Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Verkehrssystemplanung

Masterarbeit

Aufbau und Anwendung eines Messverfahrens zur Erhebung und Auswertung der seitlichen Überholabstände zwischen Kfz- und Radverkehr im Innerortsbereich sowie Analyse ausgewählter Einflussfaktoren

eingereicht durch B.Sc. Wiebke Mros
Matrikel-Nummer: 119849

Reg.-Nr.:	UIM/2021/6
Erstprüfer:	Prof. Dr.-Ing. U. Plank-Wiedenbeck
Zweitprüfer:	M. Sc. Wido Hamel
Ausgabetermin:	06.05.2021
Abgabetermin:	06.09.2021

Prof. Dr. G. Morgenthal
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Weimar, den 10.08.2021 Wiebke Mros

Kurzfassung

Im Rahmen der Novelle der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) im Jahr 2020 wurde zum Schutz von Radfahrenden ein verbindlicher Mindestabstand von 1,50 Metern innerorts und 2,00 Metern außerorts eingeführt. Doch trotz der StVO-Novelle werden Radfahrende vielfach mit einem geringeren Abstand durch den Kraftfahrzeug (Kfz-)verkehr überholt, was zu einer Beeinträchtigung der individuell wahrgenommenen Sicherheit von Radfahrenden führt. Mit Abstandsmessungen bei Überholvorgängen (ÜHV) zwischen Kfz- und Radverkehr kann dieses subjektive Sicherheitsempfinden bezüglich zu enger Überholabstände quantifiziert werden und dadurch Verkehrsplanenden als Grundlage für Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit von Radfahrenden dienen.

Hier setzt die vorliegende Arbeit, die einen Beitrag zur Erweiterung der Datenbasis schafft, an: Mit dem OpenBikeSensor (OBS), einem Open Source Projekt zur ultraschallbasierten Abstandsmessung, werden mit einem Feldversuch in Weimar Überholvorgänge erfasst und ausgewertet. Dabei wird der Einfluss der Art der Radverkehrsführung sowie der Einfluss des Abstands zum rechten Fahrbahnrand von Radfahrenden auf den Abstand, den der Kfz- zum Radverkehr einhält, untersucht.

Die Auswertung zeigt, dass der Mindestüberholabstand im Mittel deutlich unterschritten wird und sowohl die Art der Radverkehrsführung als auch die Position der Radfahrenden auf der Straße Auswirkungen auf den Überholabstand haben.

Überholen von Radfahrenden, Verkehrssicherheit, Ultraschallmessung, Radverkehrsführung

Abstract

As part of the amendment to the Road Traffic Act (StVO) in 2020, a mandatory minimum distance of 1.50 meters in and 2.00 meters outside of build-up areas was introduced to protect cyclists. However, despite the StVO amendment, cyclists are often overtaken too closely by motor vehicle traffic. This leads to a reduction of the subjectively perceived road safety of cyclists. With distance measurements during overtaking maneuvers between motor vehicle and bicycle traffic, this subjective safety perception can be quantified and thus serve traffic planners as a basis for measures to improve the safety of cyclists.

The present work contributes to the expansion of the data base by using the OpenBikeSensor, an open source project for ultrasonic-based distance measurement. With the OpenBikeSensor, overtaking events are recorded and evaluated with a field test in the city of Weimar. The influence of the type of bicycle traffic guidance as well as the influence of the distance to the right lane edge of cyclists on the overtaking-distance by motor vehicles to bicycles is investigated.

The evaluation shows that the minimum overtaking distance is on average significantly lower than the mandatory minimum distance and that both the type of bicycle traffic guidance and the position of the cyclists on the road have an effect on the overtaking distance.

Overtaking bicycle riders, traffic safety, ultrasonic measurement, bicycle traffic guidance

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abbildungsverzeichnis III

Verzeichnis der Tabellen V

Verzeichnis der Abkürzungen und der Symbole VI

1 Einleitung 1

1.1 Hintergrund und Problemstellung 1

1.2 Datenverfügbarkeit im Radverkehr 2

1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit 4

2 Grundlagen und Erkenntnisstand 5

2.1 Entwicklung Radverkehr 5

2.2 Radverkehrsanlagen 6

2.3 Objektive und subjektive Verkehrssicherheit 9

2.4 Überholabstände 13

2.4.1 Gesetze und Regelwerke 13

2.4.2 Physikalische Betrachtung 16

2.4.3 Bestehende Untersuchungen zur Seitenabstandsmessung 17

2.5 Zusammenfassung und Ableitung der Forschungshypothesen 22

3 Untersuchungsdesign 23

3.1 Methodik 23

3.2 Szenarien 24

3.3 Auswahl Messstrecken 26

3.4 Quantifizierung der seitlichen Abstände 29

3.4.1 Übersicht Messtechnik 29

3.4.2 Auswahl Messtechnik 33

4 Feldversuch 35

4.1 Vorbemerkung Erhebungskonzept 35

4.2 Sensorbau 36

4.3 Sensorvalidierung 44

4.4 Stichprobenumfang 48
4.5 Durchführung der Erhebungsfahrten 49
5 Ergebnisse und Auswertung 53
5.1 Vorgehen zur Auswertung 53
5.2 Fehlerdokumentation 56
5.3 Ergebnisse der Szenarien 59
5.4 Diskussion und Auswertung 65
6 Zusammenfassung und Fazit 69
6.1 Zusammenfassung 69
6.2 Reflexion der Methodik und weiterer Forschungsbedarf 69
6.3 Handlungsempfehlungen und Ausblick 72
7 Literaturverzeichnis 75
Verzeichnis der Anhänge LXXXVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Anlage eines Radfahrstreifens gemäß ERA 7

Abbildung 2 Anlage eines Schutzstreifens gemäß ERA 7

Abbildung 3 Belastungsbereiche zur Vorauswahl von Radverkehrsführungen bei zweistreifigen Stadtstraßen (ERA) 8

Abbildung 4 Anzahl getötete Radfahrende seit 2002 - gesamt sowie innerorts 9

Abbildung 5 Anzahl verunglückte Radfahrende in Deutschland seit 2002 10

Abbildung 6 "Fühlen Sie sich im Straßenverkehr sicher, wenn Sie Rad fahren?“ (Angaben in Prozent) 12

Abbildung 7 Definition ÜHA (eigene Darstellung nach ADFC) 14

Abbildung 8 Lichter Raum, Verkehrsraum und Sicherheitsraum (S) (ERA) 14

Abbildung 9 Nebeneinanderfahren nach RASt 15

Abbildung 10 Vier Phasen eines ÜHV von einem Fahrrad durch ein Kfz 17

Abbildung 11 Untersuchte Szenarien - Querschnitte und Fahrradposition von oben eigene Darstellung) 25

Abbildung 12 Lage der Messstrecken (dunkelblau markiert) 27

Abbildung 13 Beispiel Steckbrief Messstrecke Marienstraße 28

Abbildung 14 PCB des OBS mit Anbauteilen (links und Mitte), Display mit rotem Druckknopf (rechts) 37

Abbildung 15 Blick auf die Platine mit Anbauteilen im Gehäuse des OBS 38

Abbildung 16 Messfahrrad mit OBS an Sattelstütze 39

Abbildung 17 Anbringung und Sicherung OBS an Sattelstütze 41

Abbildung 18 Displaymontage des OBS an Fahrradlenker 41

Abbildung 19 Display des OBS (Startbildschirm, Abstandsmessung, Datenupload) 43

Abbildung 20 Bestimmung der Sensorgenauigkeit - Messung gegen Hauswandand 44

Abbildung 21 Mittelwerte der Abweichung der OBS-Messung zur Lasermessung 45

Abbildung 22 Ausrichtung Fahrrad - Fahrzeug, verschiedene Winkel (eigene Darstellung) 46

Abbildung 23 Ungenauigkeiten durch nicht parallele Position von Fahrzeug und Fahrrad (ohne Lenkeinschlag Fahrrad) (eigene Darstellung) 46

Abbildung 24 Fixpunkte am Fahrradlenker für seitliche Abstände nach rechts 47

Abbildung 25 Sichtbarkeit OBS an Sattelstütze 50

Abbildung 26 Visualisierung der manuellen Zuordnung von ÜHV mit ungenauen GPS-Daten –am Beispiel Erfurter Straße 54

Abbildung 27 Ablesbare Kenngrößen aus Boxplot-Diagramm 55

Abbildung 28 Auschluss der Erhebung vom 1.7.2021 wegen Fehlermeldung.....57

Abbildung 29 Histogramme der ÜHA aller Szenarien 61

Abbildung 30 Karte Messstrecken - ÜHA bei Position 2 62

Abbildung 31 Boxplots ÜHA: Einfluss der Position der Radfahrerin bei den jeweiligen Radverkehrsführungsformen 63

Abbildung 32 Boxplots ÜHA: Einfluss der unterschiedlichen Radverkehrsführungen je nach Position der Radfahrerin 64

Abbildung 33 Histogramm der relativen Anteile der ÜHV nach Abstandsgruppe im Szenario MoS.....65

Abbildung 34 Zusammenhang zwischen Position Fahrrad und Position Kfz bei MmS und RFS.....66

Abbildung 35 Vergleich ÜHA Szenario MoS mit und ohne Mittelmarkierung.....67

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1 Belastungsbereiche und geeignete Führungsformen nach ERA 8

Tabelle 2 Identifikation von Einflussfaktoren auf Überholabstände (Literaturrecherche) 19

Tabelle 3 Überblick ausgewählter nationaler Studien zu ÜHA 21

Tabelle 4 Erhebungsumfang und Erfassungsmethode 23

Tabelle 5 Überblick untersuchter Szenarien und Szenarienbezeichnung 24

Tabelle 6 Ausgewählte Messstrecken 26

Tabelle 7 Überblick erfassbare Einflussfaktoren durch verschiedene Messtechnik.....33

