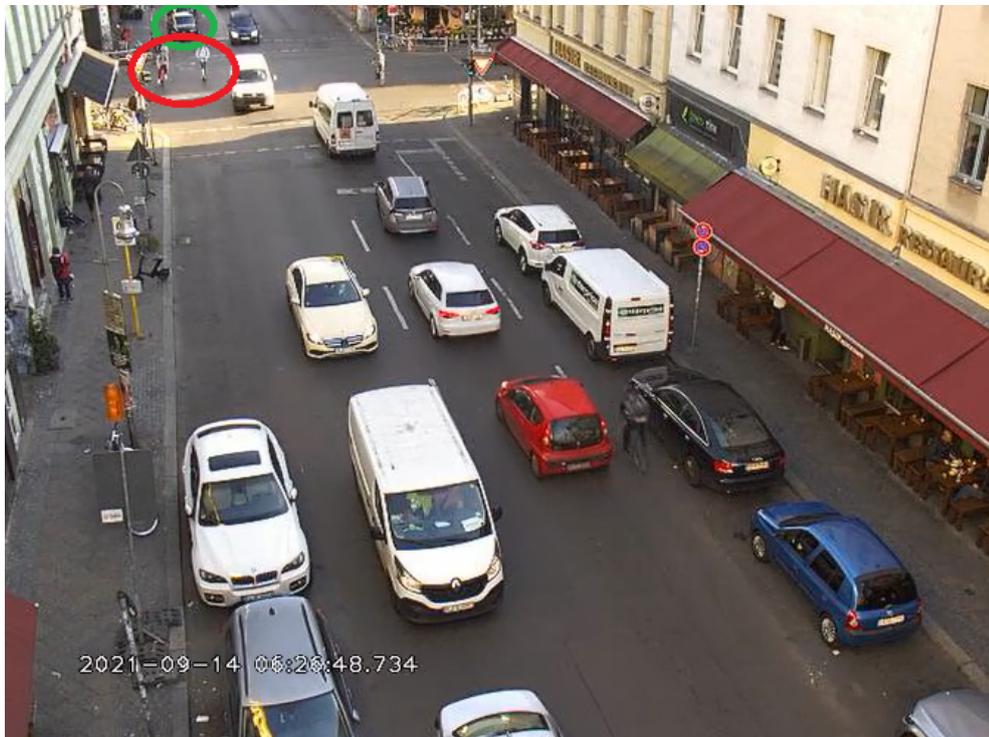


Abbildung 4.7.: Beispielhafte Anfahrsituation bei Beginn einer Grünphase für die in Nord-Süd-Richtung fahrenden Verkehrsteilnehmenden am nördlichen Kreuzungsarm mit rot umrahmten VRU und grün umrahmtem parkenden Pkw. Eigener Bildschirmausschnitt und eigene Darstellung.

orientieren, während sich aus nördlicher Richtung überholende Pkw auf einer weiter innen liegenden Fahrspur bewegen, insbesondere in Vorausschau auf die parkenden Pkw, die in Abbildung 4.7 am unteren linken Bildrand zu erkennen sind. Auch hier liegt ein dauerhafter lateraler Versatz der Trajektorien vor.

Gleiches gilt für Verkehrsteilnehmende, die sich in Süd-Nord-Richtung bewegen und sich frühzeitig nach der geplanten Fahrtrichtung an der Kreuzung orientieren. Findet die Überholinteraktion beim Annähern an die Kreuzung beispielsweise zwischen einem später rechtsabbiegenden und einem geradeausfahrenden Verkehrsteilnehmenden statt fahren diese in der Regel bereits beim Eintreten in den Erfassungsbereich auf leicht versetzten Fahrspuren.

Als letzter Grund ist die teilweise verspätete Objekterkennung anzuführen (vgl. Abschnitt 3.2.3). Wird ein Interaktionspartner erst relativ spät vor Beginn eines Überholvorgangs detektiert, wenn bereits ein Spurwechsel des überholenden Verkehrsteilnehmenden eingeleitet wurde, kann ebenfalls keine TTC ermittelt werden.

Zu beachten ist außerdem, dass es sich bei 51 der 68 Interaktionsvorgänge ohne TTC um Überholvorgänge zwischen VRU handelt, obwohl diese nur einen Anteil von etwa einem Drittel der ausgewerteten Vorgänge ausmachen. Dies ist mit der vergleichsweise geringen Breite von VRU gegenüber Pkw und Nkw zu begründen. Selbst bei einer Folgefahrt von VRU liegt aufgrund dieser geringen Breite selten ein direkter Kollisionskurs vor, während es unter Beteiligung von Pkw und Nkw mit einer deutlich größeren Breite der Trajektorien häufiger zu Überlagerungen der Kurse kommt.

### Quantitative Auswertungsergebnisse der TTC

Die Verteilung der 262 ermittelten MTTC-Werte ist im folgenden Histogramm in Abbildung 4.8 verdeutlicht.

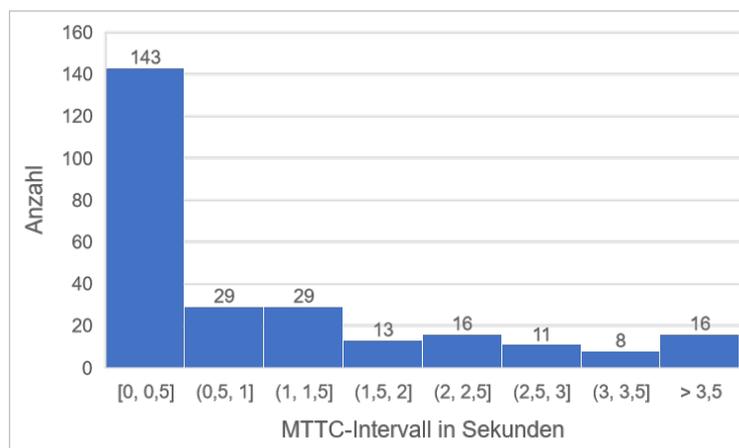


Abbildung 4.8.: Verteilung der MTTC als Anzahl der pro Intervall vorliegenden Interaktions-MTTC. Eigene Darstellung.

Aus der Literaturrecherche in Kapitel 2.3.2 geht hervor, dass 1,5 Sekunden als Grenzwert für die Kritikalität der TTC als SMOs bereits einen vergleichsweise geringen Wert darstellen. Im vorliegenden Anwendungsfall ist dieser Grenzwert durchaus als realistisch anzunehmen, da sich die Verkehrsteilnehmenden mit durchschnittlich geringer Geschwindigkeit bewegen und viele Überholvorgänge bei verlangsamer Fahrt im Kreuzungsbereich auftreten. Laut der ermittelten MTTC-Werte wird diese Grenze für die vorliegenden Daten allerdings in 201 der 262 Fälle unterschritten; der durchschnittliche MTTC-Wert liegt bei ca. 0,97 Sekunden. Dies würde bedeuten, dass bei etwa 60 Prozent der Überholinteraktionen (bezogen auf die 330 ausgewerteten Vorgänge) ein hohes Risiko eines Auffahrunfalls bei der Annäherung der Interaktionspartner besteht. Aus der Beurteilung der Überholvorgänge anhand des Videomaterials geht dies nicht hervor.

Das Histogramm zeigt, dass über die Hälfte der MTTC-Werte im ersten dargestellten Intervall von 0,00 bis 0,50 Sekunden liegen. In 57 dieser Fälle liegt die MTTC sogar im Intervall von 0,00 bis 0,10 Sekunden. Eine TTC von null (oder nahezu null Sekunden, wenn leichte Abweichungen in der Datenerfassung berücksichtigt werden) bedeutet bei einer Folgefahrt einen Auffahrunfall. Aus Abgleich mit dem Videomaterial sind derart kritische Situationen in keinem Interaktionsfall zu erkennen; in den meisten Fällen fahren die Verkehrsteilnehmenden sogar mit deutlichem lateralen Versatz. Es muss folglich angenommen werden, dass diese Werte durch starke Messungenauigkeiten entstehen. Bei der Überprüfung einer Stichprobe der betroffenen Trajektoriendaten kann festgestellt werden, dass für viele Trajektorien in den Messdaten beispielsweise keine Werte für die Fahrtrichtung vorliegen (heading, vgl. Abschnitt 3.2.1), die ausschlaggebend für den prädizierten Trajektorienverlauf ist. In anderen Fällen liegen Messwerte des Geschwindigkeitsbetrags in Höhe von mehreren tausend Metern pro Sekunde vor. Deshalb werden MTTCs unter 0,50 Sekunden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Unter der Beibehaltung von 1,5 Sekunden als realistischem Grenzwert für die TTC im vorliegenden Anwendungsfall verbleiben 58 Fälle mit einer MTTC im Intervall von 0,50 bis 1,50 Sekunden, die anhand des Videomaterials überprüft werden. In 26 der 58 Fälle ist anhand der Videoaufzeichnungen kein Kollisionskurs erkennbar. Für die übrigen 32 Fälle lassen sich aus dem Videomaterial Gründe für das Feststellen einer TTC ermitteln, da erkennbare Kollisionskurse vorliegen. Hier lassen sich unabhängig von den konkreten Zahlenwerten häufig auftretende Situationen beschreiben, in denen das Risiko einer Kollision der Interaktionspartner im Rahmen eines Überholvorgangs besteht. Diese werden im folgenden Abschnitt erläutert.

### **Ursachen für eine geringe TTC während einer Überholinteraktion**

Die häufigste festgestellte Ursache ist das dichte Auffahren der überholenden Verkehrsteilnehmenden beim Annähern an die zu überholenden Verkehrsteilnehmenden. Durch diesen geringen longitudinalen Abstand besteht das Risiko eines Auffahrunfalls, wenn es zu plötzlichen Bewegungsänderungen der vorausfahrenden Verkehrsteilnehmenden kommt, bevor zum Überholvorgang ausgeschert wird. Aus dem Videomaterial ist die Kritikalität der vorliegenden Fälle als gering zu beurteilen, da nur geringe Geschwindigkeiten gefahren werden und keine starken oder plötzlichen Bremsmanöver der zu überholenden Verkehrsteilnehmenden auszumachen sind. Dennoch ist im Hinblick auf derartige Verkehrssituationen zu beachten, dass eine geringe TTC durch geringe longitudinale Abstände beispielsweise im Fall eines Sturzes oder plötzlichen Bremsens der vorausfahrenden Verkehrsteilnehmenden eine hohe Kritikalität entwickeln kann.

Eine weitere Ursache ist aus Interaktionen zu schließen, bei denen die Fahrtrichtung beider Ver-

kehrsteilnehmenden während des Überholvorgangs ähnlich orientiert ist. Dies tritt in den meisten Fällen auf, wenn während des Überholvorgangs beide Verkehrsteilnehmenden ein am Fahrbahnrand parkenden Pkw umfahren. Eine Beispielsituation ist in Abbildung 4.9 dargestellt.



Abbildung 4.9.: Beispiel für den zeitlichen Ablauf einer Interaktion mit Vorliegen eines Kollisionskurses während des Überholvorgangs durch das zeitgleiche Umfahren eines Hindernisses durch beide rot umrahmten Interaktionspartner. Eigener Bildschirmausschnitt und eigene Darstellung.

Hier ist in zeitlicher Abfolge zu sehen, wie sich die rot umrahmten Verkehrsteilnehmenden annähern und während des Überholvorgangs ihre Bewegungen zur Fahrbahnmitte ausgerichtet sind. Die TTC bezieht sich hier folglich nicht auf einen potentiellen Auffahrunfall vor der Überholinteraktion, sondern eine mögliche Kollision in deren Verlauf durch die von beiden Interaktionspartnern ausgeführte Ausweichbewegung. Ähnliche Situationen ergeben sich durch schwankende Fahrweisen der überholten Verkehrsteilnehmenden. Hier tritt ebenfalls ein Kollisionskurs auf, wenn diese sich während des Überholvorgangs durch Schwankungen kurzzeitig zur Fahrbahnmitte in Richtung der überholenden Verkehrsteilnehmenden bewegen. Die Kritikalität dieser Interaktionen kann anhand des Videomaterials generell als gering eingestuft werden. Im Falle des Umfahrens des parkenden Pkw halten die Überholenden in jeder betrachteten Situation ausreichenden Abstand ein. Die Schwankungen in der Fahrweise sind ebenfalls durch ihre erkennbar geringe Ausprägung sowie ausreichende seitliche Abstände als unkritisch zu bewerten.

Eine letzte mehrfach auftretende Ursache ergibt sich, wenn die überholenden Verkehrsteilnehmenden schon vor Abschluss des Überholvorgangs beginnen, vor den überholten Verkehrsteilnehmenden einzuscheren. Auch hier ist die TTC kein Kritikalitätsmaß für Auffahrunfälle vor Beginn, sondern potentielle Kollisionen nach Abschluss des Überholvorgangs. Situationen mit tatsächlich hoher Kritikalität gehen aus dem Videomaterial auch in diesem Fall aber nicht hervor, da in keinem Fall starke Geschwindigkeitsverringerungen oder Ausweichbewegungen der überholten Verkehrsteilnehmenden zur Vermeidung einer Kollision zu erkennen sind.

Im Folgenden werden in den Abbildungen 4.10 und 4.11 zwei beispielhafte Interaktionen mit einer im Videobild tatsächlich wahrnehmbar hohen Kritikalität dargestellt.

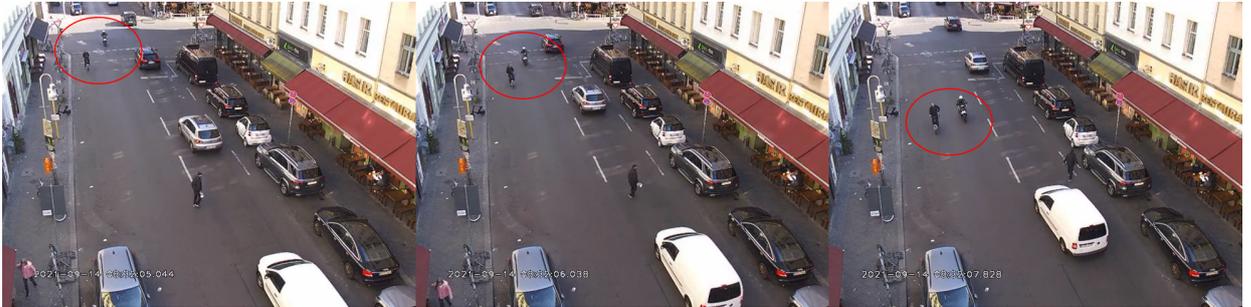


Abbildung 4.10.: Beispiel für den zeitlichen Ablauf einer Interaktion mit Vorliegen eines Kollisionskurses der rot umrahmten Interaktionspartner durch die zur Fahrbahnmitte ausgerichtete Bewegung des Fahrrads. Eigener Bildschirmausschnitt und eigene Darstellung.



Abbildung 4.11.: Beispiel für den zeitlichen Ablauf einer Interaktion mit Vorliegen eines Kollisionskurses der rot umrahmten Interaktionspartner durch Einbiegen eines Fahrrads aus dem westlichen Kreuzungsarm. Eigener Bildschirmausschnitt und eigene Darstellung.