Tabelle 8 Python-Befehl zum Flashen der Firmware auf den OBS 40

Tabelle 9 Statistische Kenngrößen: Abweichung der OBS-Messung zur Lasermessung.....45

Tabelle 10 Erforderlicher Stichprobenumfang bei α = 0,95, Normalverteilung, basierend auf Vorerhebung mit 25 ÜHV.....49

Tabelle 11 Überblick über die Erhebungszeiten der Szenarien mit Witterung und mittlere Geschwindigkeit des Fahrrads 52

Tabelle 12 Fehlerhafte Messwerte: Netto-ÜHA negativ 58

Tabelle 13 Mittelwert, Standardabweichung und Anzahl ÜHV der Szenarien 59

Verzeichnis der Abkürzungen und der Symbole

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
ADFC	Allgemeiner Deutscher Fahrradclub	
ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)	
API	Application Programming Interface	
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	
CDH	CycleDataHub	
ERA	Empfehlungen für Radverkehrsanlagen	
FACE	Filtering, Annotation, Consolidation, Export	
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen	
FGÜ	Fußgängerüberweg	
Fzg	Fahrzeug	
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem (Global Navigation Satellite System)	
GPS	Global Positioning System	
IT	Informationstechnik	
Kfz	Kraftfahrzeug	
LiDAR	Light Detection and Ranging	
LSA	Lichtsignalanlage	
MiD	Mobilität in Deutschland	
MmS+	Bezeichnung Untersuchungsszenario (Mischverkehr mit Schutzstreifen und Mittelmarkierung)	
MoS-	Bezeichnung Untersuchungsszenario (Mischverkehr ohne Schutzstreifen, ohne Mittelmarkierung)	
MoS+	Bezeichnung Untersuchungsszenario (Mischverkehr ohne Schutzstreifen, mit Mittelmarkierung)	
OBS	OpenBikeSensor	
OLED	Organic Light Emitting Diode	
PCB	Printed Circuit Board	
Pkw	Personenkraftwagen	
Radar	Radio Detection and Ranging	
RASt	Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen	
RFS	Radfahrstreifen	
RFS+	Bezeichnung Untersuchungsszenario (Radfahrstreifen mit Mittelmarkierung)	
RVA	Radverkehrsanlage	

SD-Karte	Secure Digital Memory Card („sichere digitale Speicherkarte“)	
SimRa	Sicherheit im Radverkehr (Applikation)	
SSF	Schutzstreifen	
SSID	Service Set Identifier	
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung	
ToF	Time of Flight	
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter	
UDV	Unfallforschung deutscher Versicherer	
ÜHA	Überholabstand	
ÜHV	Überholvorgang	
v_{85}	Quantilsgeschwindigkeit, die von 85 % der Fzg eingehalten wird	[km/h]
VwV-StVO	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur StVO	
v_{zul}	Zulässige Höchstgeschwindigkeit	[km/h]
WLAN	Drahtlosnetzwerk (Wireless Local Area Network)	
ZIV	Zweirad-Industrie-Verband	

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Radfahrende werden auch seit dem Inkrafttreten der StVO-Novelle 2020, die unter anderem einen Mindestüberholabstand zu Radfahrenden von innerorts 1,50 Metern festlegt, in vielen Situationen mit einem geringeren Abstand von Kraftfahrzeugen überholt.[1] Bereits vor der StVO-Novelle war ein Überholabstand (ÜHA) von mindestens 1,50 Metern ein gängiger Wert in der Rechtsprechung.[2] Ausreichende Abstände beim Überholen sind eine Komponente, um die Verkehrssicherheit von Radfahrenden zu erhöhen und die Zahl der Unfälle und Verunglückten zu vermindern.[3] Enge Überholvorgänge (ÜHV) tragen außerdem dazu bei, dass sich Radfahrende unsicher fühlen. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Akzeptanz von Radverkehrsanlagen (RVA).[4]

Eine Möglichkeit, das subjektive Sicherheitsempfinden mit objektiven Daten zu belegen, ist die messtechnische Erfassung von ÜHV. Durch die Identifikation relevanter Einflussfaktoren und deren Auswertung können ÜHV in ihrer Komplexität erfasst und planerische Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, um die Verkehrssicherheit von Radfahrenden zu erhöhen.[5]

Im Jahr 2018 gab es mit dem Radmesserprojekt vom Tagesspiegel in Berlin ein medienwirksame Aufarbeitung von ÜHA-Daten: Mithilfe von Ultraschallsensoren wurden ÜHV von 100 Radfahrenden aus den verschiedenen Berliner Stadtbezirken erfasst und vom Tagesspiegel grafisch ausgewertet. Die Daten zeigen, in welchen Situationen und wo Radfahrende in Berlin besonders eng überholt werden.[6] Dieses Projekt fand Nachahmung beispielsweise mit dem OpenBikeSensor (OBS), der ebenfalls mithilfe von Ultraschallsensoren Überholabstände misst und als Open Source Projekt für alle Menschen eine Anleitung zum Nachbau digital zur Verfügung stellt.[7]

Dass das Thema Überholabstände seit Inkrafttreten der StVO-Novelle nicht an Relevanz verloren hat, zeigen aktuelle Pressebeiträge, wie eine Sendung bei Quarks vom WDR zum Thema „Mehr Sicherheit für Fahrradfahrer“[8], ein Deutschlandfunk Nova Beitrag zum OpenBikeSensor[9] oder der Beitrag der Tagesschau „Eng überholt statt ernst genommen“[10]. Unter dem Hashtag #besserRadfahren hat der SWR im Mai 2021 Meldungen zu

[1] Lißner 2021; StVO, 01.04.2013, S. 4.
[2] Langer 2016, S. 14.
[3] Koppers et al. 2021, S. 6.
[4] Richter 2019, S. 1.
[5] Lißner 2021.
[6] Tagesspiegel Online 2018.
[7] OpenBikeSensor-Community 2021a.
[8] Gion und Haase 2020.
[9] Sonntag 2021.
[10] Reutter 2021a.

Behinderungen und Gefahrenstellen von Radfahrenden gesammelt, ausgewertet und in einer Karte visualisiert. Die am häufigsten genannte Konflikt- und Unfallursache war bei 10.756 Meldungen das enge Überholen mit 535 Meldungen.[11] Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen dieser Arbeit ÜHV zwischen Kfz- und Radfahrenden näher untersucht.

1.2 Datenverfügbarkeit im Radverkehr

Während datenbasierte Ansätze im Kraftfahrzeugbereich weit entwickelt sind und weiter entwickelt werden, sind vergleichbare Ansätze für eine intelligente Fahrradmobilität noch wenig erforscht und finden kaum Anwendung.[12] Das gilt für die Betrachtung von makroskopischen Kenngrößen wie der Verkehrsstärke, aber auch für die Erfassung von mikroskopischen Kenngrößen, die das Verhalten von Einzelfahrzeugen betrachten. Der Verkehrsablauf ist durch individuelle, komplexe Bewegungsprozesse wie Beschleunigen, Fahren, Bremsen, Anhalten und Überholen gekennzeichnet, die wiederum kollektiv durch andere Verkehrsteilnehmende beeinflusst werden.[13] Gibt es für den motorisierten Verkehr Fahrverhaltensmodelle, die auf mikroskaligem Niveau Simulationen von Fahrer:in-Fahrzeug-Einheiten erlauben, fehlen derartige Modelle für den Radverkehr weitestgehend.[14] Dabei können Informationen über Beschleunigung, Bremsen, Reaktionsgeschwindigkeit oder auch über den Einfluss überholender Fahrzeuge auf die Stabilität der Radfahrenden einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Fahrdynamik und des -verhaltens und damit auch zur Verkehrssicherheit von Radfahrenden leisten.[15] So können Abstandmessungen für Verkehrsplanende als Grundlage dienen, kritische Strecken und Infrastrukturen sowie Einflussfaktoren für zu enge Überholvorgänge zu identifizieren und geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit von Radfahrenden abzuleiten.[16]

Erst mit einer Studie von Walker (2007) wurden erstmals Daten aus Sicht von Radfahrenden erhoben – hier wurde ein Fahrrad mit Ultraschallsensoren ausgestattet, um Überholabstände zu ermitteln. Davor erfolgten Untersuchungen zu Radfahrenden, wenn überhaupt, mittels Beobachtungen aus dem Straßenseitenraum.[17] Mithilfe von weiteren Sensoren am Fahrrad, wie Beschleunigungsmessern (longitudinale, laterale und vertikale Beschleunigung), Bremskraftmessern, Geschwindigkeitssensoren, Global Positioning System (GPS) und Kamera können zusätzlich wichtige Daten zu Fahreigenschaften von Fahrrädern unter realen Bedingungen erhoben werden.[18] Diese Fahrverhaltensdaten, wie beispielsweise der Einfluss der Dauer von Überholvorgängen auf das stabile Fahren von Radfahrenden, können objektive

[11] Reutter 2021b.
[12] Küster et al. 2020, S. 146ff.
[13] Erlemann 2007, S. 15.
[14] Dozza und Fernandez 2014, S. 376; Erlemann 2007, S. 32f.
[15] Chuang et al. 2013, S. 32f.; Dozza und Fernandez 2014, S. 383.
[16] Lißner 2021.
[17] Chuang et al. 2013, S. 33.
[18] Ebd., S. 35; Dozza und Fernandez 2014, S. 379.