Im ersten Beispiel bewegen sich die Trajektorien des zur Fahrbahnmitte orientierten Fahrrads und des sich von hinten nähernden Motorrads aufeinander zu (linker Bildausschnitt), wodurch ein Kollisionskurs entsteht. Durch einen im mittleren Bildausschnitt erkennbaren Schulterblick registriert der Radfahrende den Interaktionspartner und hebt den Kollisionskurs durch die Korrektur seiner Bewegungsrichtung zum Fahrbahnrand auf (rechter Bildausschnitt). Der ermittelte MTTC-Wert liegt bei 1,17 Sekunden.

Im zweiten Beispiel entsteht die kritische Situation durch das Einbiegen eines Radfahrenden aus dem westlichen Kreuzungsarm in die Nord-Süd-Richtung der Fahrbahn, wobei ein Kollisionskurs mit einem bereits in Nord-Süd-Richtung fahrenden Radfahrenden entsteht (linker Bildausschnitt). Die Kollision wird durch eine Ausweichbewegung des (aus Sicht des Betrachtenden) rechten Verkehrsteilnehmenden verhindert (mittlerer Bildausschnitt), bevor dieser einen Überhol-

vorgang durchführt (rechter Bildausschnitt). Die gemessene MTTC beträgt 0,63 Sekunden.

Zusammengefasst besitzen die für die vorliegenden Daten ermittelten TTC-Werte auf rein quantitativer Ebene nur eine geringe Aussagekraft. Allerdings konnten in Kombination mit der Auswertung des Videomaterials plausible Gründe für die nicht mögliche Ermittlung einer TTC sowie Ursachen und Analysen der Entstehung potentiell kritischer Interaktionen im Rahmen von Überholvorgängen herausgestellt werden. Diese umfassen das dichte Auffahren der überholenden Verkehrsteilnehmenden vor dem Ausscheren, parallel ausgeführte Ausweichvorgänge der Interaktionspartner sowie das frühe Einscheren vor die überholten Verkehrsteilnehmenden nach deren Passieren.

Alle beschriebenen Szenarien konnten sowohl unter Beteiligung motorisierter Verkehrsteilnehmender als auch bei Interaktionen zwischen VRU beobachtet werden. Da in lediglich zwei der analysierten Situationen E-Scooter-Nutzende involviert waren lassen sich an dieser Stelle keine Aussagen über möglicherweise abweichende Verhaltensweisen dieser Verkehrsteilnehmenden treffen.

#### **4.2.2. Seitlicher Überholabstand**

Die seitlichen Überholabstände stellen nach Abschnitt 2.4.2 einen besonders kritischen Parameter bei Interaktionen zwischen motorisierten Verkehrsteilnehmenden und VRU dar. Für diese Interaktionen gilt in Deutschland nach der StVO im innerstädtischen Bereich, in dem die vorliegenden Messdaten erhoben wurden, ein einzuhaltender Mindestabstand von 1,5 Metern [47]. In Abschnitt 2.2.2 ist außerdem ihre Relevanz für die Beurteilung von Unfallsituationen im Zuge von Überholvorgängen zwischen VRU verdeutlicht worden. Hier wurde festgehalten, dass der einzuhaltende Mindestabstand von den überholenden Verkehrsteilnehmenden so zu wählen ist, dass insbesondere die überholten Verkehrsteilnehmenden nicht gefährdet werden. Dieser könne prinzipiell geringer sein als bei Interaktionen mit dem motorisierten Verkehr. Ein konkreter Wert wird durch die StVO jedoch nicht vorgegeben. [48] [49] [52]

#### **Auswertung des seitlichen Überholabstands bei Interaktionen zwischen vulnerablen Verkehrsteilnehmenden**

Der seitliche Abstand wird für die Interaktionen zwischen VRU über die Differenz der Koordinaten der Mittelpunkte der Verkehrsteilnehmenden ausgewertet (vgl. Abschnitt 3.2.1). Diese lässt sich mit einer bestehenden Funktion in TASI ermitteln, die die Standardfunktion *norm* des *linalg*-Moduls der Python-Bibliothek NumPy [136] verwendet. Die Funktion gibt für jeden Zeitstempel, der in beiden Trajektorien enthalten ist, den Abstand der Mittelpunktkoordinaten zurück. Aus die-

sen Abständen wird der Minimalwert ermittelt, der den geringsten auftretenden Abstand zwischen den beiden Interaktionspartnern angibt. Folglich ist bei den ermittelten minimalen Abständen zu berücksichtigen, dass der tatsächliche Abstand zwischen den Abmessungen der Körper der Verkehrsteilnehmenden gegebenenfalls nach unten abweicht, da die räumliche Differenz zwischen den äußeren Körperabmessungen geringer ist als zwischen den Körpermittelpunkten. Allerdings handelt es sich hierbei im Hinblick auf die Genauigkeit der Datenerfassung um vernachlässigbare Unterschiede.

In etwa 30 Fällen sind in den Trajektorien Daten der ersten Hälfte des Messzeitraums durch eine fehlerhafte Kalibrierung der Erfassung keine Mittelpunktkoordinaten enthalten. Für diese wird alternativ der Vergleich der vorderen Koordinaten durchgeführt. Diese befinden sich in der jeweiligen Frontmitte des Objekts, sind gegenüber der Mittelpunkte folglich lediglich longitudinal verschoben. Aufgrund der geringen Abmessungen der analysierten Verkehrsobjekte ist die Vergleichbarkeit der Werte gegeben. Dies wird durch den Abgleich der Werte für Objekte mit beiden vorhandenen Koordinaten bestätigt.

Von 112 Überholinteraktionen (vgl. Abschnitt 4.1.3) konnten sieben aufgrund von fehlerhafter Datenerfassung nicht hinsichtlich des seitlichen Abstands ausgewertet werden. Die Verteilung der Überholabstände der verbleibenden 105 Interaktionen ist im folgenden Histogramm 4.12 dargestellt.

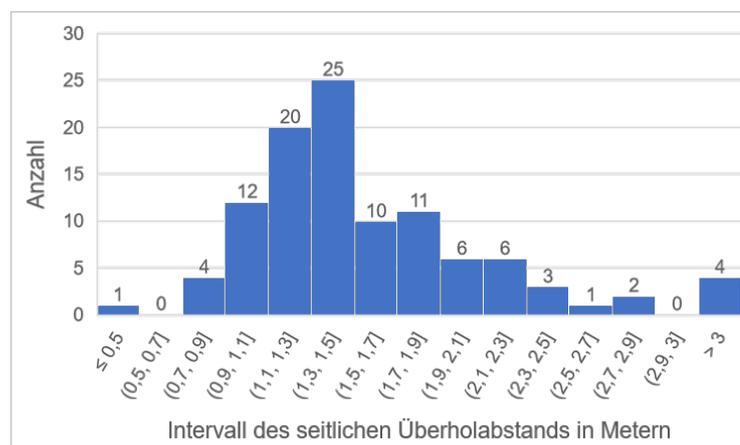


Abbildung 4.12.: Verteilung der seitlichen Überholabstände als Anzahl der pro Intervall vorliegenden Abstände bei Interaktionen zwischen VRU. Eigene Darstellung.

Aus der Auswertung geht hervor, dass in 62 der 105 Fälle der für Überholvorgänge von MRU maßgebliche seitliche Abstand von 1,5 Metern unterschritten wird. Die vier Interaktionen, in

denen Überholabstände von mehr als drei Metern ermittelt wurden, werden nicht weiter berücksichtigt, da diese auf unterbrochene Objekterfassungen zurückzuführen und anhand des Videomaterials nicht zu bestätigen sind. Damit verbleiben 101 Fälle, für die der Mittelwert des seitlichen Abstands bei 1,5 Metern liegt.

Da für Interaktionen zwischen VRU generell ein Sicherheitsabstand unter 1,5 Metern als ausreichend gilt sowie in der Rechtsprechung ein Sicherheitsabstand von einem Meter als hinreichend erachtet wurde, wird als Grenzwert für die weitere Analyse der dazwischenliegende Wert von 1,25 Metern festgelegt. Dies berücksichtigt die möglicherweise vom Messwert nach unten bestehenden Abweichungen. Die in diesem Intervall enthaltenen 30 Interaktionen (etwa 30 Prozent der 101 Fälle) werden anhand des Videomaterials auf ihre erkennbare Kritikalität untersucht.

15 der untersuchten Situationen können anhand des Videomaterials als unkritisch bewertet werden. Die dabei eingehaltenen Abstände betragen nach den Messergebnissen zwischen 0,81 und 1,25 Metern. Unkritische Überholvorgänge bei relativ geringem eingehaltenen seitlichen Abstand zeichnen sich vor allem durch zwei Faktoren aus: eine sichere Fahrweise der Interaktionspartner, insbesondere ohne Schwankungen in der Bewegung des überholten VRU, sowie die Abwesenheit von Hindernissen durch dritte Verkehrsobjekte während des Überholvorgangs. Dies wird durch die Betrachtung potentiell kritischer Situationen verdeutlicht.

Eine nicht tatsächlich vorhandene, aber hohe potentielle Kritikalität der Überholsituation kann in elf Fällen festgestellt werden. Die Ursachen dafür sind folgende:

- Die überholten Verkehrsteilnehmenden zeichnen sich durch eine unsichere Fahrweise aus.
  - Die zu überholenden Verkehrsteilnehmenden bewegen sich vor dem Überholvorgang auf einer wahrnehmbaren Schlangenlinie.
  - Während des Überholvorgangs zeigen die überholten Verkehrsteilnehmenden schwankende Fahrbewegungen.
- Der Überholvorgang wird durch dritte Verkehrsobjekte beeinflusst.
  - Der Überholvorgang findet zwischen dem Fahrbahnrand und einem an den Interaktionspartnern vorbeifahrenden Bus statt.
  - Während des Überholvorgangs setzen die überholten Verkehrsteilnehmenden selbst zu einem Überholvorgang eines vorausfahrenden Verkehrsteilnehmenden an und kreuzen die Überholspur des bereits überholenden VRU.
  - Während des Überholvorgangs muss von beiden Interaktionspartnern ein gemeinsames Hindernis umfahren werden, beispielsweise auf die Fahrbahn tretende Zufußge-

hende oder am Fahrbahnrand parkende Pkw, wobei die überholten Verkehrsteilnehmenden auf die Überholspur ausweichen.

Eine beispielhafte Situation für letztere genannte Ursache ist in der folgenden Abbildung 4.13 dargestellt.



Abbildung 4.13.: Beispiel für den zeitlichen Ablauf eines Überholvorgangs der rot umrahmten Interaktionspartner, der durch dritte Verkehrsteilnehmende (gelb und grün umrahmt) beeinflusst wird. Eigener Bildschirmausschnitt und eigene Darstellung.

Während der Überholinteraktion der rot umrahmten VRU tritt zunächst eine Person auf die Fahrbahn, wodurch das zu überholende Fahrrad seine Fahrspur in Richtung der Fahrbahnmitte verlagert (linker Bildausschnitt). Das überholende Fahrrad befindet sich noch auf einer longitudinal nach hinten versetzten Position und kann seine Fahrspur ebenfalls anpassen. Im Anschluss ordnet sich ein weiteres Fahrrad vor den Interaktionspartnern ein, dem beide ausweichen müssen, wodurch sich deren ohnehin als gering berechneter lateraler Abstand zusätzlich verkleinert.

Anhand des Videomaterials konnten zwei Situationen mit tatsächlich wahrnehmbarer hoher Kritikalität identifiziert werden, die durch sichtbar stattfindende Bremsmanöver und Ausweichbewegungen gekennzeichnet sind. Bei einer der beiden Situationen handelt es sich um den in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen und in Abbildung 4.11 dargestellten Fall. Die zweite Situation ist in der folgenden Abbildung 4.14 dargestellt.

Hier ist zu sehen, wie sich das überholte Fahrrad in Richtung der Fahrbahnmitte orientiert, um den am Fahrbahnrand geparkten Pkw zu umfahren, und dabei die Fahrspur des überholenden Fahrrad kreuzt (linker und mittlerer Bildausschnitt). Eine Kollision wird durch wahrnehmbare Ausweichbewegungen beider Fahrräder verhindert (rechter Bildausschnitt).

Zuletzt konnten zwei atypische Interaktionen ausgemacht werden, bei denen der Überholvorgang rechts durchgeführt wird. Ein Beispiel ist in Abbildung 4.15 zu sehen.



Abbildung 4.14.: Beispiel für den zeitlichen Ablauf eines kritischen Überholvorgangs mit geringem lateralen Abstand der rot umrahmten Interaktionspartner durch das Umfahren eines Hindernisses. Eigener Bildschirmausschnitt und eigene Darstellung.



Abbildung 4.15.: Beispiel für den zeitlichen Ablauf eines atypischen und kritischen Überholvorgangs der rot umrahmten Interaktionspartner durch linkes Überholen und das Umfahren eines Hindernisses. Eigener Bildschirmausschnitt und eigene Darstellung.

Die Überholinteraktion beginnt nach dem Anfahren an der Lichtsignalanlage am nördlichen Kreuzungsarm und wird von dem auf der rechten Seite fahrenden Fahrrad initiiert (linker und mittlerer Bildausschnitt). Eine potentielle Kritikalität entsteht, wie im zuvor beschriebenen Fall, durch das anschließende Umfahren des geparkten Pkw.

Weiterhin ist der Einfluss des Gegenverkehrs in den 30 Situationen untersucht worden. In 17 der Fälle hätte aufgrund der Abwesenheit von Gegenverkehr oder trotz dessen Anwesenheit für die überholenden Verkehrsteilnehmenden zusätzlicher Raum für laterale Bewegungen zur Verfügung gestanden. Dies ist, wie bereits in Abschnitt 2.4.3 aufgeführt, durch die geringere Breite von VRU im Vergleich zu zweispurigen MRU begründet, die die Nutzung der Fahrbahnbreite in anderem Maße ermöglicht. In den analysierten Situationen ist dieser verfügbare Raum nicht zur Vergrößerung des seitlichen Abstands ausgenutzt worden. Anhand des Videomaterials sind keine weiteren Faktoren auszumachen, die den Überholabstand beeinflussen und so die mangelnde Raumnutzung erklären können.

Zusammengefasst lässt sich bezüglich der hier untersuchten Überholinteraktionen zwischen VRU festhalten, dass ein geringer seitlicher Abstand allein keine Ursache für die Kritikalität eines Vorgangs darstellt. Potentiell kritische Situationen ergeben sich stattdessen in Kombination mit zusätzlichen Faktoren wie Hindernissen auf der Fahrbahn oder unvorhergesehene Fahrbewegungen der Verkehrsteilnehmenden. In diesen Fällen tragen geringe seitliche Abstände zur Kritikalität der Situationen bei, da sie im Falle von plötzlichen oder unvermittelten (Ausweich-)Bewegungen der überholten Verkehrsteilnehmenden einen entscheidenden Einfluss darauf haben, ob diese zu einer Kollision der Interaktionspartner führen. Außerdem ist auffällig, dass in über der Hälfte der im Videobild analysierten Situationen der verfügbare laterale Raum durch die überholenden Verkehrsteilnehmenden nicht zur Vergrößerung des Überholabstands genutzt wird.