Hinweise auf subjektiv wahrgenommene Unsicherheitsfaktoren liefern.[19] Studien von Dozza et al. (2016) und Dozza und Fernandez (2014) liefern ein grundlegendes Framework für Hard- und Softwarekomponenten zur Erhebung von realen Fahrverhaltensdaten von Radfahrenden. Sie zeigen aber auch auf, dass mehr Radfahrende in weiteren Umgebungen mehr Daten erheben müssen, um ein umfassenderes Bild und aussagekräftige Auswertungen zu erhalten.

Auch smartphone-basierte Applikationen wie Bike Citizen (Routing App mit Analysefunktionen wie Heat Maps et cetera) oder SimRa (Sicherheit im Radverkehr – automatische Detektion von Gefahrenstellen durch Nutzung der Beschleunigungssensoren im Smartphone) schaffen Voraussetzungen für intelligente, datenbasierte Fahrradmobilität.[20] Die Zunahme von E-Bikes bietet eine weitere Chance, mehr Daten zu aggregieren. Die in E-Bikes integrierten Fahrradcomputer sammeln bereits heute vielfältige Informationen, diese werden aber nicht verwendet.[21]

Im Jahr 2019 wurde außerdem das Projekt Radmesser des Berliner Tagesspiegels mit dem Deutschen Fahrradpreis ausgezeichnet. Dort haben rund 100 Menschen mittels am Fahrrad montierter Ultraschallsensoren circa zwei Monate lang Abstandsdaten auf ihren alltäglichen Wegen erhoben, die seitdem quelloffen zur Verfügung stehen und wichtige Informationen zu Überholabständen liefern.[22] Daraus entwickelte sich das Projekt OpenBikeSensor, das ebenfalls auf Ultraschallsensoren basiert und als Open Source Projekt den Nachbau eines solchen Abstandssensors zum Messen von Überholabständen ermöglicht.[23]

Erdei et al. (2020) gehen mit ihrem Ansatz über die Datensammlung hinaus und prüfen, welche Art von Informationsvermittlung (auditiv, visuell, haptisch, vibro-taktil) am besten für Fahrassistenzsysteme für Radfahrende geeignet ist. Ziel derartiger Fahrassistenzsysteme ist die frühzeitige Warnung von Radfahrenden vor Gefahren im Straßenverkehr.

Mittlerweile wird von Städten und IT-Dienstleistern an Datenstandards für Radverkehrsdaten gearbeitet.[24] Analog zur mCloud, einem Datenportal des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), das unter anderem Verkehrs-, Klima- und Wetterdaten verfügbar macht,[25] werden auf europäischer Ebene, ausgehend vom Nordseeraum, Radverkehrsdaten in einen „CycleDataHub“ (CDH) zusammengeführt und stehen zur freien Verfügung bereit.[26]

---

[19] Chuang et al. 2013, S. 40.
[20] Bike Citizens Mobile Solutions GmbH; Einstein Center Digital Future [ECDF].
[21] Küster et al. 2020, S. 148; Tagesspiegel Online 2018.
[22] Tagesspiegel Online 2018; Küster et al. 2020, S. 148.
[23] OpenBikeSensor-Community 2021a.
[24] Küster et al. 2020, S. 147.
[25] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [BMVI] 2021.
[26] Küster et al. 2020, S. 149; Bicycle and Intelligent Transport Systems [BITS] 2021.

1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Hauptziel, die in Kapitel 2.5 genannten Forschungshypothesen zu Überholabständen in einem Feldversuch zu überprüfen. Zur Messung von Überholabständen können verschiedene Messtechnologien zum Einsatz kommen (Kapitel 3.4). Diese werden vorgestellt und der OBS für den Feldversuch ausgewählt. Daraus ergibt sich das zweite Ziel der Arbeit: Der OBS soll im Kontext der Sammlung und Bereitstellung von offenen Radverkehrsdaten bewertet werden.

Anknüpfend an eine Literaturrecherche zur Entwicklung des Radverkehrs, der Verkehrssicherheit, Radverkehrsführungsformen und Überholabständen (Kapitel 2), wird das Untersuchungsdesign für den Feldversuch vorgestellt, der Bau und die Inbetriebnahme des OBS beschrieben und seine Kalibrierung vorgenommen (Kapitel 3 und 4). Im Anschluss werden die Untersuchungsstrecken und der erforderliche Stichprobenumfang für die Messfahrten beschrieben sowie die Durchführung der Messfahrten erläutert (Kapitel 4). Nachfolgend werden die Ergebnisse der erhobenen Überholabstände präsentiert und ausgewertet (Kapitel 5). Es werden die Hypothesen überprüft, die Verwendung des OBS diskutiert und Fehlerquellen erörtert. Im Fazit wird neben der Zusammenfassung ein Ausblick gegeben, inwiefern Abstandsmessungen die Verkehrssicherheit von Radfahrende verbessern können und welche weiteren Daten erhoben werden sollten, um Überholvorgänge und die Auswirkungen auf Radfahrende besser zu verstehen (Kapitel 6).

2 Grundlagen und Erkenntnisstand

2.1 Entwicklung Radverkehr

Gemäß der Erhebung „Mobilität in Deutschland“ (MiD) stieg das Verkehrsaufkommen des Radverkehrs zwischen 2002 und 2017 in Deutschland um 13 Prozent auf 28 Millionen Wege pro Jahr. Auch die Verkehrsleistung stieg – um 37 Prozent auf 112 Millionen Personenkilometer zwischen 2002 und 2017.[27] Der Modal Split, hier als Anteil des Radverkehrs am Wegeaufkommen, liegt 2017 bundesweit bei 11 Prozent (im Jahr 2002: 9 Prozent). Dabei gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Raumtypen; in Metropolen liegt der Modal Split bei 15 Prozent, im Jahr 2002 waren es hier noch 9 Prozent und in ländlichen Regionen in kleinstädtischen beziehungsweise dörflichen Räumen bei 7 Prozent (2002: 9 Prozent).[28]

Neben den Stadtstaaten Bremen, Hamburg und Berlin ist der Modal Split in Niedersachsen (15 Prozent), Mecklenburg-Vorpommern (14 Prozent) und Schleswig-Holstein (13 Prozent im Bundesland-Vergleich besonders hoch. Hessen und Rheinlandpfalz (je 8 Prozent), Thüringen (7 Prozent) und das Saarland (3 Prozent) belegen in diesem Vergleich die letzten Plätze. Nur in Thüringen, Brandenburg und Sachsen-Anhalt ist seit 2002 eine Abnahme des Fahrradanteils am Verkehrsaufkommen zu verzeichnen. Dies wird in der MiD unter anderem auf eine steigende Personenkraftwagen (Pkw)-Besitzquote zurückgeführt.[29]

Der generelle Anstieg an Wegen, die mit dem Fahrrad zurückgelegt werden, lässt sich auf eine zunehmende Anzahl von Radfahrenden, nicht jedoch auf mehr Wege pro radfahrender Person zurückführen.[30] Außerdem sind die Tagesstrecken mit dem Rad länger geworden – werktags (Montag – Freitag) sind sie durchschnittlich 8,8 Kilometer lang. Wesentliche Wegezwecke sind Arbeit und Freizeit, gefolgt von Einkauf, Erledigung, Ausbildung und dienstlichen Wegen.[31]

Die Anzahl der Fahrräder pro Kopf ist seit 2002 von 0,86 auf 0,93 Fahrräder 2017 gestiegen. Damit stehen den Haushalten in Deutschland im Schnitt 1,9 Fahrräder zur Verfügung (im Vergleich: 1,1 Pkw pro Haushalt).[32]

Wurden im Jahr 2017 noch 3,85 Millionen Fahrräder und E-Bikes in Deutschland verkauft, waren es im Jahr 2020 nach Daten des Zweirad-Industrie-Verbands (ZIV) 5,04 Millionen Fahrräder und E-Bikes.[33] Der ZIV verzeichnete einen Anstieg zum Vorjahr der verkauften Gesamtstückzahl an Fahrrädern und E-Bikes um 17 Prozent im Jahr 2020. Werden nur die E-Bikes betrachtet, so wurden 2020 rund 43 Prozent mehr verkauft. Damit machen E-Bikes

[27] Nobis 2019, S. 19.
[28] Ebd., S. 19.
[29] Ebd., S. 21.
[30] Ebd., S. 22f.
[31] Ebd., S. 25.
[32] Ebd., S. 26.
[33] ZIV 2018, S. 6, 2021, S. 4.

einen Anteil am Gesamtmarkt von knapp 39 Prozent aus.[34] Neben der allgemeinen Entwicklung der Fahrradmobilität und Dienstfahrrad-Leasing-Angeboten trug die Covid-19-Pandemie zu einer Verkaufssteigerung bei.[35]

Die Pandemie hat darüber hinaus für eine weitere Steigerung des Radverkehr gesorgt. 25 Prozent der Deutschen geben an, mehr Rad gefahren zu sein als vor der Pandemie, 18 Prozent geben an, auch nach der Pandemie das Fahrrad häufiger nutzen zu wollen.[36] Dafür muss jedoch auch die ensprechende Infrastruktur bereitstehen und das Fahrradfahren als sicher und komfortabel eingeschätzt werden.[37]

2.2 Radverkehrsanlagen

Man unterscheidet einerseits die Führung des Radverkehrs im Seitenraum oder auf der Fahrbahn, andererseits die benutzungspflichtige von der nicht benutzungspflichtigen Führungsform.[38]

Im Seitenraum werden Radwege, gemeinsame/getrennte Geh- und Radwege sowie Gehwege mit Zusatzzeichen Fahrrad frei geführt. Bei der Führung auf der Fahrbahn sind üblicherweise Radfahrstreifen (RFS) sowie Mischverkehr ohne Markierung oder mit Schutzstreifen (SSF) möglich.[39]

Eine Radwegbenutzungspflicht liegt vor, wenn Verkehrszeichen 237, 240 oder 241 StVO vorhanden sind.[40] Die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur StVO (VwV-StVO) gibt dabei lichte Breiten für Radfahrstreifen an, die in der Regel einzuhalten sind: möglichst 1,85 Meter, mindestens 1,50 Meter (einschließlich Breite des Zeichens 295). Diese Breiten gelten für die Ausweisung der Benutzungspflicht.[41] Entwurfstechnische Vorgaben machen die technischen Regelwerke Empfehlungen für Radverkehrsanlagen (ERA) und Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Auch hier beträgt die Regelbreite einschließlich der Markierung für Radfahrstreifen 1,85 Meter, bei ruhendem Verkehr sind zusätzlich Sicherheitstrennstreifen von 0,50 Meter bis 0,75 Meter Breite vorzusehen (vgl. Abbildung 1).

---

[34] ZIV 2021, S. 7.
[35] ZIV 2021, S. 27f.
[36] SINUS-Institut 2021, S. 4.
[37] MCC 2021.
[38] ERA, 2010, S. 18.
[39] Koppers et al. 2021.
[40] VwV-StVO, 26.01.2001, S. 2.
[41] VwV-StVO, 26.01.2001, S. 2.

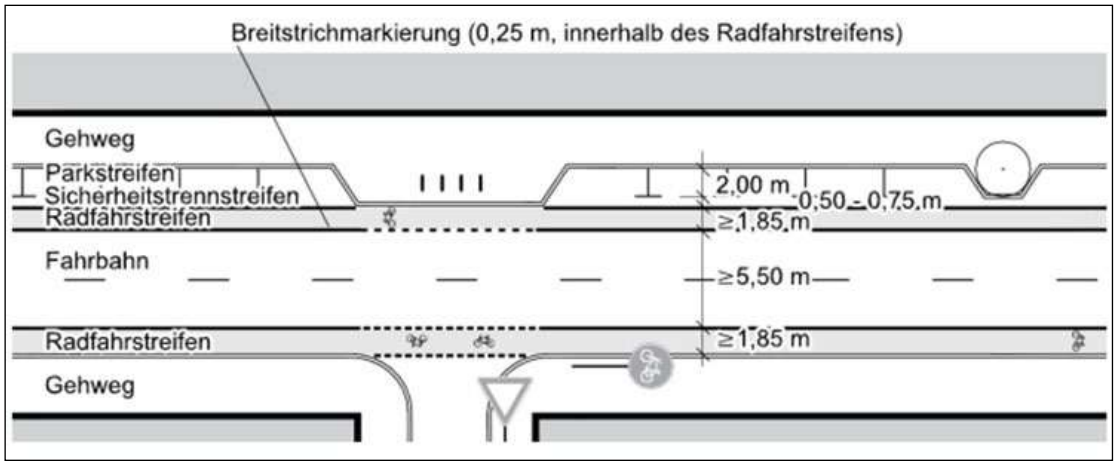


Abbildung 1 Anlage eines Radfahrstreifens gemäß ERA[42]

Schutzstreifen haben nach den ERA eine Regelbreite von 1,50 Meter beziehungsweise eine Mindestbreite von 1,25 Meter einschließlich Markierung (vgl. Abbildung 2).[43]

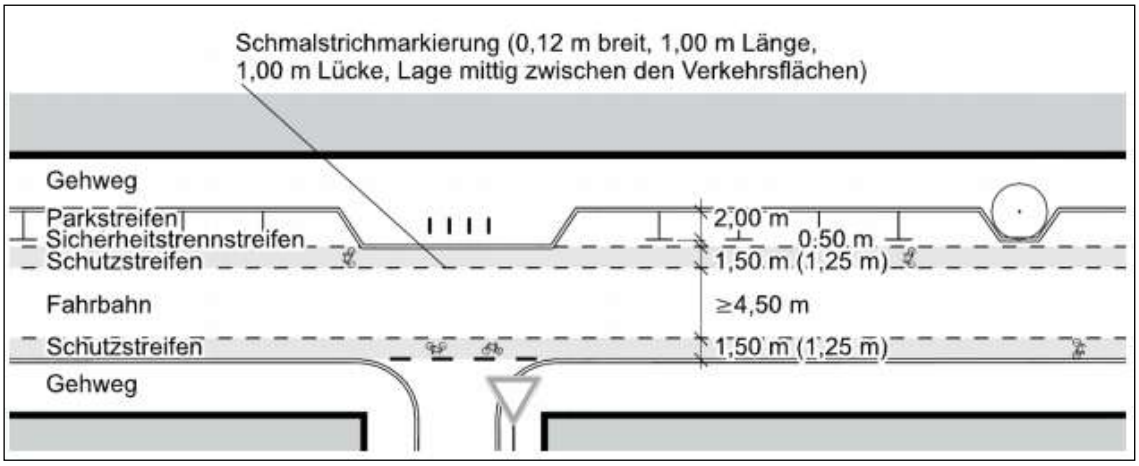


Abbildung 2 Anlage eines Schutzstreifens gemäß ERA[44]

Weitere Hinweise zur Gestaltung sowie Anwendungsbereiche finden sich in den ERA[45] und den RASt[46]. Die RASt empfehlen im Wesentlichen

- bei Verkehrsstärken bis 400 Kfz pro Stunde die Führung im Mischverkehr ohne SSF
- bei Verkehrsstärken zwischen 400 Kfz pro Stunde bis 1000 Kfz pro Stunde SSF
- bei Verkehrsstärken ab 1000 Kfz pro Stunde Radfahrstreifen oder Radwege.[47]

---

[42] ERA, 2010, S. 24.
[43] ERA, 2010, S. 24.
[44] ERA, 2010, S. 25.
[45] ERA, 2010.
[46] RASt, 2006.
[47] RASt, 2006, S. 83.

In den ERA werden unter anderem Belastungsbereiche, in Abhängigkeit der Verkehrsstärke der werktäglichen Spitzenstunde und Geschwindigkeit (zulässige Höchstgeschwindigkeit v_{zul} beziehungsweise ausnahmsweise Quantilsgeschwindigkeit v_{85}), definiert, die beschreiben, wann welche Führungsform zum Einsatz kommen soll (vgl. Abbildung 3 und Tabelle 1).[48]

Tabelle 1 Belastungsbereiche und geeignete Führungsformen nach ERA[49]

Belastungsbereich	***Führungsform***
I	Mischverkehr, keine benutzungspflichtigen Radwege
II	Mischverkehr mit zusätzlichen Angeboten wie Schutzstreifen/ nicht benutzungspflichtige Führungen
III	Führung im Seitenraum oder Mischverkehr mit Schutzstreifen/ flankierenden Maßnahmen
IV	Führung im Seitenraum

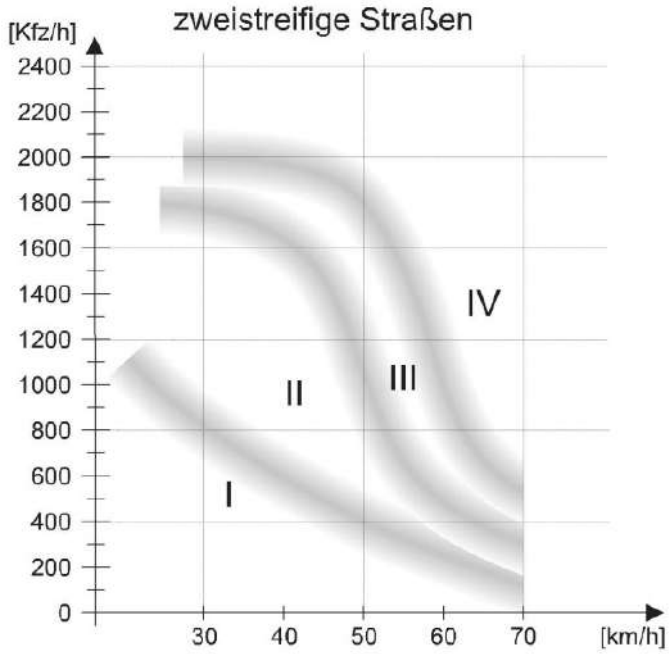


Abbildung 3 Belastungsbereiche zur Vorauswahl von Radverkehrsführungen bei zweistreifigen Stadtstraßen (ERA)[50]

Darüber hinaus werden weitere Kriterien zur Wahl der geeigneten Führungsform formuliert:[51] Dazu gehört die Fahrbahnbreite. Die Fahrbahnbreite ist die Breite der gesamten Fahrbahn; bei zweistreifigen Straßen wird der Bereich zwischen zwei Schutzstreifen außerdem als „Kernfahrbahn“ bezeichnet.[52]

---

[48] ERA, 2010, S. 19f.
[49] ERA, 2010, S. 19.
[50] ERA, 2010, S. 20.
[51] ERA, 2010, S. 19; RASt, 2006, S. 86f.
[52] Ohm et al. 2015, S. 14.