Im Hinblick auf die Beteiligung von E-Scootern an kritischen Überholvorgängen lassen sich anhand der vorliegenden Daten keine validen Aussagen treffen. 86 der 101 analysierten Interaktionen fanden ohne Beteiligung eines E-Scooters statt, von denen 26 im kritischen Bereich des Sicherheitsabstands von unter 1,25 Metern liegen (ca. 30 Prozent). 15 Interaktionen (ca. 27 Prozent) fanden unter Beteiligung eines E-Scooters statt. Vier dieser Vorgänge liegen im kritischen Bereich. Zwei dieser Situationen sind aufgrund der schwankenden Fahrweise der E-Scooter-Nutzenden als potentiell kritisch eingestuft worden. Aufgrund der geringen Anzahl der analysierten Situationen können die vorliegenden Interaktionen allerdings nicht als repräsentativ gelten.

### **Auswertung des seitlichen Überholabstands bei Interaktionen zwischen Kraftfahrzeugen und vulnerablen Verkehrsteilnehmenden**

Zur Bestimmung des seitlichen Abstands bei Überholvorgängen von VRU durch MRU werden ebenfalls die Mittelpunktkoordinaten der Interaktionspartner verwendet. Aufgrund der größeren Abmessungen der untersuchten Verkehrsteilnehmenden, vor allem hinsichtlich ihrer Breite, muss hier berücksichtigt werden, dass es deshalb zu einer deutlichen Abweichung nach oben der gemessenen Werte vom tatsächlichen Überholabstand kommen kann (insbesondere im Vergleich zu den zuvor untersuchten VRU-Interaktionen).

Von 218 nutzbaren Vorgängen (vgl. Abschnitt 4.1.3) sind nur für 103 Vorgänge Mittelpunktkoordinaten in den Trajektorien enthalten. Durch die höheren Objektanmessungen ist an dieser Stelle die Vergleichbarkeit der Messergebnisse über Mittelpunkt- und alternative vordere Koordinaten nicht mehr gegeben. Deshalb werden die folgenden Analysen auf 103 Überholinteraktionen mit vorhandenen Mittelpunktkoordinaten eingegrenzt, die fast ausschließlich im rechten Erfassungs-

bereich stattfinden. Die Verteilung der Überholabstände dieser Interaktionen ist im folgenden Histogramm 4.16 dargestellt.

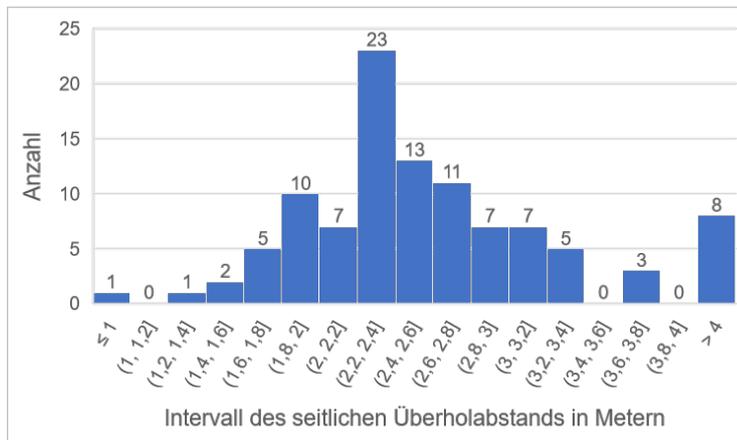


Abbildung 4.16.: Verteilung der seitlichen Überholabstände als Anzahl der pro Intervall vorliegenden Abstände bei Interaktionen zwischen MRU und VRU. Eigene Darstellung.

Die acht Messwerte von über vier Metern können anhand des Videomaterials nicht bestätigt werden und sind auf Fehler in der Objekterfassung zurückzuführen.

Unabhängig von den tatsächlichen eingehaltenen Abständen werden die 69 Situationen mit gemessenen Werten unter 2,7 Metern anhand des Videomaterials analysiert und auf potentielle Gründe für das dichte Annähern der MRU an die VRU untersucht. Dieser Grenzwert wird unter Berücksichtigung des in der StVO vorgeschriebenen einzuhaltenden Abstands von 1,5 Metern sowie der Abweichung der tatsächlich eingehaltenen Abstände von den Messwerten festgelegt. Insbesondere wird die Beeinflussung der Situationen durch das Auftreten von Gegenverkehr betrachtet.

Für lediglich 10 der 69 Situationen wird der Überholabstand der MRU bezüglich der vorgegebenen 1,5 Meter als ausreichend bewertet. An dieser Stelle wird erneut angemerkt, dass es sich bei dieser Bewertung um eine subjektive optische Einschätzung des Videobildes durch die Verfasserin handelt und keine abschließende Prüfung der Abstände stattfinden kann. Alle diese Situationen zeichnen sich durch die Abwesenheit von Gegenverkehr aus.

Für weitere 21 Situationen wird der Abstand als möglicherweise ausreichend eingeschätzt, wobei in 15 dieser Fälle ebenfalls keine Beeinflussung durch Gegenverkehr stattgefunden hat. Andere Gründe für die nur knappe Einhaltung des vorgeschriebenen Abstands sind aus den Videobildern in keinem Fall erkennbar.

Folglich wird in 38 der betrachteten 69 Fälle (ca. 55 Prozent) nach Einschätzung durch das Videomaterial der rechtlich vorgeschriebene Abstand durch die Fahrzeugführenden nicht eingehalten. Auch hier liegt in 18 Situationen keine Beeinflussung des Überholvorgangs durch Gegenverkehr oder andere den Abstand einschränkende Faktoren vor. Fahrzeugführende wären folglich in der Lage gewesen, die Überholvorgänge mit deutlich größerem als dem gewählten Abstand auszuführen, ohne dass potentiell kritische Interaktion mit entgegenkommenden Verkehrsteilnehmenden daraus entstehen.

Für 12 der 38 Fälle wird die potentielle Kritikalität als besonders hoch eingeschätzt. In der folgenden Abbildung 4.17 sind beispielhaft drei dieser Fälle im linken Erfassungsbereich dargestellt.



Abbildung 4.17.: Drei Beispiele für kritischen Überholvorgänge der rot umrahmten Interaktionspartner im linken Erfassungsbereich aufgrund der Einhaltung eines geringen lateralen Abstands durch die überholenden Pkw. Eigener Bildschirmausschnitt und eigene Darstellung.

Im linken Bildschirmausschnitt orientiert sich die Fahrtrichtung des Fahrrads zur Fahrbahnmitte, um die am linken Bildrand erkennbaren geparkten Fahrzeuge zu umfahren. Das überholende Fahrzeug wird durch den entgegenkommenden weißen Transporter beeinflusst. Die Unterschreitung des vorgeschriebenen Sicherheitsabstandes ist deutlich erkennbar und der Überholvorgang hätte nach den Vorgaben der StVO nicht durchgeführt werden dürfen. Eine ähnliche Situation mit analogen Gegebenheiten ist im mittleren Bildausschnitt zu sehen. Die Situation im rechten Bildausschnitt enthält als zusätzliches kritisches Element die geöffnete Fahrertür eines geparkten Pkw. Das Fahrrad muss seine Geschwindigkeit verlangsamen, bis der Überholvorgang abgeschlossen ist, und kann erst im Anschluss die geöffnete Tür umfahren. Vergleichbare Situationen treten in sieben der 38 Fälle mit nicht ausreichendem Seitenabstand auf, obwohl insgesamt nur zehn Interaktionen des linken Erfassungsbereich im Video untersucht wurden.

In Abbildung 4.18 sind zwei beispielhafte kritische Situationen im rechten Erfassungsbereich dargestellt.



Abbildung 4.18.: Zwei Beispiele für kritischen Überholvorgänge der rot umrahmten Interaktionspartner im rechten Erfassungsbereich aufgrund der Einhaltung eines geringen lateralen Abstands durch die überholenden Pkw. Eigener Bildschirmausschnitt und eigene Darstellung.

Im linken Bildausschnitt ist deutlich ein extrem geringer lateraler Abstand zwischen den Verkehrsteilnehmenden auszumachen. Das Fahrrad muss seine Geschwindigkeit verringern, um im Anschluss an den Überholvorgang den Baustellenbereich am unteren Bildrand umfahren zu können. Der überholende Transporter wird in der Wahl des Seitenabstands nicht durch entgegenkommende Verkehrsteilnehmende beeinflusst. Es hätte demnach die Möglichkeit bestanden, den Überholvorgang StVO-konform durchzuführen.

Im Gegensatz dazu hätte der im rechten Bildausschnitt abgebildete Vorgang nach StVO-Vorgaben nicht durchgeführt werden dürfen, da hier trotz des geringen Überholabstands zusätzlich eine Gefährdung des Gegenverkehrs resultiert. Zwischen den grün umrahmten entgegenkommenden Radfahrenden findet eine Überholinteraktion statt, die vom Überholenden durch scharfes Einscheren beendet werden muss, um dem entgegenkommenden Pkw auszuweichen.

Generell lassen sich für Überholinteraktionen mit MRU-Beteiligung ähnliche Aussagen treffen wie für Interaktionen zwischen VRU. Ein geringer lateraler Abstand trägt maßgeblich zur potentiellen Kritikalität der untersuchten Verkehrssituationen bei, ohne diese alleinig zu verursachen. Auch hier wird durch die Einhaltung kleiner Abstände die Kritikalität von Ausweichbewegungen, unvermittelten Schwankungen oder Richtungswechseln der überholten Verkehrsteilnehmenden erhöht. Diese können beispielsweise durch das Umfahren von Hindernissen, wie öffnende Autotüren oder gesperrte Fahrbahnbereiche, entstehen. In diesen Fällen stellen große Schwankungen in Kombinationen mit kleinen Abständen ein hohes Risiko für Kollisionen zwischen den

Interaktionspartnern dar. Analog zu den VRU-Interaktionen gilt hier, dass in einer Vielzahl der Fälle der mögliche Überholabstand durch den verfügbaren lateralen Raum nicht ausgenutzt wird.

Auch für diesen Abschnitt gilt, dass aufgrund deren geringen Aufkommens keine validen Aussagen über potentiell abweichende Verhaltensweisen in Interaktionen mit E-Scooter-Nutzenden getroffen werden können. Unter den 69 untersuchten Situationen fanden lediglich fünf unter Beteiligung von E-Scootern statt. Besondere Auffälligkeiten konnten hierbei nicht festgestellt werden.

### 4.2.3. Räumliche Häufungspunkte der Überholvorgänge

Im letzten Abschnitt der Analyse der Überholvorgänge erfolgt die Betrachtung der räumlichen Verteilung der Überholinteraktionen im vorliegenden Messraum. Dies erfolgt separat für den linken und rechten Erfassungsbereich. Insbesondere werden diese auf gegebenenfalls auftretende Häufungspunkte untersucht, die potentielle Gemeinsamkeiten aufweisen und sich mit den Analysen der TTC und seitlichen Überholabstände in Verbindung bringen lassen.

#### Linker Erfassungsbereich

In den folgenden Abbildungen 4.19 und 4.20 sind die Koordinaten der Überholvorgänge im linken Erfassungsbereich für Interaktionen mit und ohne MRU-Beteiligung auf einem Kartenausschnitt aus Google Maps [137] aufgetragen. Hierzu wurde die Standardfunktion *hexbin* des *pyplot*-Moduls der Python-Bibliothek Matplotlib verwendet [138]. Sich überlagernde Koordinaten werden hierbei in farblich abgesetzten Hexagonen zusammengefasst.

In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass der Großteil der Überholvorgänge in nord-südliche Fahrtrichtung auftritt (linke Fahrspur im Bild). Dies deckt sich mit Beobachtungen der manuellen Annotation des Videomaterials. Viele Überholinteraktionen kommen zustande, nachdem die Interaktionspartner im Anschluss an eine Wartezeit an der Lichtsignalanlage am nördlichen Kreuzungsarm einen Anfahrvorgang absolvieren. Im Kreuzungsbereich finden Beschleunigungsvorgänge statt, die zu Geschwindigkeitsdifferenzen führen, die wiederum die Überholvorgänge auslösen.

Die vorangegangenen Analysen haben ergeben, dass kritische Situationen sich hierbei hauptsächlich ergeben, wenn die Interaktionspartner die am unteren linken Bildrand erkennbaren parkenden Fahrzeuge umfahren müssen. Wie die Abbildung 4.7 im Abschnitt 4.2.1 zeigt ist dies notwendig, da sich die Fahrspuren der VRU im Rahmen dieser Anfahrvorgänge am Fahrbahnrand orientieren, was zur Folge hat, dass sie sich longitudinal auf den Parkstreifen zubewegen. Erreichen sie diesen, muss eine Ausweichbewegung zur Fahrbahnmitte ausgeführt werden. Anfahrmanöver der

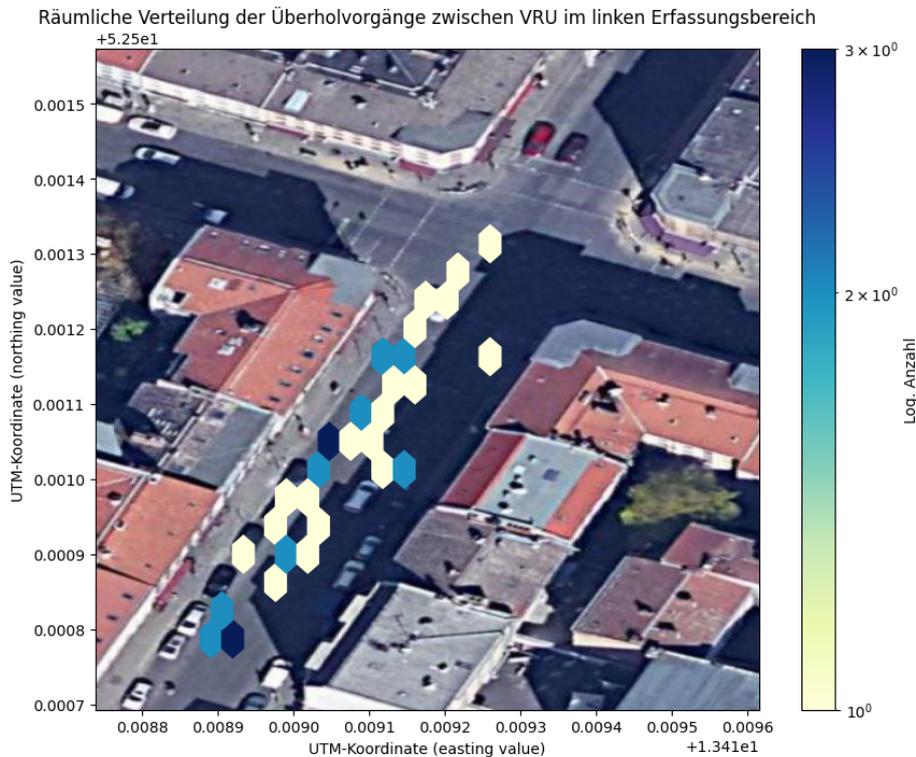


Abbildung 4.19.: Koordinaten der im linken Erfassungsbereich stattfindenden Überholvorgänge zwischen VRU mit Gruppierung überlagernder Koordinaten durch farblich abgesetzte Hexagone. Eigener Bildschirmausschnitt aus [137] und eigene Darstellung.

Pkw finden jedoch bereits lateral in Richtung der Fahrbahnmitte versetzt statt. Vor allem in Abbildung 4.20 sind zwei Häufungsbereiche zu erkennen: einer vor Beginn der geparkten Fahrzeuge und einer neben ihnen. Ersterer kommt durch die geschilderten Anfahr- und Beschleunigungsvorgänge zustande; zweiterer ergibt sich, wenn VRU die parkenden Fahrzeuge umfahren und sich dazu in Richtung der Fahrbahnmitte vor den MRU einordnen.