Mischverkehr wird dabei bei Fahrbahnbreiten zwischen 6,00 Metern und 7,00 Metern bei Verkehrsstärken über 400 Kfz pro Stunde als kritisch angesehen, da hier ein Überholen mit ausreichendem Sicherheitsabstand bei Gegenverkehr nicht möglich ist – bei geringeren Fahrbahnbreiten ist es bei entgegenkommenden Fahrzeugen nicht, bei größeren Fahrbahnbreiten ist es mit „ausreichendem Sicherheitsabstand“ möglich.[53] Schutzstreifen sind daher nach den ERA erst ab einer Fahrbahnbreite von 7,00 Metern (1,25 Meter + 4,50 Meter + 1,25 Meter) erlaubt. Unterhalb einer verbleibenden Kernfahrbahnbreite von 5,50 Metern darf dabei keine Leitlinie markiert werden.[54]

2.3 Objektive und subjektive Verkehrssicherheit

Unfallgeschehen und Verkehrssicherheit

Während sich im Jahr 2019 die Zahl der Getöteten im Straßenverkehr bei den Verkehrsbeteiligungsarten Kraftrad, Pkw, Güterkraftfahrzeug und zu Fuß Gehenden um 4 – 19 Prozent verminderte, blieb die Zahl der getöteten Radfahrenden nahezu konstant. Seit einem Tiefpunkt im Jahr 2013 hat sich diese Zahl wieder leicht erhöht auf 445 Getötete in den Jahren 2018 und 2019. Dabei machten innerorts getötete Radfahrende einen Anteil von knapp 60 Prozent an den insgesamt getöteten Radfahrenden aus (vgl. Abbildung 4).[55]

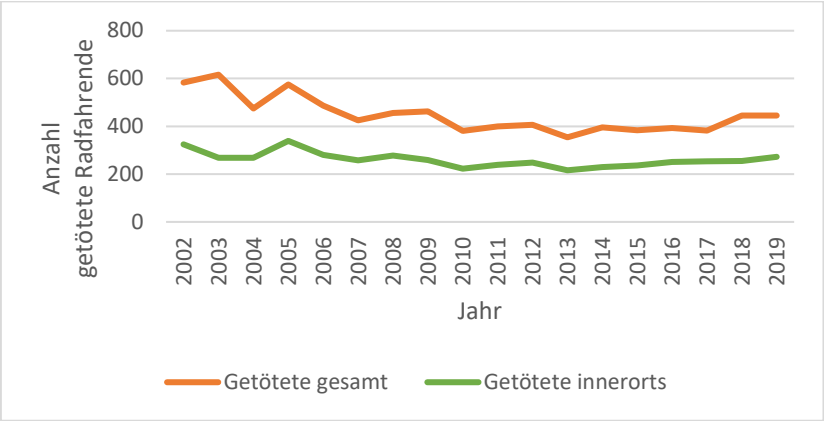


Abbildung 4 Anzahl getötete Radfahrende seit 2002 - gesamt sowie innerorts[56]

Auch die Zahl der gesamt verunglückten Radfahrenden sowie die der Leicht- und Schwerverletzten stieg seit 2013 wieder leicht an (vgl. Abbildung 5). Bei den Verunglückten, Leicht- und Schwerverletzten machen die innerorts verunfallten Radfahrenden jeweils einen

[53] ERA, 2010, S. 23.
[54] ERA, 2010, S. 23f.; RASt, 2006, S. 87.
[55] Statistisches Bundesamt [Destatis] 2020, 5, 27.
[56] Eigene Darstellung nach ebd., S. 26f.

Anteil von circa 90 Prozent aus. Bezüglich des bevölkerungsbezogenen Verunglücktenrisikos sind im Jahr 2019 je 100.000 Einwohnende 105 Radfahrende verunglückt, im Jahr 2018 waren es 107, im Jahr 2017 waren es 96 Radfahrende. Pro eine Millionen Einwohnende wurden in den Jahren 2017, 2018 und 2019 je fünf Radfahrende getötet.[57]

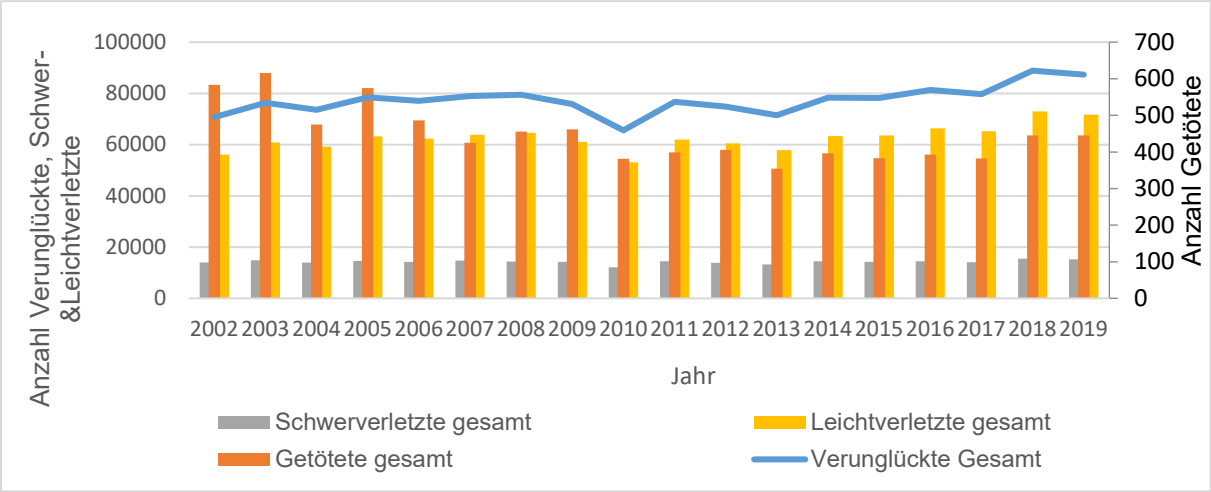


Abbildung 5 Anzahl verunglückte Radfahrende in Deutschland seit 2002[58]

Etwa 30 Prozent der 445 im Jahr 2019 getöteten Radfahrenden sind bei Alleinunfällen gestorben, die Mehrheit bei Unfällen mit zwei beteiligten Verkehrsteilnehmenden. Zudem machten Zusammenstöße mit Kfz einen Anteil von rund 60 Prozent an den Unfällen mit zwei Verkehrsteilnehmenden aus.[59] Dabei sind Pkw bei ca. 77 Prozent der Unfällen mit Radfahrenden die hauptverursachenden Unfallbeteiligten.[60] Es ist zu berücksichtigen, dass in den Daten der amtlichen Unfallstatistik nur polizeilich aufgenommene Unfälle erfasst werden. Die Dunkelziffer wird als sehr hoch geschätzt, insbesondere bei Alleinunfällen.[61]

Etwa 60 Prozent der Radverkehrsunfälle auf Radfahr- oder Schutzstreifen ereignen sich an Kreuzungen oder Einmündungen. Vorherrschender Unfalltyp sind hierbei Abbiege- und Einbiege- und Kreuzen-Unfälle.[62] Bei Unfällen auf homogenen Streckenabschnitten dominieren Unfälle mit dem ruhenden Verkehr (circa 30 Prozent), gefolgt von Unfällen im Längsverkehr. Letztere traten auf Radfahrstreifen mit circa 10 Prozent seltener auf als auf Schutzstreifen (circa 19 Prozent).[63] Weiterhin wurde von Richter (2019) ein Zusammenhang zwischen der Breite der Kernfahrbahn und dem Anteil der Unfälle im Längsverkehr ermittelt.

---

[57] Destatis 2020, S. 27.
[58] Eigene Darstellung nach ebd., S. 32.
[59] Ebd., S. 32.
[60] Ebd., S. 8.
[61] Below 2016, S. 11; Alrutz et al. 2015, S. 50.
[62] Richter 2019, S. 58f.
[63] Ebd., S. 58f.

So ereigneten sich bei Mischverkehr ohne Schutzstreifen etwas mehr Unfälle mit dem ruhenden Verkehr und ähnlich viele Unfälle im Längsverkehr wie im Mischverkehr mit Schutzstreifen.[64]

Alrutz (2009) stellt darüber hinaus fest, dass besonders einzelne baulich-betriebliche Merkmale, zum Beispiel das Verhältnis von Fahrbahnbreite und Breite des SSF, auf verschiedenen Untersuchungsabschnitten der Radverkehrsführung das Unfallgeschehen prägen. Außerdem steigen die Unfallzahlen auf schmalen Radverkehrsanlagen beziehungsweise schmalen Kernfahrbahnen.[65]

In Alrutz et al. (2015) wird die zukünftige Entwicklung des Radverkehrs mit ihren Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit anhand verschiedener Szenarien betrachtet. Dabei stellten sie mit Steigerung der mittleren Geschwindigkeiten des Radverkehrs eine Verschiebung von Abbiege- sowie Einbiege- und Kreuzen-Unfällen hin zu mehr Unfällen im Längsverkehr und mit dem ruhenden Verkehr fest. Außerdem führen steigende Radverkehrsstärken insgesamt zu mehr Unfällen sowie zu höheren Anteilen von Unfällen mit schwerem Personenschaden.[66]

Aus diesen Erkenntnissen leiten Alrutz et al. (2015) Maßnahmenvorschläge ab: Im Mischverkehr ist eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 30 Kilometern pro Stunde zu prüfen, es sollen mehr Fahrradstraßen umgesetzt werden, Radverkehrsanlagen sollen so breit sein, dass ein Überholen Radfahrender untereinander möglich ist, und es sollen ausreichende Sicherheitsräume zum ruhenden Verkehr vorhanden sein.

Subjektive Wahrnehmung der Sicherheit

Neben der objektiven Verkehrssicherheit, die in Unfallzahlen und Schwere der Verletzungen gemessen wird, gibt es die subjektive Sicherheit im Straßenverkehr, die das individuell wahrgenommene Sicherheitsempfinden der Verkehrsteilnehmenden betrachtet. Diese wird häufig durch Befragungen ermittelt.[67]

Ergebnisse der Studie „Verkehrsklima 2020“ der Unfallforschung der Versicherer (UDV) zeigen beispielsweise, dass rund 97 Prozent der Befragten angeben, beim Überholen von Radfahrenden besonders viel Rücksicht zu nehmen. Gleichzeitig beobachten rund 93 Prozent der Befragten, dass Radfahrende von anderen Verkehrsteilnehmenden zu dicht überholt werden.[68]

---

[64] Richter 2019, S. 58f.
[65] Alrutz 2009, S. 111f.; Richter 2019, S. 59.
[66] Alrutz et al. 2015, S. 115f.; Gerike et al. 2019, S. 35.
[67] Koppers et al. 2021, S. 26f.
[68] Gehlert und Kröling 2020, S. 7.