Zum einen hat die Analyse kleiner MTTC-Werte in Abschnitt 4.2.1 gezeigt, dass es hierbei zur Entstehung eines Kollisionskurses kommen kann, weil sich die Bewegung der VRU zur Fahrbahnmitte verlagert und sich die Trajektorien der Interaktionspartner so potentiell überlagern. Zum anderen ist im Kapitel 4.2.2 festgestellt worden, dass diese Situationen dadurch häufig zu einer Verringerung des lateralen Abstands zwischen den Interaktionspartnern führen, was beispielhaft in den Abbildungen 4.14 und 4.17 dargestellt wurde, wenn die überholenden Verkehrsteilnehmenden das Annähern des überholten Verkehrsteilnehmenden nicht durch die Vergrößerung ihres Überholabstands kompensieren. Beide Fälle treten sowohl bei Überholvorgängen durch MRU als auch durch VRU auf. Begünstigt wird dies durch die häufige Anwesenheit von Pkw auf der Gegenfahrbahn durch Wartezeiten an der Lichtsignalanlage, die teilweise keine Vergrößerung des

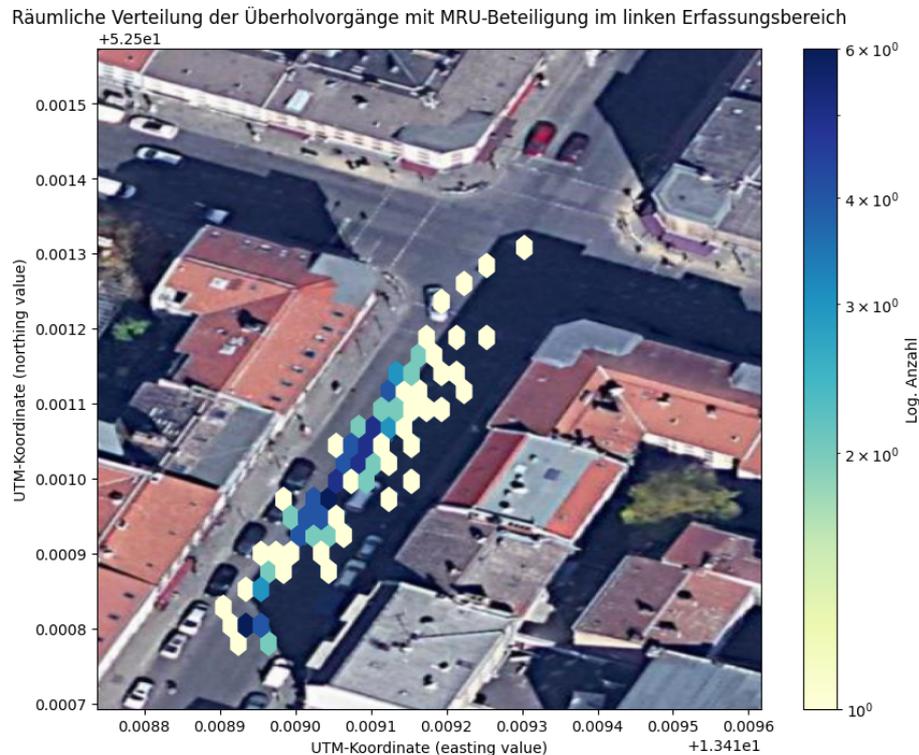


Abbildung 4.20.: Koordinaten der im linken Erfassungsbereich stattfindenden Überholvorgänge unter MRU-Beteiligung mit Gruppierung überlagernder Koordinaten durch farblich abgesetzte Hexagone. Eigener Bildschirmausschnitt aus [137] und eigene Darstellung.

Überholabstands ermöglicht.

Auf der Fahrspur, die in Süd-Nord-Richtung verläuft, sind keine Häufungsbereiche zu erkennen. Außerdem sind hier in den vorigen Abschnitten keine Situationen mit potentiell hoher Kritikalität aus den Daten oder dem Videomaterial hervorgegangen. Dies ist vor allem darin begründet, dass es durch die Lichtsignalanlage zu häufigen Anhaltevorgängen kommt, innerhalb derer keine Überholinteraktionen auftreten. Diese finden zu einem großen Teil bereits im rechten Erfassungsbereich statt, da die Verkehrsteilnehmenden hier eine vergleichsweise lange Strecke ohne Unterbrechung durch Einmündungen oder Verkehrsbeeinflussungen zurücklegen. Dieser Bereich wird im Folgenden betrachtet.

### Rechter Erfassungsbereich

Die Koordinaten der Überholvorgänge im rechten Erfassungsbereich sind mit dem oben beschriebenen Verfahren in den folgenden Abbildungen 4.21 und 4.22 aufgetragen.

Die Abwesenheit von Überholvorgängen im äußeren Bereich der im Bild rechten Fahrspur ist durch die teilweise Belegung der Fahrbahn durch die Baustelle im Messzeitraum begründet, die

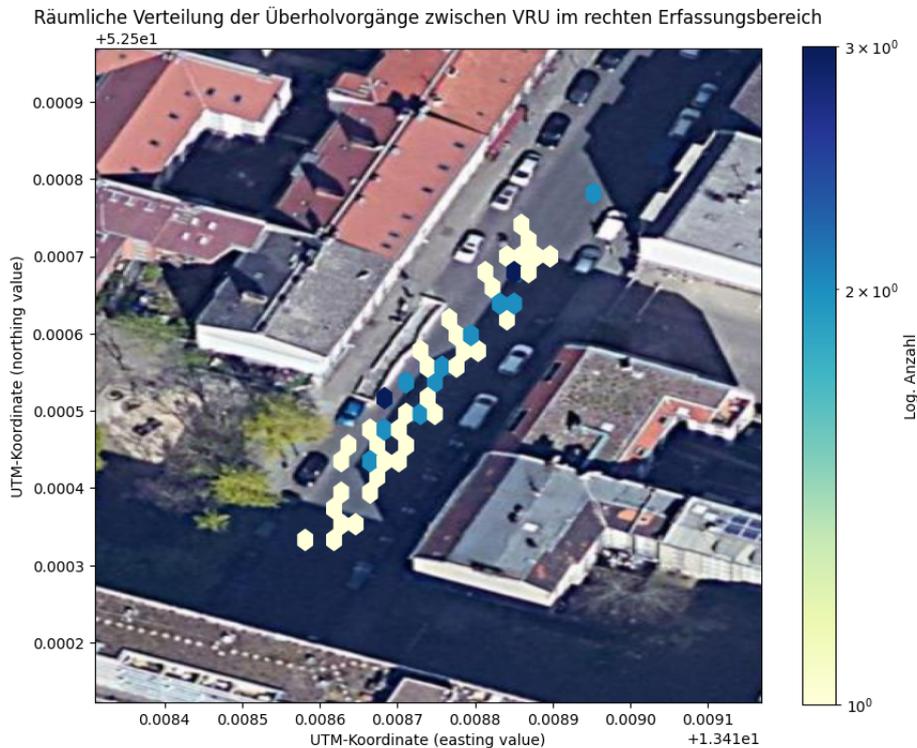


Abbildung 4.21.: Koordinaten der im rechten Erfassungsbereich stattfindenden Überholvorgänge zwischen VRU mit Gruppierung überlagernder Koordinaten durch farblich abgesetzte Hexagone. Eigener Bildschirmausschnitt aus [137] und eigene Darstellung.

auf dem Satellitenbild nicht abgebildet ist.

Überholvorgänge zwischen VRU finden relativ gleichmäßig verteilt über die gesamte Länge des Erfassungsbereichs statt. Wie im vorherigen Abschnitt 4.2.2 beschrieben sind diese nicht oder nur in geringem Maße durch die Verkleinerung der Fahrbahnbreite in ihrer lateralen Bewegung und damit in der Durchführung von Überholmanövern eingeschränkt. Kritische Situationen sind in diesem Bereich nur dann beobachtet worden, wenn der laterale Abstand aus nicht ersichtlichen Gründen nicht zur Einhaltung eines vergrößerten Sicherheitsabstands genutzt wird. Dies gilt für die Fahrbahnen in beide Fahrtrichtungen, die, wie zuvor beschrieben, keine Unterbrechungen oder Hindernisse in der Verkehrsführung aufweisen.

Für Überholinteraktionen mit dem motorisierten Verkehr sind für beide Fahrtrichtungen Häufungsbereiche zu erkennen. In süd-nördlicher Fahrtrichtung (rechte Spur im Bild) befindet sich ein Bereich mit leichter Häufung direkt nach Beginn des Erfassungsbereich. Dies hängt mutmaßlich mit einem in südlicher Richtung außerhalb des Erfassungsbereich liegenden Kreuzungspunkt zusammen, an dem ähnliche Anfahrvorgänge auftreten, wie die im Abschnitt für den linken Be-

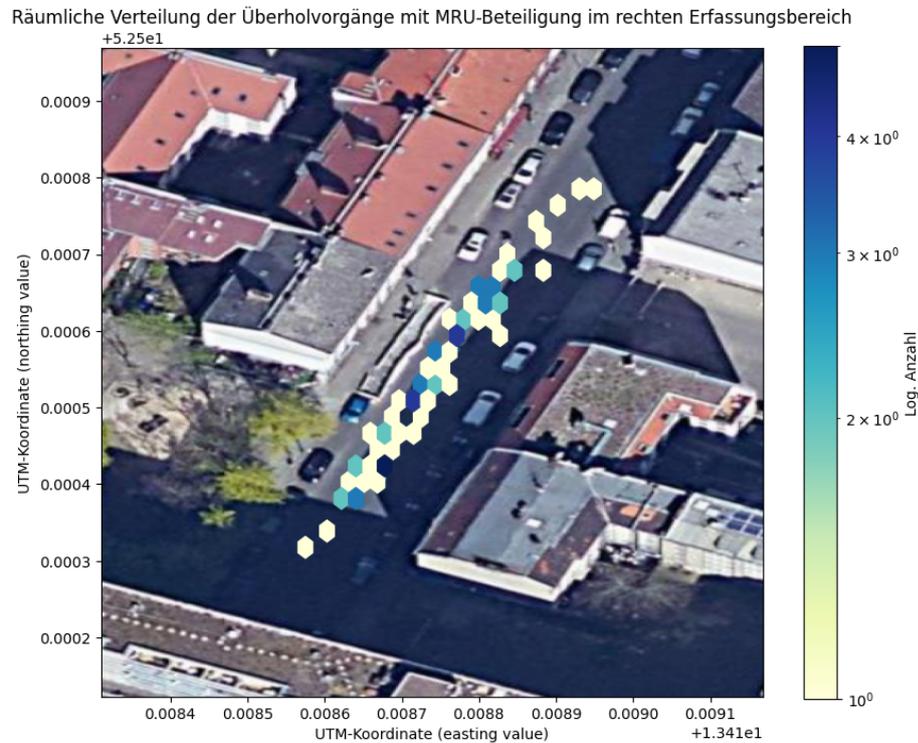


Abbildung 4.22.: Koordinaten der im linken Erfassungsbereich stattfindenden Überholvorgänge unter MRU-Beteiligung mit Gruppierung überlagernder Koordinaten durch farblich abgesetzte Hexagone. Eigener Bildschirmausschnitt aus [137] und eigene Darstellung.

reich beschrieben.

Auch in nord-südliche Fahrtrichtung lassen sich Parallelen zum vorherigen Abschnitt feststellen. Die Bereiche mit einer Häufung der Überholinteraktionen liegen zum einen am Ende des Parkstreifens, der bereits im linken Erfassungsbereich einsetzt. Auch wenn dies anhand des Videomaterials nicht abschließend zu überprüfen ist, da keine Verfolgung der Verkehrsobjekte zwischen den Erfassungsbereichen stattfindet, ist es möglich, dass die motorisierten Verkehrsteilnehmenden aufgrund der verkleinerten Fahrbahnbreite sowie Einschränkungen des lateral verfügbaren Raums durch entgegenkommende Fahrzeuge im Bereich des Parkstreifens auf die Durchführung eines Überholvorgangs verzichtet haben. Dieser wird stattdessen nach dem Ende des Parkstreifens im rechten Erfassungsbereich durchgeführt. Eine besondere potentielle Kritikalität von Vorgängen, die in diesem Häufungsbereich stattfinden, ist in den vorherigen Analysen nicht festgestellt worden.

Zum anderen befindet sich ein weiterer Häufungsbereich im mittleren Abschnitt der Fahrspur. Während des Messzeitraums galt in diesem Bereich, ebenfalls durch die vorhandene Baustelle

und damit einhergehende Einschränkung der Fahrbahnbreite, ein Halteverbot für Pkw. Dies führt dazu, dass in diesem Abschnitt (bei Abwesenheit entgegenkommender Verkehrsteilnehmer) die gesamte vorhandene Fahrbahnbreite zur Durchführung von Überholvorgängen nutzbar ist, ohne dass diese durch Hindernisse auf der Fahrbahn beeinflusst werden. Zu beobachteten potentiell kritischen Interaktionen kam es an dieser Stelle nur, wenn, wie in Abbildung 4.18 zu sehen, zum einen das Halteverbot missachtet und zum anderen Überholvorgänge trotz Gefährdung des entgegenkommenden Verkehrs durchgeführt werden.

# KAPITEL 5

## DISKUSSION

### Algorithmus zur Auswertung der Überholvorgänge

Im vorherigen Kapitel hat die Untersuchung und Analyse der vorliegenden Messdaten stattgefunden, deren Erhebung und Zusammensetzung in Kapitel 3 ausführlich beschrieben worden ist. In Abschnitt 4.1 sind aus dem Datenmaterial zum einen durch die manuelle Annotation der Videoaufzeichnungen als auch durch die algorithmische Auswertung der Trajektorien- und Interaktionsdaten die zu analysierenden Überholinteraktionen herausgefiltert worden. Der hierfür verwendete Algorithmus ist in Abschnitt 3.3.2 erläutert worden und beinhaltet die zeitliche Differenz des Durchquerens von festgelegten räumlichen Bereichen durch die jeweiligen Interaktionspartner, zwischen denen ein Vorzeichenwechsel dieser Differenz stattfindet. Mithilfe dieses Algorithmus konnten mit 318 Überholvorgängen über 96 Prozent der 330 in der manuellen Annotation als nutzbar eingestuft Vorgänge aus den Daten extrahiert werden. Das Verfahren kann demnach als wirksame Methode zum Filtern von Überholvorgängen aus vergleichbaren Trajektorien- und Interaktionsdatensätzen verifiziert werden. Es basiert ausschließlich auf den kinematischen Parametern Ort und Zeit, die, wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, die grundlegenden Elemente einer Trajektorie ausmachen.

Verbesserungspotential besteht an dieser Stelle hinsichtlich des hohen manuellen Aufwands während der Auswertung. Dieser entsteht zum einen durch das manuelle Zusammenfügen von Teiltrajektorien, die sich durch eine unterbrochene Objekterfassung ergeben. Im entsprechenden Kapitel 4.1.1 ist bereits die Möglichkeit aufgeführt worden, diesen Prozess zu automatisieren, indem ein entsprechender Algorithmus den Datensatz nach Trajektorien filtert, die in ähnlichen zeitlichen und räumlichen Abschnitten enden beziehungsweise beginnen. Diese könnten unter einer gemeinsamen ID zusammengefasst und dem Datensatz hinzugefügt werden. Auch die Interpolation der Messlücken könnte in diesem Zuge erfolgen. Die Umsetzung und Erprobung dieses Verfahrens

wird für zukünftige Untersuchungen, in denen ähnliche Unterbrechungen in der Objekterkennung auftreten, empfohlen.