Beim Fahrradmonitor des BMVI gaben 2019 insgesamt 56 Prozent der Radfahrenden an, sich sehr oder eher sicher auf dem Fahrrad zu fühlen – 2017 waren es 53 Prozent.[69] Gründe für das Unsicherheitsempfinden der 44 Prozent, die sich entsprechend weniger und sehr unsicher fühlten, waren unter anderem „zu viel Verkehr“, „rücksichtslose Autofahrer“ (je 68 Prozent) sowie „zu wenig separate Radwege“ (59 Prozent).[70] Nach Ortsgrößenklassen differenziert fühlten sich Radfahrende in Mittelzentren (50.000 bis 100.000 Einwohnende) sicherer (63 Prozent) als in Orten mit mehr oder weniger Einwohnenden (vgl. Abbildung 6).[71]

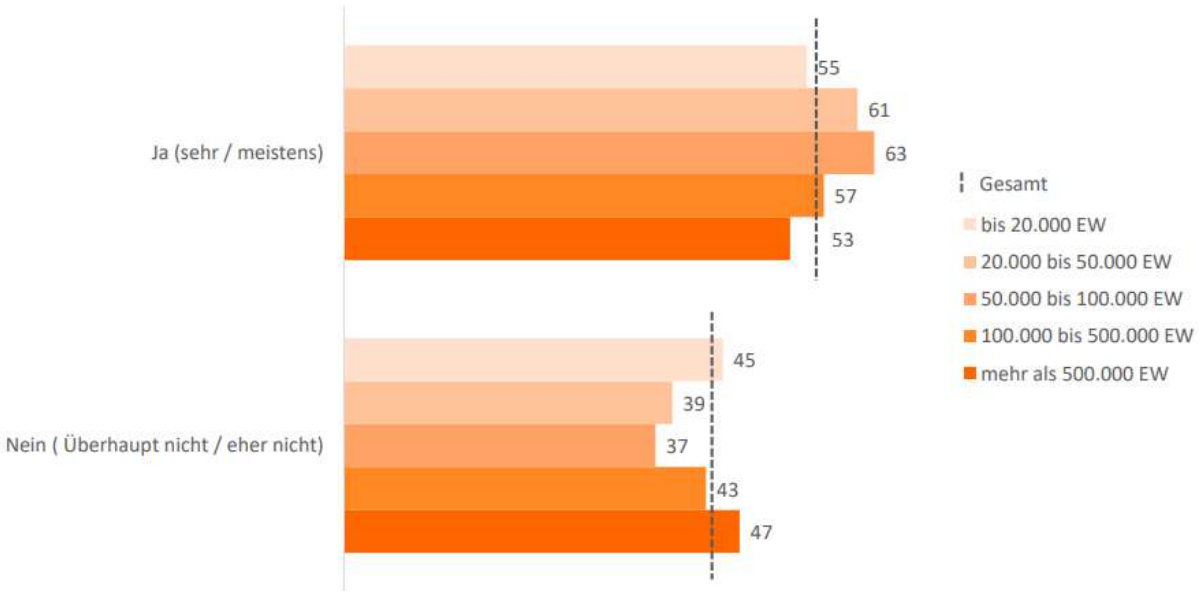


Abbildung 6 "Fühlen Sie sich im Straßenverkehr sicher, wenn Sie Rad fahren?“ (Angaben in Prozent)[72]

Im Fahrradklimatest des Allgemeinen Deutschen Fahrradclubs (ADFC) 2020 gaben Radfahrende in Deutschland dem Radverkehr die Schulnote 3,9. Im Vergleich zum Fahrradmonitor des BMVI gaben 69 Prozent der Radfahrenden an, sich nicht sicher auf dem Fahrrad zu fühlen, hier vergaben sie durchschnittlich die Schulnote 4,2. Als ein Mangel wurden von 80 Prozent der Befragten zu schmale Radwege genannt.[73]

Die wahrgenommene Sicherheit hat auch Auswirkungen auf das Verkehrsverhalten von Radfahrenden. Richter (2019, S. 75) stellt einen klaren Zusammenhang zwischen der Breite der Radverkehrsanlage und der Akzeptanz dieser fest: „[j]e schmaler diese war, desto häufiger wurde im Seitenraum gefahren“.

---

[69] SINUS-Institut 2019, S. 14.
[70] Ebd., S. 14.
[71] Ebd., S. 66.
[72] Ebd., S. 66.
[73] ADFC 2021; NRVP 16.03.2021.

2.4 Überholabstände

2.4.1 Gesetze und Regelwerke

National

In der StVO wird der Abstand beim Überholen, der zu anderen Verkehrsteilnehmenden eingehalten werden muss, definiert. Überholen bedeutet dabei, dass ein von hinten kommendes Fahrzeug sich an einem anderen Fahrzeug, das auf derselben Fahrbahn in dieselbe Richtung fährt oder verkehrsbedingt wartet, vorbei bewegt.[74] Fokus der vorliegenden Arbeit ist dabei die Situation, dass es sich beim überholenden Fahrzeug um ein Kfz und beim überholten Fahrzeug um ein Fahrrad handelt. Seit dem Jahr 2020 wird der einzuhaltende „ausreichende" Abstand für Kfz-Führende, die zu Fuß Gehende, Radfahrende oder Elektrokleinstfahrzeugführende überholen wollen, konkretisiert und auf mindestens 1,50 Meter innerorts und 2,00 Meter außerorts festgelegt.[75]

Diese konkreten Werte sind auf verschiedene Rechtsprüche[76] zurückzuführen und berücksichtigen unter anderem Gutachten, Überholgeschwindigkeiten und Fahrtwind.[77]

Ausgenommen von dieser Regelung sind Kreuzungen und Einmündungen, an denen Radfahrende rechts an wartenden Fahrzeugen vorbeigefahren sind.[78] Weiterhin stellen Radfahrstreifen – das sind mit Zeichen 273 StVO gekennzeichnete Wege, die mit Breitstrichmarkierung (Zeichen 295) von der Fahrbahn abgetrennt sind – Sonderwege dar.[79] Daher überholen Kraftfahrzeugführende hier Radfahrende nicht, sondern fahren an ihnen vorbei. Inwiefern die 1,50 Meter Mindestabstand hier gültig sind, ist strittig: Ein Gutachten der UDV kommt zu dem Schluss, dass auch für das Vorbeifahren aufgrund des §1 StVO (gegenseitige Rücksichtnahme) der Seitenabstand von 1,50 Meter innerorts eingehalten werden muss.[80] In einer digitalen Diskussion auf der Austauschplattform Twitter kommt das BMVI dagegen zu dem Schluss, dass die Abstände nur für das Überholen und daher nicht auf Radfahrstreifen gelten.[81]

Wie dieser ÜHA zu messen ist, wird dabei weder in der StVO noch in der Verwaltungsvorschrift der StVO ausgeführt.[82] In einem weiteren Gutachten der UDV werden bei der Messung von Überholabständen sowohl die Breite des Messfahrrads als auch der Außenspiegel

---

[74] Jagusch und Hentschel 1995, S. 355.
[75] Deutscher Verkehrssicherheitsrat (DVR) 27.04.2020; StVO, 01.04.2013, S. 4.
[76] Vgl. u.a.BGH, vom 10.01.1957; OLG Frankfurt am Main, Beschluss vom 30.09.1980; OLG Hamm, Rechtssprechung vom 10.11.1992; Thüringer OLG Jena, vom 28.10.2008; Leuw 2013.
[77] Kettler 2013, S. 47ff.
[78] StVO, 01.04.2013, S. 4.
[79] VwV-StVO, 26.01.2001, S. 2.
[80] Unfallforschung der Versicherer [UDV] 2018, S. 13.
[81] BMVI 25.02.2020.
[82] StVO, 01.04.2013; VwV-StVO, 26.01.2001.

überholender Pkw berücksichtigt.[83] Der ADFC definiert den seitlichen Überholabstand als Abstand zwischen dem äußersten Punkt des „Gesamtsystems Fahrrad-Radfahrer“ zum äußersten Punkt des Kfz (Vgl.Abbildung 7).[84]

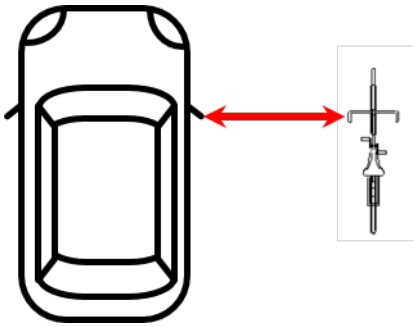


Abbildung 7 Definition ÜHA[85]

Nach den ERA nehmen Radfahrende (einspuriges Fahrrad ohne Anhänger) einen Verkehrsraum von 1,00 Meter ein.[86] Der lichte Raum setzt sich aus dem Verkehrsraum und einem Sicherheitsraum zusammen (Abbildung 8).

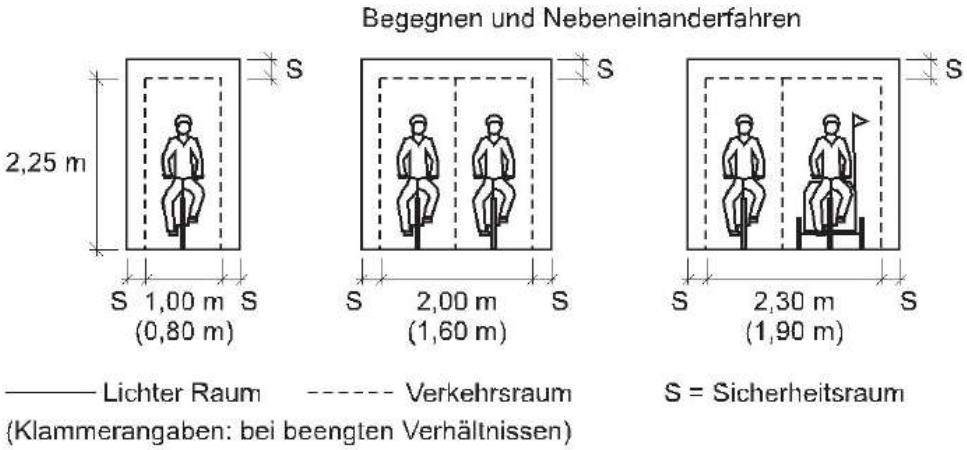


Abbildung 8 Lichter Raum, Verkehrsraum und Sicherheitsraum (S) (ERA)[87]

Diese Grundmaße greifen die RASt auf und erweitern sie: Es werden Verkehrsräume und lichte Räume beim Begegnen, Nebeneinander- und Vorbeifahren beispielhaft dargestellt. Dabei ist ein Abstand zwischen den Verkehrsräumen von Radfahrenden und Fahrzeugen von

[83] Richter 2019, S. 79.
[84] Peters 2011, S. 7.
[85] Eigene Darstellung nach ebd., S. 7.
[86] ERA, 2010, S. 28.
[87] ERA, 2010, S. 28.

0,75 Metern vorhergesehen (vgl. Abbildung 9) – deutlich weniger, als in der StVO und in Gerichtsurteilen als notwendig erachtet.[88] Diese in der RASt aufgeführten Beispiele sollen jedoch lediglich der Überprüfung dienen, ob Entwürfe von Straßenquerschnitten bestimmte Fahrzeugkombinationen ermöglichen und fungieren nicht als Definition von Überholabständen.[89]

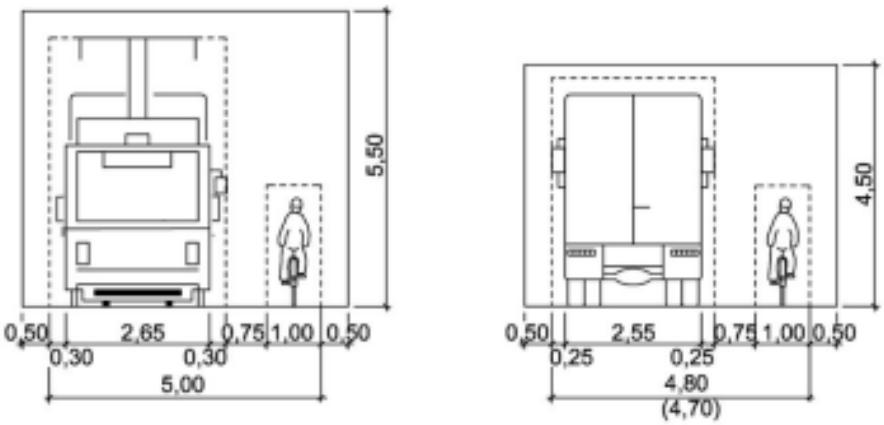


Abbildung 9 Nebeneinanderfahren nach RASt[90]

In der StVO ist zudem das Rechtsfahrgebot verankert (§ 2 Satz 2), aber weder hier noch in der Vwv-StVO wird dieses mit einem Wert quantifiziert.[91] Dies betrifft auch überholte Radfahrende. Aus verschiedenen Gerichtsentscheidungen jedoch geht hervor, dass ein Abstand von 0,80 Metern bis 1,00 Meter vom rechten Fahrbahnrand im Normalfall einzuhalten und vereinbar mit der Vorgabe möglichst weit rechts zu fahren ist.[92]

International

In anderen europäischen Ländern wie Frankreich (innerorts 1,0 Meter, außerorts 1,5 Meter), Belgien, Spanien und Portugal (innerorts je 1,50 Meter) gibt es ebenfalls einen gesetzlich festgelegten Mindestüberholabstand des Kfz- zum Radverkehr.[93] In Tschechien soll ab Juli 2021 ebenfalls ein Mindestabstand von 1,50 Meter gelten, der in Tempo-30-Zonen auf 1,00 Meter herabgesetzt wird.[94] In Dänemark, den Niederlanden, Großbritannien oder Österreich sowie weiteren Ländern ist dagegen bislang gesetzlich kein Mindestüberholabstand

[88] Peters 2011, S. 29; Koppers et al. 2021, S. 32.
[89] RASt, 2006, S. 30.
[90] RASt, 2006, S. 30.
[91] StVO, 01.04.2013, S. 1.
[92] Kettler 2013, S. 26.
[93] Dirección General de Tráfico 2006; 03.09.2013; Code de la route, 2003; Verkeersreglement, 01.12.1975.
[94] Ferrer 2021.

quantifiziert worden.[95] Aber in Großbritannien wird beispielsweise vorgegeben, Radfahrende beim Überholen genauso wie andere Kfz zu behandeln.[96]

Im Jahr 2017 gab es eine Anfrage an das Europäische Parlament, ob eine Einführung europaweit geltender Mindestüberholabstände erfolgen soll.[97] Dieses entschied jedoch, dass die Mitgliedsstaaten weiterhin verantwortlich für diese Regelung seien.[98]

Auch in 33 Bundesstaaten der USA wird ein Mindestüberholabstand festgelegt, in der Regel beträgt dieser drei Feet (0,91 Meter), teilweise zwei Feet (0,61 Meter) oder vier Feet (1,22 Meter).[99] In Australien ist im Staat Südaustralien bis zu einer Geschwindigkeit von 60 Kilometer pro Stunde ein Abstand von 1,00 Meter und ab 60 Kilometer pro Stunde ein Abstand von 1,50 Metern zu Radfahrenden einzuhalten.[100]

2.4.2 Physikalische Betrachtung

Radfahrende folgen nach Langer (2016) einer Fahrlinie, um die sie - durch Lenkbewegungen um das Gleichgewicht zu halten bedingt - leicht pendeln. Damit sind Radfahrende im Vergleich zum Kfz-Verkehr nicht spurstabil und nehmen einen größeren Raum in Anspruch, als ihre Grundbreite vermuten lässt. Die Rauminanspruchnahme wird durch äußere Faktoren wie Windbewegungen, Fahrgeschwindigkeit, Geometrie des Fahrrads oder die Steigung der Strecke sowie individuelle Einflussgrößen wie Fähigkeiten, Erfahrungen und Alter der Radfahrenden beeinflusst.[101]

Bei Überholvorgängen werden außerdem die Fahrlinien, die im unbeeinflussten Zustand gefahren werden, verlassen. Nach Koppers et al. (2021, S. 139) liegt der mittlere Abstand zum rechten Fahrbahnrand der unbeeinflussten Fahrlinie im Mischverkehr von Radfahrenden bei 0,90 Metern; wenn den Radfahrenden Kfz folgen bei 0,80 Metern und beim Überholen bei 0,50 Metern. Kfz-Fahrende halten im Durchschnitt im unbeeinflussten Zustand einen Abstand von 1,00 Meter zum rechten Fahrbahnrand. Nach Auswertung von 20 Erhebungsstellen kommen Schüller et al. (2020, S. 76) auf einen Median von 0,42 Metern, die Fahrräder als Abstand zu parkenden Fahrzeugen einhalten (ohne Überholung).

Überholvorgänge finden über eine gewisse zeitliche Dauer statt und umfassen nicht nur den Augenblick, in dem sich ein Kfz parallel zum Fahrrad befindet. Verschiedene Studien haben daher ÜHV in einzelne Phasen unterteilt. Chuang et al. (2013, S. 36) und Dozza et al. (2015,

---

[95] StVO, 06.07.1960; Highway Code, 01.10.2015; RVV, 26.07.1990.
[96] Highway Code, 01.10.2015, Rule 163.
[97] Europäisches Parlament 2017.
[98] Bulc 2017.
[99] National Conference of State Legislatures 2021.
[100] SA.GOV.AU 2017.
[101] Peters 2011, S. 10f.; Langer 2016, S. 19.

S. 30) definieren beispielsweise drei Phasen: „before passing“, „while passing“ und „after passing“, das heißt vor dem Überholen, während des Überholens und nach dem Überholen. Weiterhin ordnen sie diesen Phasen feste zeitliche Dauern zu. Diese Definition hat allerdings Schwächen, da die Phasendauer stark von der Relativgeschwindigkeit der Kfz-Führenden zu den Radfahrenden sowie der Länge des Fahrzeugs abhängt.[102]

Dozza et al. (2015) definieren basierend auf Daten zu ÜHV, die mittels Light Detection and Ranging (LiDAR)-Technologie erfasst wurden, sowie einer Untersuchung von Gibson und Crooks (1938) vier Phasen (vgl. Abbildung 10).