Zum anderen entsteht manueller Aufwand durch die häufige Anpassung der Polygone (vgl. Abschnitt 3.3.2). Dieser ist im vorliegenden Fall maßgeblich durch die selten durchgängige Erfassung der Verkehrsobjekte über den gesamten Messbereich begründet. Für Analysen mit einer ähnlichen Datenbasis sollte daher eine abweichende Detektion der Überholvorgänge umgesetzt werden, die nicht auf dem Durchqueren der Polygone basiert. Es ist beispielsweise denkbar, alle in einer Fahrtrichtung auftretenden Objekte untereinander hinsichtlich ihres ersten und letzten gemeinsamen Erfassungspunkts zu vergleichen und im Anschluss auf einen Vorzeichenwechsel der Zeitstempel dieser Erfassungspunkte zu prüfen. Dieses Verfahren wäre allerdings mit einer deutlichen Erhöhung der Rechenzeit verbunden und die tatsächliche Umsetzbarkeit wird an dieser Stelle nicht überprüft. Liegen dagegen Daten mit einer hohen Erfassungsgüte über den gesamten Messraum vor reduziert sich der manuelle Aufwand ebenfalls erheblich, da im Idealfall nur jeweils eine einzige Polygonkombination zu Beginn und Ende der Erfassungsbereiche definiert werden muss.

Zusätzlich kann der Algorithmus hinsichtlich der Reduzierung der False positives und False negatives optimiert werden (vgl. Tabelle 4.1). False positive Detektionen sind im vorliegenden Fall beispielsweise vermeintliche Überholvorgänge, bei denen es sich tatsächlich um das Einordnen von Verkehrsteilnehmenden vor der Lichtsignalanlage handelt. Hier könnte der Algorithmus hinsichtlich der minimal notwendigen Geschwindigkeiten der Verkehrsobjekte während einer Überholinteraktion angepasst werden. Überholvorgänge innerhalb einer Gruppe von Radfahrenden zählen ebenfalls zu den False positives und könnten über die Detektion der räumlichen Nähe dritter Verkehrsobjekte zu den Interaktionspartnern ausgeschlossen werden.

Die False negatives bilden Überholvorgänge ab, die in sehr kurzem Abstand zu der Erfassungslücke zwischen dem linken und rechten Messbereich auftreten. Aufgrund der Datenverzerrung in diesem Bereich (vgl. Abschnitt 3.2.3) können diese in den meisten Fällen nicht detektiert werden. Diese Problematik ließe sich durch die Verfolgung der Objekte über die Erfassungslücke hinweg beheben, denen folglich über den gesamten Erfassungsbereich dieselbe ID zugeordnet würde. Hierzu könnte ein ähnliches Verfahren angewendet werden wie oben für die unterbrochenen Trajektorien beschrieben. Dies würde außerdem erlauben, alle Vorgänge im Messbereich unabhängig von den beiden separaten Erfassungsbereichen simultan auszuwerten.

### Analyse des seitlichen Überholabstands

Nachdem die Überholvorgänge aus dem Datensatz gefiltert worden, wurden diese im Abschnitt 4.2 hinsichtlich des SMOs TTC, des lateralen Abstands zwischen den Interaktionspartnern sowie ihrer räumlichen Verteilung im Erfassungsbereich analysiert. Erstere Parameter wurden auf Basis der theoretischen Grundlagen gewählt. Insbesondere der seitlich eingehaltene Überholabstand ist von rechtlicher Relevanz, da er für Überholvorgänge von MRU in der StVO vorgeschrieben ist und für Überholvorgänge zwischen VRU als Grundlage der Rechtsprechung im Falle eines Unfalls gilt (vgl. 2.2). Gleichzeitig hat der aktuelle Stand der Forschung in Abschnitt 2.4 gezeigt, dass dieser Parameter maßgeblich zum Sicherheitsempfinden der Radfahrenden beiträgt, und somit für Überholvorgänge im Kontext der Verkehrssicherheit eine wichtige Rolle spielt. Dies gilt vor allem für Überholvorgänge von VRU durch MRU, da hierbei die Radfahrenden aufgrund der höheren Abmessungen und Geschwindigkeiten der überholenden Fahrzeuge bei geringen Überholabständen in ihrer Bewegung destabilisiert werden können.

Mehrere Studien haben gezeigt, dass der in der StVO vorgeschriebene Mindestabstand von 1,50 Meter häufig unterschritten wird und die Überholvorgänge von der Anwesenheit von Gegenverkehr beeinflusst werden. Diese Ergebnisse konnten durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Analysen teilweise bestätigt werden. Nur in 10 von 69 analysierten Überholvorgängen konnte der Überholabstand durch eine manuelle Einschätzung anhand des Videomaterials als ausreichend und damit StVO-konform bewertet werden. In diesen Fällen wurden die Überholenden nicht durch Gegenverkehr beeinflusst; es stand folglich die laterale Breite der Fahrbahn zur Einhaltung eines ausreichenden Seitenabstands zur Verfügung und ist ausgenutzt worden. Unter den 21 Fällen, in denen der Abstand als maximal knapp unter- oder überschritten bewertet wurde, waren allerdings 15, in denen keine Beeinflussung durch Gegenverkehr stattfand und der Abstand hätte vergrößert werden können. Gleiches gilt für 18 der 38 Fälle, in denen der Abstand nach Einschätzung durch das Videomaterial deutlich unterschritten wurde. Die häufige Unterschreitung des Mindestabstands (hier in etwa 55 Prozent der Fälle) kann folglich für den vorliegenden Datensatz bestätigt werden; eine Beeinflussung des Abstands durch den Gegenverkehr ist allerdings nur bedingt erkennbar. In über 60 Prozent der Situationen ist kein Gegenverkehr vorhanden. Andere Gründe für die Nichteinhaltung des vorgeschriebenen Sicherheitsabstands konnten im Videomaterial nicht ausgemacht werden.

Bei der Untersuchung der Interaktionen zwischen VRU ist die Überprüfung der ausreichenden Einhaltung des seitlichen Abstands nicht ohne weiteres möglich, da seitens der StVO keine rechtliche Vorgabe besteht. Hier wurde ein Grenzwert von 1,25 Metern gewählt, der zum einen leicht unter dem maßgeblichen Abstand für VRU liegt (vgl. Abschnitt 2.2.2), und zum anderen even-

tuelle Messungenauigkeiten einschließt. Für diese Fälle wurde anhand des Videomaterials die potentielle Kritikalität der Vorgänge beurteilt, mit dem Ergebnis, dass diese vor allem in Situationen vorliegt, in denen die überholten Verkehrsteilnehmenden unsichere Fahrbewegungen zeigen oder die Interaktionspartner durch weitere Verkehrsteilnehmende beeinflusst werden. Nur in der Hälfte der untersuchten Fälle mit gemessenen Abständen zwischen 0,81 und 1,25 Metern wurde der Abstand aufgrund der Abwesenheit dieser beiden Faktoren als ausreichend beurteilt. Bei der Beurteilung des Einflusses durch Gegenverkehr zeigen sich ähnliche Ergebnisse wie bei den Vorgängen mit MRU-Beteiligung: In über der Hälfte der analysierten Situationen ist der verfügbare laterale Raum, der VRU aufgrund ihrer geringen Breite ohnehin in höherem Maße zur Verfügung steht, nicht ausgenutzt worden, wofür aus dem Videomaterial keine Begründung hervorgeht.

Der Einfluss des seitlichen Überholabstands ist aufgrund der beschriebenen Erkenntnisse für Interaktionen sowohl mit als auch ohne Beteiligung motorisierter Verkehrsteilnehmender ähnlich beurteilt worden. In den vorliegenden Messdaten hat ein geringer lateraler Abstand nicht alleinig kritische Verkehrssituationen verursacht, sondern stattdessen in Kombination mit zusätzlichen Faktoren für eine hohe potentielle oder tatsächlich vorhandene Kritikalität gesorgt. Im Falle von Überholvorgängen durch MRU handelt es sich bei diesen Faktoren hauptsächlich um das unvorhergesehen Umfahren von Hindernissen auf der Fahrbahn durch die überholten VRU, die bei Interaktionen zwischen VRU durch unsichere Fahrbewegungen des überholten Verkehrsteilnehmenden ergänzt werden. Ein geringer lateraler Abstand trägt zur Kritikalität dieser Situationen bei, da er das Risiko der Kollision zwischen den Verkehrsteilnehmenden erhöht. Die Relevanz des seitlichen Abstands für die sichere Durchführung einer Überholinteraktion lässt sich demnach für die analysierten Situationen bestätigen.

Bei der Bewertung dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Einhaltung der Mindestabstände sowie die Beurteilung der Kritikalität aufgrund einer subjektiven Einschätzung anhand des Videomaterials durch die Verfasserin erfolgt ist. Für Folgeuntersuchungen anhand der vorliegenden Daten wird empfohlen, derartige Beurteilungen von mindestens zwei unabhängigen Beobachtenden durchführen zu lassen. Weiterhin ist zu vermuten, dass die Möglichkeit einer Beeinflussung der untersuchten Überholinteraktionen hinsichtlich des seitlichen Abstands gegebenenfalls durch die Verkleinerung der Fahrbahnbreite im Baustellenbereich sowie durch parkende Pkw am Fahrbahnrand vorliegt. Dies gilt vor allem für überholende MRU mit im Vergleich zu VRU deutlich größeren Abmessungen. Bei der Durchführung einer erneuten Datenerhebung zu ähnlichen Zwecken wird daher empfohlen, diese Erhebung an mehreren unterschiedlichen Messorten durchzuführen, die sich in ihren örtlichen Gegebenheiten unterscheiden, in diesem Fall beispielsweise durch Abwesenheit von Hindernissen auf der Fahrbahn, die umfahren werden müssen, oder variierende Geschwindigkeitsbegrenzungen. Zusätzlich zum Einfluss der Einschränkungen

der Fahrbahnbreite können zweispurige Straßen untersucht werden, bei denen Überholvorgänge von am Fahrbahnrand fahrenden VRU eher vom Folge- als vom Gegenverkehr abhängig sind. Dies könnte genauere Aufschlüsse über die Beeinflussung der Vorgänge durch den Gegenverkehr bieten.

Außerdem wird empfohlen, das Überholverhalten an unterschiedlichen Messorten mit verschiedenen Radverkehrsanlagen zu analysieren (vgl. Abschnitt 2.2.3). Hierbei können Einflüsse von beispielsweise Schutz- und Radfahrstreifen auf das Verhalten überholender MRU, sowie Einflüsse von separaten Radwegen auf das Verhalten überholender VRU unter Abwesenheit von Kraftfahrzeugen analysiert werden. Hierbei ist es in vergangenen Studien zu abweichenden Ergebnissen gekommen (vgl. 2.4.2). Außerdem hat eine Studie des ADAC aus dem Jahr 2020 ergeben, dass etwa ein Drittel der Radwege, die in deutschen Landeshauptstädten untersucht wurden, nicht die vorgebene Mindestbreite erreichen [139]. Weiterhin ist mit einer zeitnahen Neuauflage der *Empfehlungen zur Errichtung von Radverkehrsanlagen* der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. zu rechnen, in der von einer Erhöhung der Mindestbreiten für Radverkehrsanlagen ausgegangen wird [140]. Diese Aspekte bilden interessante Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen des Einflusses der Infrastruktur und können gegebenenfalls zur Erarbeitung von Empfehlungen für sicherheitsunkritische einzuhaltende Überholabstände zwischen VRU beitragen.

Zusätzlich ist die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, zur Analyse von Überholabständen mindestens ergänzend auf die Datenerfassung durch mit entsprechenden Sensoren versehene Testfahräder zurückzugreifen, wie es bei vielen in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Studien durchgeführt wurde. Dies würde mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer genaueren Messung der seitlichen Überholabstände beitragen (vgl. Abschnitt 2.3.1). Hier muss allerdings abgewogen werden, dass keine Trajektoriendaten der Interaktionspartner verfügbar wären und die Beurteilung der Situationen im Verkehrskontext erschwert würde. Deshalb kann hier zusätzlich eine Befragung der Testfahrenden zu ihrem subjektiven Angestempfinden in verschiedenen Situationen in Betracht gezogen werden, die eine rein quantitative Abstandsmessung durch Sensordaten um eine qualitative Komponente ergänzt. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Analysen können ebenfalls noch um die Auswertung qualitativer Parameter ergänzt werden. Da die Messergebnisse unter anderem im Videoformat vorliegen ist denkbar, wie in Abschnitt 2.4.2 angeführt, Parameter wie Geschlecht, Kleidung und das Tragen eines Helms der Radfahrenden einzubeziehen und zu überprüfen, ob diese das Überholverhalten hinsichtlich des eingehaltenen Abstands beeinflussen.

### **Analyse der Time-to-collision**

In Abschnitt 2.3.2 ist herausgestellt worden, dass es sich bei der TTC um eine in der Verkehrsforschung häufig zur Untersuchung von Folgefahrten angewendete Kritikalitätsmetrik handelt. Für Überholinteraktion kann über die Messung der minimalen TTC folglich der longitudinale Abstand beim Annähern der Interaktionspartner beurteilt werden, wie es in einigen Studien zu Überholvorgängen durch MRU bereits erfolgt ist (vgl. Abschnitt 2.4.2). Für die vorliegenden Daten ist aufgrund von fehlerhaften beziehungsweise fehlenden Teilen der Datenerhebungen auf die rein quantitative Beurteilung gemessener TTC-Werte verzichtet wurden. Stattdessen fand, wie auch bei der Analyse der seitlichen Abstände, eine Analyse von Vorgängen innerhalb eines TTC-Bereichs von 0,5 bis 1,5 Sekunden anhand des Videomaterials statt. Zunächst ist herausgestellt worden, dass die Ermittlung einer TTC nicht möglich ist, wenn sich die Interaktionspartner schon vor Beginn des Überholvorgangs auf lateral abweichenden Fahrspuren bewegen. Dieser Umstand ist bereits in der Literaturanalyse in den Abschnitten 2.4.2 und 2.4.3 aufgegriffen worden und kann an dieser Stelle insbesondere für Interaktionen zwischen VRU bestätigt werden.

Bei der Analyse des Videomaterials ist festgestellt worden, dass die TTC nicht nur zur Untersuchung des Auffahrens der überholenden Verkehrsteilnehmenden verwendet werden kann, sondern in einigen Fällen weitere Situationen betrifft. So kann sie ebenfalls als Kritikalitätsmetrik für eine potentielle Kollision verwendet werden, die entstehen kann, wenn die überholenden Verkehrsteilnehmenden während des Überholvorgangs beispielsweise durch das Umfahren eines Hindernisses ihre Bewegungsrichtung anpassen und so ein Kollisionskurs zwischen den Trajektorien der Interaktionspartner auftritt. Außerdem kann ein Kollisionskurs durch das frühe Einscheren des überholenden Verkehrsteilnehmenden auf die Fahrspur des überholten VRU entstehen und durch die TTC gemessen werden. Die Nutzung der TTC als Kritikalitätsmetrik in verschiedenen Phasen des Überholvorgangs ist daher anhand der vorliegenden Daten als plausibel zu bewerten und kann zur Beurteilung von analysierten Situationen im Kontext der Verkehrssicherheit beitragen. Für zukünftige Untersuchung ist allerdings eine Erhebung notwendiger Parameter, wie der Geschwindigkeiten und Ausrichtungen der Verkehrsteilnehmenden, sowie deren hohe Qualität in den Trajektorien Daten notwendig, um valide und nutzbare Berechnungen der TTC durchführen zu können. Liegen diese Daten vor kann außerdem der Zusammenhang zwischen der TTC und den eingehaltenen seitlichen Überholabständen untersucht werden, da bei der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Analysen dieselbe Situation sowohl bei der Untersuchung der seitlichen Abstände als auch der TTC als besonders kritisch herausgestellt worden ist. Auch an dieser Stelle ist anzumerken, dass die Beurteilung der Kritikalität auf einer subjektiven Einschätzung basiert, für die die genannten Einschränkungen gelten.

### **Analyse der räumlichen Verteilung der Überholvorgänge**

Die zuletzt durchgeführte Untersuchung der räumlichen Verteilung der Überholvorgänge basiert nicht auf Erkenntnissen der theoretischen Grundlagen, sondern stellt nach Einschätzung der Verfasserin eine Möglichkeit zur Analyse des Verhaltens der Interaktionspartner abseits quantitativer Messwerte und zur Herstellung von Zusammenhängen zwischen den Analysen dar. Zum einen konnte ermittelt werden, dass Überholinteraktionen häufig nach Anfahrvorgängen stattfinden, die auf Wartezeiten an Lichtsignalanlagen folgen. Im betrachteten Messbereich hat sich dies durch eine Häufung der Überholvorgänge zu Beginn des südlichen Kreuzungsarms gezeigt. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass Überholvorgänge in diesem Bereich in den vorangegangenen Analysen häufig durch eine potentielle Kritikalität gekennzeichnet sind, die vor allem durch das notwendige Umfahren geparkter Fahrzeuge verursacht wird. Weniger kritische Häufungen traten in weiterer Entfernung des Kreuzungsbereichs auf der rechten Kameraseite auf.

Für Folgeuntersuchung mit der Erhebung eigener Messdaten kann ein Vergleich von Überholinteraktionen in Bereichen nach einer Lichtsignalanlage und Bereichen, die nicht von dieser beeinflusst werden, interessant sein. Hierbei kann überprüft werden, ob Überholvorgänge innerhalb dieser Kreuzungsbereiche, beispielsweise aufgrund von Beschleunigungsvorgängen und hohen Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Interaktionspartnern, generell eine höhere Kritikalität aufweisen. Fahrbahnbereiche, in denen es aufgrund von Lichtsignalanlagen häufig zu Wartezeiten und Anhaltevorgängen kommt (wie die Fahrspur in süd-nördliche Richtung im linken Erfassungsbereich) sind für die Analyse von Überholvorgängen allerdings von geringer Bedeutung, da es vor allem in urbanen Bereichen mit kurzer Phasenauslegung der Lichtsignalanlage zu häufigen Standzeiten, sowie lediglich bei verlangsamter Fahrt stattfindenden Anfahr- und Anhaltevorgängen kommt.

Wie zuvor erwähnt wird der Parameter der Geschwindigkeit, insbesondere die Geschwindigkeitsdifferenz der Interaktionspartner vor, während und nach einem Überholvorgang als geeignet für derartige Folgeuntersuchungen angesehen. Im Rahmen dieser Arbeit ist aufgrund der in vielen Fällen fehlerhaften Erhebung der Geschwindigkeitsdaten, wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben wurde, von deren Analyse abgesehen wurden. Hier könnte beispielsweise untersucht werden, ob Verkehrsteilnehmende beim Vorliegen vergleichsweise großer Geschwindigkeitsunterschiede eines vorausfahrenden VRU zur Durchführung von Überholvorgängen mit potentiell höherer Kritikalität neigen. Ebenfalls kann die Analyse der Geschwindigkeiten an verschiedenen Punkten relevant für die im Abschnitt 2.4 beschriebene Einteilung von Überholvorgängen in verschiedene Phasen sein. Auch diese sind im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht worden, da diese Einteilung nicht ausschließlich anhand von Messergebnissen vorgenommen werden kann bezie-

ungsweise eine zusätzliche Beurteilung jeder Situation anhand des Videomaterials stattfinden muss, die für derart komplexe Fragestellungen im Idealfall von mindestens zwei Beobachtenden durchgeführt wird. Die weitere Untersuchung der Phaseneinteilung und ihrer beschreibenden Parameter gilt, wie in Abschnitt 2.4.1 aufgeführt, als wichtige Grundlage für die realitätsnahe Modellierung von Überholvorgängen. Auch im Hinblick auf die objektive und subjektive Sicherheit von VRU in Abhängigkeit abweichender Verhaltensweisen der Überholenden in verschiedenen Phasen der Interaktion sind diese als Fokus für zukünftige Analysen nahezulegen.

### **Zusätzliche Aspekte der Datenerhebung**

Aspekte und Limitationen der Datenerhebung und Datengüte sind in den vorangegangenen Absätzen an den entsprechend relevanten Stellen diskutiert worden. Ergänzend ist an dieser Stelle die hohe Anzahl von Überholinteraktionen positiv hervorzuheben, die sich aus der vorhandenen Datenbasis analysieren ließen, ohne dass diese zweckbezogen erhoben worden sind (vgl. Abschnitt 3.2.3). Dies trifft sowohl auf Interaktionen zwischen VRU als auch unter Beteiligung von Kraftfahrzeugen zu, weshalb die Datenbasis Vergleiche zwischen diesen Situationen hinsichtlich der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der verschiedenen Verkehrsobjekte ermöglicht hat. In Abschnitt 3.1.3 ist außerdem die Abwesenheit von externen Einflüssen wie schlechtem Wetter oder Dunkelheit auf die Verkehrsteilnehmenden herausgestellt worden, welche über den gesamten Messzeitraum für einheitliche Bedingungen der Überholinteraktionen und damit verbundenen Analysen sorgte. Es ist allerdings denkbar, derartige Einflüsse für zukünftige Datenerhebungen explizit einzubeziehen und die Abweichungen im Verhalten und potentielle Zu- oder Abnahmen kritischer Situationen durch eingeschränkte Sichtverhältnisse, wie beispielsweise bei Nacht oder Regen, zu untersuchen.

In den durchgeführten Analysen hat sich gezeigt, dass Interaktionen unter Beteiligung von E-Scooter-Nutzenden, trotz deren vergleichsweise hohen Aufkommens im Messbereich, zu selten aufgetreten sind, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten im Vergleich zu Radfahrenden auszumachen. Um diese näher zu untersuchen wird eine zeitliche Ausweitung der Datenerhebung als sinnvoll erachtet, um die verfügbare Anzahl zu untersuchender Interaktionen zu erhöhen. Ebenfalls ist im Rahmen dieser Arbeit keine Differenzierung der Fahrräder in beispielsweise Lastenräder oder E-Bikes erfolgt. Diese Differenzierung ist für zukünftige Untersuchungen aufgrund der wachsenden Popularität dieser Ausprägungsformen zu empfehlen, da sie sich hinsichtlich ihrer Abmessungen und Geschwindigkeiten von herkömmlichen Fahrrädern maßgeblich unterscheiden [141] [142].

## KAPITEL 6

### FAZIT UND AUSBLICK

In der Einleitung ist die Relevanz dieser Arbeit für den Kontext der Verkehrssicherheit verdeutlicht worden, indem Gründe für die Zunahme des Verkehrsaufkommens von VRU, vor allem im urbanen Raum, im Rahmen der angestrebten Verkehrs- und Mobilitätswende aufgezeigt wurden. Die besondere Rolle der Verkehrssicherheit innerhalb der hierbei umzusetzenden politischen Maßnahmen wird durch die Vision Zero hervorgehoben, die als übergeordnetes Ziel der Verkehrsentwicklung gilt und insbesondere die Gruppe der vulnerablen Verkehrsteilnehmenden betrifft, die im Straßenverkehr in hohem Maße gefährdet sind. Dass Überholinteraktionen besonders sicherheitsrelevante Verkehrsvorgänge darstellen konnte innerhalb der Erarbeitung des Forschungsstands anhand von Ergebnissen vergangener Studien gezeigt werden, die insbesondere Überholabstände als sicherheitskritischen Parameter hervorheben. Außerdem stellen diese den Einfluss auf das Sicherheitsempfinden der Radfahrenden als Barriere für die Fahrradnutzung heraus. Die Notwendigkeit weiterführender Untersuchungen wird durch die unklare Rechtslage für Überholvorgänge zwischen VRU sowie den maßgeblichen Anteil von Überholinteraktionen am Unfallgeschehen unterstützt.

Parallel ist die Notwendigkeit zur Erhebung und Analyse realer Verkehrsdaten für die realitätsnahe Modellierung von Verkehrssituationen erarbeitet worden, die die Basis für die Validierung autonomer Fahrsysteme bildet. Hier sind Vor- und Nachteile verschiedener Erfassungsmethoden von Verkehrsdaten aufgeführt, sowie die Möglichkeit für deren Analyse durch Surrogate Measures of Safety beschrieben worden, innerhalb derer die Time-to-collision in der Vergangenheit zur Untersuchung der Kritikalität von Überholvorgängen verwendet worden ist. Der Stand der Forschung hat zudem gezeigt, dass insbesondere Überholinteraktionen zwischen VRU bisher nur in geringem Maße untersucht worden sind und deshalb für deren Modellierung ein besonderer Bedarf der Analyse des Interaktionsverhaltens und relevanter Parameter besteht.

Die vorliegende Datenbasis ist hinsichtlich ihrer Erhebung, ihres Umfangs und der Datengüte als geeignet für den Forschungskontext bewertet und anhand ihrer Zusammensetzung aus Videomaterial und Trajektorien­daten beschrieben worden, welche sowohl eine algorithmische als auch manuelle optische Auswertung der Daten erlaubt. Grundlegende Auswertungen der Daten haben gezeigt, dass diese sowohl hinsichtlich des Verkehrsaufkommens als auch der abgedeckten Geschwindigkeitsbereiche eine gute Basis für die Analyse von Überholvorgängen darstellen. Der Umgang mit Messungenauigkeiten und Datenlücken und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Analysen sind an den relevanten Stellen dieser Arbeit beschrieben worden, schränken die erzielten Ergebnisse aber nicht ein.

Die algorithmische Detektion der Überholvorgänge auf Basis der räumlichen und zeitlichen Bewegungen der Interaktionspartner ist beschrieben und durchgeführt worden. Das Verfahren wurde als geeignet bewertet und mögliche Optimierungen zur Reduzierung des manuellen Zusatzaufwands sowie der Fehldetektionen beschrieben. Insgesamt konnten so 330 nutzbare Überholvorgänge aus dem Datenbasis detektiert werden, die als Grundlage für die weiterführenden Analysen verwendet wurden.

Durch die Analyse des seitlichen Überholabstands für Überholvorgänge zwischen VRU konnte bestätigt werden, dass ein Sicherheitsabstand von weniger als 1,5 Metern in vielen Fällen ausreichend für die sicherere Durchführung des Vorgangs ist. Anhand des Videomaterials konnten zusätzliche Faktoren herausgestellt werden, die im Zusammenspiel mit einem unterschrittenen Überholabstand zur Kritikalität von Überholvorgängen beitragen. Argumente aus der Rechtsprechung, in der die Beurteilung der Fahrsicherheit der zu überholenden Radfahrenden ausschlaggebend für den einzuhaltenden Abstand ist, können anhand des Videomaterials nachvollzogen werden.

Für Überholvorgänge durch MRU konnte bestätigt werden, dass viele Kraftfahrzeugführende den in der StVO vorgegebenen Mindestabstand für das Überholen von VRU unterschreiten. Dies ist nicht immer durch den Einfluss von Gegenverkehr bedingt. Auch hier ergibt sich die Kritikalität in Kombination von zusätzlichen Faktoren. Der Einfluss dieser Vorgänge auf das Sicherheitsempfinden der überholten VRU ist daher als plausibel sowie die generelle Sicherheitsrelevanz des seitlichen Überholabstands als Kritikalitätsparameter für beide Arten der Überholinteraktionen als vorhanden zu bewerten.

Die TTC konnte ebenfalls als nutzbare Metrik für die Messung der Kritikalität in verschiedenen Phasen der Überholvorgänge bestätigt werden; vorausgesetzt, sie ist durch einen bestehen-

den Kollisionskurs während einer Interaktion messbar. Außerdem konnte die Untersuchung der räumlichen Verteilung der Überholinteraktionen eine zusätzliche Möglichkeit für Rückschlüsse auf die Ursachen für die Durchführung der Überholvorgänge und die Zusammenhänge der kritischen Parameter bieten.

Für weiterführende Untersuchungen des vorliegenden Datenmaterials wird empfohlen, die subjektiven Einschätzungen, die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen wurden, durch weitere unabhängige Beobachtende zu bestätigen oder zu widerlegen. Außerdem können anhand des Videomaterials qualitative Parameter wie das Tragen eines Helms oder das Geschlecht der Radfahrenden bestimmt und auf zusammenhängende Unterschiede in deren Verhaltensweisen überprüft werden.

Zur Durchführung zukünftiger Verkehrsmessungen mit einem ähnlichen Forschungszweck wird nahegelegt, Erhebungen an verschiedenen Messorten durchzuführen, die sich in ihren räumlichen Gegebenheiten unterscheiden. Hierzu zählen beispielsweise die vorhandene Radinfrastruktur, die Geschwindigkeitsbegrenzungen und Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Zusätzlich können Erhebungen bei unterschiedlichen Licht- und Wetterverhältnissen durchgeführt werden. Außerdem wird empfohlen, Abstandsmessungen für eine höhere Messgenauigkeit über Testfahräder mit entsprechenden Sensoren durchzuführen und gegebenenfalls mit Befragungen der Testfahrenden zu kombinieren. Zur realitätsnahen Modellierung der Überholvorgänge kann die Untersuchung der Geschwindigkeitsdifferenz der Interaktionspartner an verschiedenen Punkten der Interaktion dazu beitragen, eine Phaseneinteilung der Überholvorgänge vorzunehmen.



## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Pressemonitor: PMG Themenrennen. <https://www.pressemonitor.de/themenrennen/>. Zugriff am 2023-08-30.
- [2] Deutscher Wetterdienst: Klimawandel – ein Überblick. [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel_node.html). Zugriff am 2023-09-09.
- [3] Statistisches Bundesamt: Treibhausgasemissionen. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/energiefluesse-emissionen/Tabellen/treibhausgase.html>. Zugriff am 2023-09-09.
- [4] European Commission: Consequences of climate change. [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change\\_en](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_en). Zugriff am 2023-09-09.
- [5] Umweltbundesamt: Emissionen des Verkehrs. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#\verkehr-belastet-luft-und-klima-minderungsziele-der-bundesregierung>. Zugriff am 2023-09-09.
- [6] Umweltbundesamt: Fahrleistungen, Verkehrsleistung und Modal Split in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#personenverkehr>. Zugriff am 2023-09-09.
- [7] Bundeszentrale für politische Bildung: Der Weg ist das Ziel: Verkehrswende als Kulturwende. <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/298748/>

der-weg-ist-das-ziel-verkehrswende-als-kulturwende/. Zugriff am 2023-09-09.

- [8] Verkehrsclub Deutschland: Definition Verkehrswende. <https://www.vcd.org/artikel/verkehrswende-definition#:~:text=Mobilit%C3%A4tswende%20als%20Teil%20der%20Verkehrswende&text=Sie%20adressiert%20vor%20allem%20das,Versorgung%20auch%20in%20l%C3%A4ndlichen%20Regionen>. Zugriff am 2023-07-13.
- [9] Die Bundesregierung. *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050*. Die Bundesregierung, 2019.
- [10] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Elektrokleinstfahrzeuge – Fragen und Antworten. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/elektrokleinstfahrzeuge-verordnung-faq.html>. Zugriff am 2023-08-09.
- [11] Umweltbundesamt: Radverkehr. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/radverkehr#vorteile-des-fahrradfahrens>. Zugriff am 2023-07-29.
- [12] European Commission: ITS & Vulnerable Road Users. [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/intelligent-transport-systems/road/action-plan-and-directive/its-vulnerable-road-users\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/intelligent-transport-systems/road/action-plan-and-directive/its-vulnerable-road-users_en). Zugriff am 2023-09-09.
- [13] Vu, M.D., Aoki, H., Suzuki, T., Nagiri, S., Van, Q., Itou, S., Hattori, A. An analysis of vulnerable road users overtaking maneuver along the urban road. *Applied Sciences*, 11:6361, 2021.
- [14] Statista: E-Scooter-Trend flacht langsam ab. <https://de.statista.com/infografik/25649/umsaetze-und-nutzer-im-segment-e-scooter-\sharing-in-deutschland/>. Zugriff am 2023-09-09.
- [15] Koopman, P., Wagner, M. Challenges in autonomous vehicle testing and validation. *SAE International Journal of Transportation Safety*, 4:15–24, 2016.
- [16] Lodhi, S. S., Kumar, N., Pandey, P. K. Autonomous vehicular overtaking maneuver: A survey and taxonomy. *Vehicular Communications*, 42, 2023.
- [17] Song, Q., Tan, K., Runeson, P., Persson, S. Critical scenario identification for realistic testing of autonomous driving systems. 2022.

- [18] Dixit, S., Fallah, S., Montanaro, U., Dianati, M., Stevens, A., Mccullough, F., Mouzakitis, A. Trajectory planning and tracking for autonomous overtaking: State-of-the-art and future prospects. *Annual Reviews in Control*, 45:76–86, 2018.
- [19] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: Das DLR als Organisation. <https://www.dlr.de/de/das-dlr/ueber-uns/organisation>. Zugriff am 2023-09-05.
- [20] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Branchenfokus/branchenfokus-luft-und-raumfahrt-10.html>. Zugriff am 2023-09-05.
- [21] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: Institut für Verkehrssystemtechnik. [https://www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-1221/1665\\_read-3070/](https://www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-1221/1665_read-3070/). Zugriff am 2023-09-05.
- [22] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: Forschungsinfrastruktur. <https://www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-11366/>. Zugriff am 2023-09-05.
- [23] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: Institut für Verkehrssystemtechnik - Organisation. <https://www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-16052/>. Zugriff am 2023-09-05.
- [24] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Straßenverkehrssicherheit. <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Mobilitaet/Strasse/Strassenverkehrssicherheit/strassenverkehrssicherheit.html>. Zugriff am 2023-08-25.
- [25] Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V.: Vision Zero. <https://www.dvr.de/ueber-uns/vision-zero>. Zugriff am 2023-08-25.
- [26] European Commission: Road Safety. [https://road-safety.transport.ec.europa.eu/index\\_en](https://road-safety.transport.ec.europa.eu/index_en). Zugriff am 2023-08-25.
- [27] Die Bundesregierung: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO). [https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund\\_26012001\\_S3236420014.htm](https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_26012001_S3236420014.htm). Zugriff am 2023-08-02.
- [28] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Verkehrssicherheitsprogramm 2021 bis 2030. <https://bmdv.bund>.

de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Verkehrssicherheit/verkehrssicherheitsprogramm-2021-bis-2030.html. Zugriff am 2023-08-02.

- [29] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *VERKEHRSSICHERHEITSPROGRAMM DER BUNDESREGIERUNG 2021 BIS 2030*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2021.
- [30] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Hier kommt die Radverkehrsoffensive des BMDV. <https://www.youtube.com/watch?v=3Irye5tKrt4>. Zugriff am 2023-08-02.
- [31] European Commission: EU Road Safety policy. [https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy\\_en](https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy_en). Zugriff am 2023-08-25.
- [32] European Commission: Priorities. [https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy/priorities\\_en](https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy/priorities_en). Zugriff am 2023-08-25.
- [33] European Commission: Road infrastructure guidelines. [https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy/priorities/infrastructure/road-infrastructure-guidelines\\_en](https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy/priorities/infrastructure/road-infrastructure-guidelines_en). Zugriff am 2023-08-25.
- [34] European Commission: Vehicle Safety and automated/connected vehicles. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/vehicle-safety-and-automatedconnected-vehicles\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/vehicle-safety-and-automatedconnected-vehicles_en). Zugriff am 2023-08-25.
- [35] European Commission: Cyclists. [https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy/priorities/safe-road-use/cyclists\\_en](https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy/priorities/safe-road-use/cyclists_en). Zugriff am 2023-08-25.
- [36] European Commission: Post Impact care. [https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy/priorities/post-impact-care\\_en](https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy/priorities/post-impact-care_en). Zugriff am 2023-08-25.
- [37] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Mobilität – Verkehrsverhalten. [https://www.bmk.gv.at/themen/verkehrsplanung/statistik/viz11/kap\\_6.html](https://www.bmk.gv.at/themen/verkehrsplanung/statistik/viz11/kap_6.html). Zugriff am 2023-07-13.

- [38] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. *Klimaschutzplan 2050*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016.
- [39] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Bundesverkehrswegeplan 2030*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2016.
- [40] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Nationaler Radverkehrsplan 3.0*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2022.
- [41] Umweltbundesamt: E-Scooter momentan kein Beitrag zur Verkehrswende. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/e-scooter-momentan-kein-beitrag-zur-verkehrswende#wie-sind-e-scooter-und-ihre-akkus-richtig-zu-entsorgen>. Zugriff am 2023-07-29.
- [42] Petzold, T. Gehlert, T. Ringhand, M., Anke, J. *Verkehrssicherheit von E-Scootern*. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Unfallforschung der Versicherer, 2021.
- [43] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Deutsches Institut für Urbanistik. *E-Tretroller in Städten – Nutzung, Konflikte und kommunale Handlungsmöglichkeiten*. Deutsches Institut für Urbanistik, 2021.
- [44] Mobilitätsmagazin: Straßenverkehrsordnung (StVO): Die wichtigsten Verkehrsregeln. <https://www.bussgeldkatalog.org/stvo/>. Zugriff am 2023-08-09.
- [45] Bundesministerium der Justiz: StVO 2013 - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis. [https://www.gesetze-im-internet.de/stvo\\_2013/](https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/). Zugriff am 2023-08-09.
- [46] Bundesministerium der Justiz: Verordnung über die Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr (Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung - eKfV). <https://www.gesetze-im-internet.de/ekfv/BJNR075610019.html>. Zugriff am 2023-08-09.
- [47] Bundesministerium der Justiz: Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). [https://www.gesetze-im-internet.de/stvo\\_2013/BJNR036710013.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/BJNR036710013.html). Zugriff am 2023-08-09.
- [48] Haufe: Kein pauschaler Seitenabstand beim Überholen mit dem Fahrrad. <https://www.haufe.de/recht/weitere-rechtsgebiete/verkehrsrecht/>

mitverschulden-worauf-ein-radfahrer-beim-ueberholen-achten\  
-muss\_212\_397164.html. Zugriff am 2023-07-04.

- [49] beck-aktuell: KG: Sicherheitsabstand bei Überholvorgang zweier Fahrräder. <https://rsw.beck.de/aktuell/daily/meldung/detail/kg-sicherheitsabstand-bei-ueberholvorgang-zweier-fahrraeder>. Zugriff am 2023-07-04.
- [50] Unfallzeitung: Kammergericht entscheidet zu Unfall beim gegenseitigen Überholen von Fahrrädern. <https://www.unfallzeitung.de/news/1268-kammergericht-entscheidet-zu-unfall-beim-gegenseitigen-%C3%BCberholen-von-fahrr%C3%A4dern/>. Zugriff am 2023-07-04.
- [51] ADAC: Worauf ein Radfahrer beim Überholen eines anderen Radlers achten muss. <https://www.adac.de/news/mindestabstand-bei-radfahrern/>. Zugriff am 2023-07-04.
- [52] Deubner Recht & Praxis: Unfall beim Überholen mit einem Fahrrad. <https://www.deubner-recht.de/news/verkehrsrecht/details/artikel/unfall-beim-ueberholen-mit-einem-fahrrad.html>. Zugriff am 2023-07-04.
- [53] ADFC: Geschützte Radfahrstreifen. <https://www.adfc.de/artikel/geschuetzte-radfahrstreifen/>. Zugriff am 2023-07-07.
- [54] ADAC: Radwege: Diese unterschiedlichen Arten gibt es. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/zweirad/fahrrad-ebike-pedelec/vorschriften-verhalten/radwege/>. Zugriff am 2023-07-07.
- [55] Greenshields, B. D., Rowland Bibbins, J., Channing, W. S., Miller, H. H. A study of traffic capacity. 1935.
- [56] Li, L., Jiang, R., He, Z., Chen, X., Zhou, X. Trajectory data-based traffic flow studies: A revisit. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114:225–240, 2020.
- [57] U. Plank-Wiedenbeck. Straßenverkehrstechnik. In C. Gertz, editor, *Verkehrsplanung, Bau und Betrieb von Verkehrsanlagen. Handbuch für Bauingenieure*, page 129–143. Springer Vieweg, 2021.
- [58] Treiber, M., Kesting, A. *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer, 2010.

- [59] Raju, N., Kumar, P., Jain, A., Arkatkar, S. S., Joshi, G. Application of trajectory data for investigating vehicle behavior in mixed traffic environment. *Transportation Research Record*, 2672(43):122–133, 2018.
- [60] Kerner, B. S., Demir, C., Herrtwich, R. G., Klenov, S. L., Rehborn, H., Aleksic, M., Haug, A. Traffic state detection with floating car data in road networks. In *Proceedings: 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems*, pages 44–49, 2005.
- [61] Chen, X., Yin, J., Tang, K., Tian, Y., Sun, J. Vehicle trajectory reconstruction at signalized intersections under connected and automated vehicle environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(10):17986–18000, 2022.
- [62] Guan, F., Xu, H., Tian, Y. Evaluation of roadside LiDAR-based and vision-based multi-model all-traffic trajectory data. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23(12):5377, 2023.
- [63] Lin, Z., Zhang, G., He, Z., Feng, J., Wu, W., Li, Y. Vehicle trajectory recovery on road network based on traffic camera video data. *Proceedings of the 29th International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, 2021.
- [64] MIT Trajectory Data Set - Multiple Camera Views. <https://www.ee.cuhk.edu.hk/~xgwang/MITtrajsinglemulti.html>. Zugriff am 2023-07-24.
- [65] Krajewski, R., Bock, J., Kloeker, L., Eckstein, L. The highD dataset: A drone dataset of naturalistic vehicle trajectories on German highways for validation of highly automated driving systems. In *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 2118–2125, 2018.
- [66] Sivaraman, S., Trivedi, M. M. A general active-learning framework for on-road vehicle recognition and tracking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(2):267–276, 2010.
- [67] Glasmacher, C., Krajewski, R., Eckstein, L. An automated analysis framework for trajectory datasets. *arXiv*, 2022.
- [68] Yan, X., Zou, Z., Feng, S., Zhu, H., Sun, H., Liu, H.X. Learning naturalistic driving environment with statistical realism. *Nature Communications*, 14(1), 2023.
- [69] Elrofai, H., Worm, D., Camp, O. *Scenario Identification for Validation of Automated Driving Functions*, pages 153–163. 2016.
- [70] Johnsson, C., Laureshyn, A., D’Agostino, C. Validation of surrogate measures of safety with a focus on bicyclist–motor vehicle interactions. *Accident Analysis Prevention*, 153:106037, 2021.

- [71] Hydén, C., Linderholm, L. The Swedish traffic-conflicts technique. *International Calibration Study of Traffic Conflict Techniques*, pages 133–139, 1984.
- [72] Sanders, R. L., Nelson, T.A. Results from a campus population survey of near misses, crashes, and falls while e-scooting, walking, and bicycling. *Transportation Research Record*, 2677(2):479–489, 2023.
- [73] Laureshyn, A., Varhelyi, A. The Swedish traffic conflict technique - observer's manual, 2018.
- [74] Ali, Y., Haque, M., Mannering, F. Assessing traffic conflict/crash relationships with extreme value theory: Recent developments and future directions for connected and autonomous vehicle and highway safety research. *Analytic Methods in Accident Research*, 39:100276, 2023.
- [75] Zhang, Y., Antonsson, E., Grote, K. A new threat assessment measure for collision avoidance systems. pages 968 – 975, 2006.
- [76] Lu, J., Grembek, O., Hansen, M. Learning the representation of surrogate safety measures to identify traffic conflict. *Accident Analysis Prevention*, 174:106755, 2022.
- [77] Singh, D., Das, P. A review on surrogate safety measures in safety evaluation and analysis. *Proceedings of the Sixth International Conference of Transportation Research Group of India*, 3:113–129, 2022.
- [78] Laureshyn, A., Svensson, A., Hydén, C. Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation. *Accident Analysis Prevention*, 42(6):1637–1646, 2010.
- [79] Chen, R., Sherony, R., Gabler, H. Comparison of time to collision and enhanced time to collision at brake application during normal driving. *SAE Technical Paper*, 2016.
- [80] Van der Horst, A. R. A. *A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters*. PhD thesis, Technische Universitat Delf, 1990.
- [81] Lu, C., He, X., van Lint, H., Tu, H., Happee, R., Wang, M. Performance evaluation of surrogate measures of safety with naturalistic driving data. *Accident Analysis Prevention*, 162:106403, 2021.
- [82] Paul, M., Ghosh, I. Post encroachment time threshold identification for right-turn related crashes at unsignalized intersections on intercity highways under mixed traffic. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, 27:1–15, 2020.

- [83] Sohel Mahmud, S. M., Ferreira, L., Hoque, S., Tavassoli, A. Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. *IATSS Research*, 41(4):153–163, 2017.
- [84] Mishra, K. J., Mohanty, M., Dey, P. P. Modelling traffic safety at uncontrolled median openings: A case study in India. *IATSS Research*, 46(4):441–449, 2022.
- [85] Yastremska-Kravchenko, O., Laureshyn, A., D’Agostino, C., Varhelyi, A. What constitutes traffic event severity in terms of human danger perception? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 90:22–34, 2022.
- [86] E. D. Dickmanns. *Dynamic Vision for Perception and Control of Motion*. Springer, 2007.
- [87] A. C. Reschka. *Fertigkeiten-und Fähigkeitengraphen als Grundlage des sicheren Betriebs von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in städtischer Umgebung*. PhD thesis, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2017.
- [88] T. Shamir. How should an autonomous vehicle overtake a slower moving vehicle: Design and analysis of an optimal trajectory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(4):607–610, 2004.
- [89] Magdolen, L., Danko, J., Milesich, T., Kevický, I., Hanko, L. Creating an overtaking maneuver in the prescan virtual environment. In *2022 20th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, pages 397–403, 2022.
- [90] Jos Pinto, M., de Castro Dutra, I., Fonseca, J. Data and knowledge for overtaking scenarios in autonomous driving. *ArXiv*, abs/2305.19421, 2023.
- [91] Zuo, Z., Guo, S., Wang, Y., Li, Z. Risk assessment and trajectory planning for overtaking of autonomous vehicles on two-lane two-way roads. In *2022 41st Chinese Control Conference (CCC)*, pages 5481–5486, 2022.
- [92] Fei Pan, J., Shen, Y. Assessing driving risk at the second phase of overtaking on two-lane highways for young novice drivers based on driving simulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 2022.
- [93] Lamouik, I., Yahyaouy, A., Sabri, M. A. Model predictive control for full autonomous vehicle overtaking. *Transportation Research Record*, 2677(5):1193–1207, 2023.
- [94] Aldulaimi, H. S., Ben Hamed, B. Comforting and safer highway overtaking for lane change based on vehicles speed advisory. In *2022 22nd International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA)*, pages 56–65, 2022.

- [95] Maji, A., Bhadrecha, B., Bhattacharya, P. Overtaking distance models for passenger cars in two-lane undivided rural highways. *J. Inst. Eng. India Ser. A*, 102:773–782, 2021.
- [96] Aldulaimi, H. S., Ben Hamed, B. Highway vehicles' overtaking classification. *Transport and Telecommunication Journal*, 23(4):284–292, 2022.
- [97] Rasch, A., Moll, S., López, G., García, A., Dozza, M. Drivers' and cyclists' safety perceptions in overtaking maneuvers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 84(4):165–176, 2022.
- [98] Dozza, M., Schindler, R., Bianchi-Piccinini, G., Karlsson, J. How do drivers overtake cyclists? *Accident Analysis Prevention*, 88:29–36, 2016.
- [99] Louro, T. V., Junior, J. U. P., Gardin, G. T. de O., da Silva Junior, C. A. P. Factors influencing lateral distance and speed of motorized vehicles overtaking bicycles. *Transportation Research Record*, 2677(7):51–61, 2023.
- [100] Frings, D., Parkin, J., Ridley, A. M. The effects of cycle lanes, vehicle to kerb distance and vehicle type on cyclists' attention allocation during junction negotiation. *Accident Analysis Prevention*, 72:411–421, 2014.
- [101] I. Walker. Drivers overtaking bicyclists: Objective data on the effects of riding position, helmet use, vehicle type and apparent gender. *Accident Analysis Prevention*, 39(2):417–425, 2007.
- [102] Chapman, J. R., Noyce, D. A. Observations of driver behavior during overtaking of bicycles on rural roads. *Transportation Research Record*, 2321(1):38–45, 2012.
- [103] S. Metzler. Vorstellung des Citizen Science Projekts „Zu nah?“ – Messung von Überholabständen von Kfz und Radfahrenden. Stand: 19.04.2023.
- [104] Beck, B., Perkins, M., Olivier, J., Chong, D., Johnson, M. Subjective experiences of bicyclists being passed by motor vehicles: The relationship to motor vehicle passing distance. *Accident Analysis Prevention*, 155:106102, 2021.
- [105] Mohammed, H., Bigazzi, A. Y., Sayed, T. Characterization of bicycle following and overtaking maneuvers on cycling paths. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 98:139–151, 2019.
- [106] Twaddle, H., Schendzielorz, T., Fakler, O. Bicycles in urban areas: Review of existing methods for modeling behavior. *Transportation Research Record*, 2434(1):140–146, 2014.

- [107] Liu, Q., Sun, J., Tian, Y., Xiong, L. Modeling and simulation of overtaking events by heterogeneous non-motorized vehicles on shared roadway segments. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 102072(1), 2020.
- [108] Liu, Y., Fu, C., Wang, W. Modeling duration of overtaking between non-motorized vehicles: A nonparametric survival analysis based approach. *PLoS ONE*, 16(1), 2021.
- [109] Fonseca-Cabrera, A. S., Llopis-Castelló, D., Pérez-Zuriaga, A. M., Alonso-Troyano, C., García, A. Micromobility users' behaviour and perceived risk during meeting manoeuvres. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23):12465, 2021.
- [110] Yin, A., Chen, X., Yue, L. Extracting overtaking segments by unsupervised clustering and predicting nonmotorized vehicle's trajectory. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 2022.
- [111] Dekra: Viele Unfälle durch riskantes Überholen. <https://www.dekra.de/de/im-zweifel-nie/>. Zugriff am 2023-07-20.
- [112] ADAC: Unfallstatistik: Hohes Risiko für junge Fahrer. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/unfall-schaden-panne/unfall/unfallforschung-junge-fahrer/>. Zugriff am 2023-07-20.
- [113] Statistisches Bundesamt: Fehlverhalten der Fahrer bei Unfällen mit Personenschaden. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Tabellen/fehlverhalten-fahrzeugfuehrer.html>. Zugriff am 2023-07-20.
- [114] Statistisches Bundesamt: Fehlverhalten der Radfahrer/innen bei Unfällen mit Personenschaden. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Tabellen/fehlverhalten-radfahrer.html>. Zugriff am 2023-07-20.
- [115] Gib Acht im Verkehr: Das Verkehrsunfallgeschehen in Baden-Württemberg 2020. <https://www.gib-acht-im-verkehr.de/service/statistik-2-2/>. Zugriff am 2023-07-20.
- [116] Tagesschau: Fehlender Mindestabstand beim Überholen von Radfahrern. <https://www.tagesschau.de/inland/gesellschaft/radfahren-101.html>. Zugriff am 2023-07-20.
- [117] Hessenschau: Sensoren zeigen, wo Radfahrer zu nah überholt werden. <https://www.hessenschau.de/wirtschaft/verkehrssicherheit/>

-sensoren-zeigen-wo-radfahrer-zu-nah-\ueberholt-werden-v1,  
fahrrad-sensoren-abstand-auto-sicherheit\~100.html#:~:  
text=Das%20Ergebnis%3A%20In%2050%20Prozent, zu%20nah%20%C3%  
BCberholt%20zu%20werden. Zugriff am 2023-07-20.

- [118] Statistisches Bundesamt. *VERKEHRSUNFÄLLE: Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr 2021*. Statistisches Bundesamt, 2021.
- [119] Umweltbundesamt: Fahrleistungen, Verkehrsleistung und Modal Split in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#undefined>. Zugriff am 2023-07-20.
- [120] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Deutsches Institut für Urbanistik. Mikromobilität auf Geh- und Radwegen – Nutzungskonflikte und verkehrliche Wirkungen (MMoNK). Interne Präsentation des Institus für Verkehrssystemtechnik, Stand: 16.11.2021.
- [121] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: UTRaCar und MoMoCar. [https://www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-1237/5441\\_read-12153/](https://www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-1237/5441_read-12153/). Zugriff am 2023-08-30.
- [122] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. MMoNK: Texte/Veröffentlichungen. Internes Dokument des Institus für Verkehrssystemtechnik, Stand: 23.03.2022.
- [123] Wetterkontor: Höchst- und Tiefstwerte in Berlin am 14.09.2021. <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/extremwerte-berlin.asp?id=20210914>. Zugriff am 2023-08-30.
- [124] Weather Spark: 14. September 2021, Wetterverlauf in Berlin. <https://de.weatherspark.com/h/d/75981/2021/9/14/Historisches-Wetter-am-Dienstag-14.-September-2021-in-Berlin-Deutschland#Figures-Temperature>. Zugriff am 2023-08-30.
- [125] Sonnenaufgang und Sonnenuntergang: Berlin, Dienstag, 14. September 2021. <https://www.sunrise-and-sunset.com/de/sun/deutschland/berlin/2021/september/14>. Zugriff am 2023-08-16.
- [126] Bundesministerium für Gesundheit: Coronavirus-Pandemie: Was geschah wann? <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/coronavirus/chronik-coronavirus.html>. Zugriff am 2023-08-16.

- [127] Arbeitstage: Feiertage 2021 in Berlin. <https://www.arbeitstage.org/berlin/feiertage-2021-berlin/>. Zugriff am 2023-08-16.
- [128] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: Datenschutz der UTRaCar-Messkampagne im Projekt MMoNK. <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/mikromobilitaet-auf-geh-und-radwegen-nutzungskonflikte-und-verkehrliche-wirkungen-mmonk-0>. Zugriff am 2023-08-16.
- [129] Leschik, C., Zhang, M., Hardinghaus, M. Analysis and comparison of the driving behaviour of e-scooter riders and cyclists using video and trajectory data in Berlin, Germany. In *Contributions to the 10th International Cycling Safety Conference 2022 (ICSC2022)*, pages 54–56, 2022.
- [130] tasi 6.0.1.dev83 documentation: Object reference points. [https://igm-mov.pages.gitlab.dlr.de/products/tasi/getting\\_started/reference\\_positions.html](https://igm-mov.pages.gitlab.dlr.de/products/tasi/getting_started/reference_positions.html). Zugriff am 2023-08-16.
- [131] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (MMoNK): Meilensteinbericht. Internes Dokument des Institus für Verkehrssystemtechnik, Stand: 23.02.2022.
- [132] DLR.Wiki: IGM-MOV TASI. <https://wiki.dlr.de/pages/viewpage.action?spaceKey=tswiki&title=IGM-MOV+TASI>. Zugriff am 2023-08-16.
- [133] geojson.io. <https://geojson.io/>. Zugriff am 2023-08-16.
- [134] tasi 6.0.1.dev83 documentation: TTC-based traffic analysis. [https://igm-mov.pages.gitlab.dlr.de/products/tasi/user\\_guide/data\\_analysis/TTC\\_analysis.html?highlight=ttc](https://igm-mov.pages.gitlab.dlr.de/products/tasi/user_guide/data_analysis/TTC_analysis.html?highlight=ttc). Zugriff am 2023-09-04.
- [135] pandas 2.1.0 documentation: pandas.dataframe.rolling. <https://pandas.pydata.org/docs/reference/api/pandas.DataFrame.rolling.html>. Zugriff am 2023-09-04.
- [136] NumPy v1.25 Manual: numpy.linalg.norm. <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.linalg.norm.html>. Zugriff am 2023-09-04.
- [137] Google Maps. <https://www.google.com/maps>. Zugriff am 2023-09-09.
- [138] Matplotlib 3.7.3 documentation: matplotlib.pyplot.hexbin. [https://matplotlib.org/stable/api/\\_as\\_gen/matplotlib.pyplot.hexbin.html](https://matplotlib.org/stable/api/_as_gen/matplotlib.pyplot.hexbin.html). Zugriff am 2023-09-04.

- [139] ADAC: ADAC Test Radwegbreiten: Wie breit ist breit genug? <https://presse.adac.de/regionalclubs/niedersachsen-sachsen-anhalt/adac-test-radwegbreiten-wie-breit-ist-breit-genug.html>. Zugriff am 2023-09-09.
- [140] ADFC: Kommt die ERA 2023? <https://bochum.adfc.de/artikel/kommt-die-era-2023>. Zugriff am 2023-09-09.
- [141] Statista: Anzahl der E-Bikes je 100 private Haushalte in Deutschland in den Jahren 2014 bis 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/597787/umfrage/anzahl-der-e-bikes-in-privaten-haushalten-deutschland/>. Zugriff am 2023-09-09.
- [142] Statista: Absatz von Lastenrädern in Deutschland von 2018 bis 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1381784/umfrage/absatz-von-lastenraedern-in-deutschland/>. Zugriff am 2023-09-09.

# ANHANG A

## PYTHON-CODE ZUR DETEKTION VON ÜBERHOLVORGÄNGEN

```
1 # libraries importieren
2 import pandas as pd
3 import methods
4 from shapely.geometry import Point
5 from array import *
6 from tasi.dataset import ObjectDataset
7
8 # Dateipfade einlesen
9
10 paths=['path']
11
12 # Polygone einlesen
13
14 polygon_nord='file.geojson'
15 polygon_sued='file.geojson'
16
17 list_of_polygons_nord = methods.read_polygons(polygon_nord)
18 list_of_polygon_objects_utm1 = methods.lat_long_into_utm(list_of_polygons_nord)
19
20 list_of_polygons_sued = methods.read_polygons(polygon_sued)
21 list_of_polygon_objects_utm2 = methods.lat_long_into_utm(list_of_polygons_sued)
22
23 for path in paths:
24
25     df=ObjectDataset.from_csv('file.csv')
26
27     df_list=df.ids.unique()
28
29 # ID und Zeitstempel der Trajektorien bei Durchqueren der Polygone
30
31     ids_crossing_polygon_nord=[]
32     ids_crossing_polygon_sued=[]
33     time_crossing_polygon_nord=[]
34     time_crossing_polygon_sued=[]
35
36 # Polygon Nord ueberpruefen
37
38     for i in df_list:
39         for j in range(len(df.trajectory([i]))):
40             point_north = Point(df.trajectory([i]).center.easting.values[j], df.trajectory([i]).center.northing.values[j])
41             if list_of_polygon_objects_utm1[0].contains(point_north):
42                 ids_crossing_polygon_nord.append(i)
43                 time_crossing_polygon_nord.append(df.trajectory([i]).index[j])
44                 break
45
46 # Polygon Sued ueberpruefen
```

```
47
48     for i in df_list:
49         for j in range(len(df.trajectory([i]))):
50             point_south = Point(df.trajectory([i]).location.easting.values[j], df.trajectory([i]).location.northing.values[j])
51             if list_of_polygon_objects_utm2[0].contains(point_south):
52                 ids_crossing_polygon_sued.append(i)
53                 time_crossing_polygon_sued.append(df.trajectory([i]).index[j])
54                 break
55
56 # Vergleich der Listen
57
58 ids_crossing_both_polygons = []
59 for x in ids_crossing_polygon_nord:
60     if x in ids_crossing_polygon_sued:
61         ids_crossing_both_polygons.append(x)
62
63
64 df_id_nord=pd.DataFrame({'id_1':ids_crossing_polygon_nord})
65 df_id_nord=df_id_nord.assign(time_1=time_crossing_polygon_nord)
66
67 df_id_sued=pd.DataFrame({'id_2':ids_crossing_polygon_sued})
68 df_id_sued=df_id_sued.assign(time_2=time_crossing_polygon_sued)
69
70 # IDs als Index verwenden
71
72 df_id_nord.set_index('id_1', inplace=True)
73 df_id_sued.set_index('id_2', inplace=True)
74
75 # Vorzeichenwechsel pruefen
76
77 for m in ids_crossing_both_polygons:
78     for n in ids_crossing_both_polygons:
79         if n>m:
80             if ((
81                 ((df_id_nord['time_1'][m])-(df_id_nord['time_1'][n])).total_seconds() < 0
82             )
83                 and
84                 ((df_id_sued['time_2'][m])-(df_id_sued['time_2'][n])).total_seconds() > 0
85             ):
86                 print(m, n, "ueberholt", file=open('file.txt', 'a'))
87
88
89             elif ((
90                 ((df_id_nord['time_1'][m])-(df_id_nord['time_1'][n])).total_seconds() > 0
91             )
92                 and
93                 ((df_id_sued['time_2'][m])-(df_id_sued['time_2'][n])).total_seconds() < 0
94             ):
95                 print(m, n, "ueberholt", file=open('file.txt', 'a'))
```