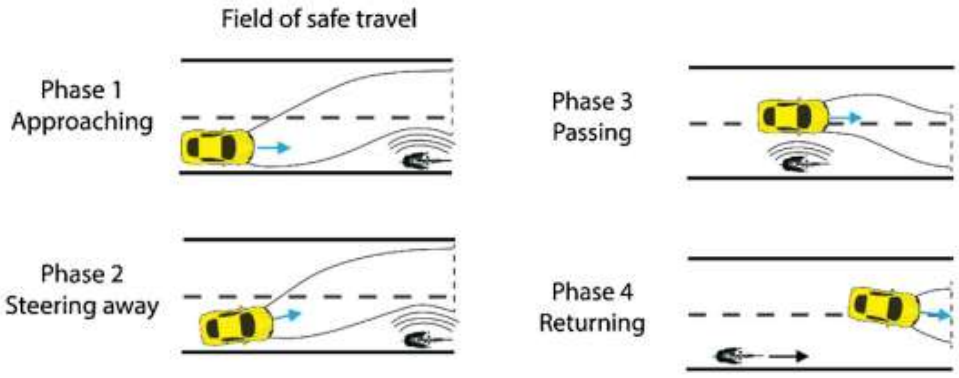


Abbildung 10 Vier Phasen eines ÜHV von einem Fahrrad durch ein Kfz[103]

Außerdem unterscheiden sie verschiedene Überholstrategien: Bei der „flying“ (fliegenden) Strategie wird die gefahrene Geschwindigkeit in etwa konstant gehalten. Bei der „accelerative“ (beschleunigenden) Strategie verlangsamt das Fahrzeug zunächst, ehe es für den ÜHV beschleunigt. Bei der „piggy backing“ Strategie ahmen nachfolgende Fahrzeuge die Strategie (flying/accelerative) des vorausfahrenden Fahrzeugs nach.[104]

2.4.3 Bestehende Untersuchungen zur Seitenabstandsmessung

Nachfolgend wird ein Überblick über einige nationale und internationale Studien zu seitlichen Überholabständen gegeben. Erste, einzelne Erhebungen wurden seit den 1970er Jahren durchgeführt[105], seit den 2010er Jahren verbessert sich die Datenlage und die Zahl der verfügbaren Studien zu seitlichen Überholabständen steigt.[106]

---

[102] Dozza et al. 2015, S. 29.
[103] Ebd., S. 30.
[104] Ebd., S. 30.
[105] Kroll und Ramey 1977; Harkey und Stewart 1997; Walker 2007.
[106] Langer 2016, S. 27; Huemer 2019, S. 3.

Die Studien umfassen dabei verschiedene Erhebungsmethoden, in Chuang et al. (2013), Dozza et al. (2015), Langer (2016) und Walker (2007) erfolgte die Erhebung beispielsweise mit Messfahrrädern, die mit entsprechender Messtechnik zum Erfassen von seitlichen ÜHA ausgestattet waren. Kovaceva et al. (2019) nutzten Kfz, um seitliche ÜHA aus Sicht von Kfz-Führenden zu messen. Unter anderem in Apasnore et al. (2017), Koppers et al. (2021), Ohm et al. (2015)sowie Szeiler und Skoric (2017) basieren die Ergebnisse auf Beobachtungen aus dem Seitenraum und Farah et al. (2019) sowie Huemer (2019) nutzten Fahrsimulationen, um seitliche Überholabstände zu ermitteln. Alrutz et al. (2015) und Hon (2007) legten ihrer Untersuchung Unfalldaten zugrunde.

Für die Messung der Überholabstände wurden dabei in einigen Studien Videoaufnahmen ausgewertet[107] oder es kamen Ultraschallsensoren[108], LiDAR[109] oder Laser[110] zum Einsatz.

Auch in den Untersuchungsräumen unterscheiden sich die Studien; in Dozza et al. (2015) und Kovaceva et al. (2019) lag der Fokus beispielsweise auf außerörtlichen Straßen, in Langer (2016) und beim Tagesspiegel Online (2018) fanden die Untersuchungen dagegen auf Straßen innerorts statt.

Weiterhin werden verschiedene Radverkehrsführungen unterschieden und geprüft, inwiefern diese Auswirkungen auf das ÜHV haben.[111]

Insgesamt wird eine Vielzahl von infrastrukturellen, fahrverhaltensbezogenen, weiteren umweltbedingten und verkehrlichen Einflussfaktoren sowie die Auswirkungen von visuellen Merkmalen einer Person auf Überholabstände identifiziert (vgl. Tabelle 2 (nicht abschließend)).

Dabei sind die Effekte der Einflussfaktoren in den unterschiedlichen Studien nicht einheitlich.[112]

---

[107] Apasnore et al. 2017; Koppers et al. 2021; Kovaceva et al. 2019; Ohm et al. 2015.
[108] Chuang et al. 2013; Langer 2016; Tagesspiegel Online 2018; Walker 2007.
[109] Dozza et al. 2015.
[110] Richter 2019.
[111] Huemer 2019; Koppers et al. 2021; Morrison et al. 2019; Richter 2019.
[112] Huemer und Strauß 2021.

Tabelle 2 Identifikation von Einflussfaktoren auf Überholabstände (Literaturrecherche)

	Einflussfaktor	***Untersucht unter anderem von***
Infrastruktur	(Kern-)Fahrbahnbreite Art der Radverkehrsführung Mittlere Leitlinie Oberflächenbeschaffenheit Vorhandensein längsparkende Fahrzeuge (Fzg) Straßenbündige Bahnkörper	Harkey und Stewart (1997); Huemer (2019); Koppers (2021); Love et al. (2012); Morrison et al. (2019); Parkin und Meyers (2010); Richter (2019); Tagesspiegel Online (2018); Kroll und Ramey (1977); Ohm et al. (2015); Apasnore et al. (2017)
Fahrverhalten (Radfahrende, Kfz-Führende)	Geschwindigkeit Abstand zum ruhenden Verkehr/ rechten Fahrbahnrand Überholstrategie Fahrlinie	Apasnore et al. (2017); Burger et al. (2020); Alrutz et al. (2015); Dozza et al. (2015); Farah et al. (2019); Harkey und Stewart (1997); Koppers et al. (2021); Szeiler und Skoric (2017); Kovaceva et al. (2019); Richter (2019); Walker (2007)
Eigenschaften Rad(fahrende), Kfz(führende)	Fahrzeugart Gender Alter Helm (Radfahrende) Outfit (Radfahrende) Akzeptanz Mischverkehr Kindertransport (Radfahrende)	Walker et al. (2014); Walker (2007); Tagesspiegel Online (2018); Kaulen et al. (2013); Schüller et al. (2020); Richter (2019); Langer (2016); Kovaceva et al. (2019); Dozza et al. (2015); Chuang et al. (2013); Huemer (2019)
Weitere umweltbedingte und verkehrliche Einflussfaktoren	Lichtverhältnisse Sichtbeziehungen Gegenverkehr Zugelassene Geschwindigkeiten Verkehrsstärke/-dichte Anteil Schwerverkehr	Ohm et al. (2015); Dozza et al. (2015); Huemer (2019); Kaulen et al. (2013); Koppers et al. (2021); Kovaceva et al. (2019); Langer (2016); Richter (2019); Schüller et al. (2020)

Im Folgenden werden die Ergebnisse verschiedener nationaler Studien näher betrachtet. Eine Übersicht über die Studien, deren Erhebungsmethodik, verwendete Messtechnik sowie die untersuchten Einflussfaktoren findet sich in Tabelle 3.

Alle Studien haben gemeinsam, dass im Schnitt mit weniger als 1,50 Meter überholt wird. Auch vor der Novelle der StVO in 2020 galt dieser Wert in der Rechtsprechung als anerkannter

Mindestabstand.[113] Außerdem bestätigen die Studien, die den Einfluss von **Gegenverkehr** betrachten, dass sich ÜHA bei vorhandenem Gegenverkehr verringern.[114] Huemer (2019) sowie Langer (2016) nennen Gegenverkehr als größten Einflussfaktor auf die ÜHA. Bei der Betrachtung des Einflusses einer **mittleren Leitlinie** kommen Huemer (2019), Richter (2019) und Kaulen et al. (2013) übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass sich die ÜHA bei vorhandener Leitlinie verringern. Die übrigen Studien betrachten diesen Einfluss nicht (vgl. Tabelle 3).

Bei dem Einfluss der **Fahrbahnbreite** gehen die Ergebnisse auseinander: Während bei Kaulen et al. (2013) eine negative Korrelation zwischen Überholabstand und Fahrbahnbreite (ÜHA steigen bei verminderter Fahrbahnbreite) mit der Einschränkung geringer Fallzahlen identifiziert wird, erkennen Schüller et al. (2020) und Huemer (2019) „keinen kontinuierlichen Trend“ zwischen Fahrbahnbreite und ÜHA. Ohm et al. (2015)und Langer (2016) dagegen ermitteln einen steigenden ÜHA bei zunehmender Fahrbahnbreite, wobei die steigenden ÜHA weniger stark wachsen als die Fahrbahnbreite. Langer (2016) identifiziert darüber hinaus sinkende ÜHA ab einem „gewissen Schwellenwert“, der nicht konkret definiert wird und zwischen 6,60 und 6,85 Metern liegt.

Auch die Ergebnisse zum Einfluss der **Radverkehrsführung** sind nicht eindeutig. Kaulen et al. (2013) ermitteln geringfügig mehr ÜHV mit größeren ÜHA nach der Anlage von Schutzstreifen (vorher Mischverkehr ohne Schutzstreifen). Bei Ohm et al. (2015) sind die ÜHA bei Schutzstreifen dagegen geringer als im Mischverkehr ohne Schutzstreifen. Beim Radmesserprojekt vom Tagesspiegel werden im Mischverkehr ohne SSF ÜHA von 1,50 Metern häufiger unterschritten als im Mischverkehr mit SSF sowie bei Radfahrstreifen oder Busspuren. Richter (2019) und Tagesspiegel Online (2018) stellten keinen Einfluss von RFS oder SSF auf ÜHA fest – solange kein Gegenverkehr vorhanden ist.

Bei Gegenverkehr werden auf Radfahrstreifen geringere ÜHA gemessen. Im Vergleich zum Mischverkehr ohne Schutzstreifen stellen Koppers et al. (2021) bei Mischverkehr mit Piktogrammketten eine leichte Erhöhung der ÜHA fest. Langer (2016) stellt außerdem geringere ÜHA bei zunehmenden Schutzstreifenbreiten fest, kann diesen Einfluss aber nicht von anderen, überlagernden Effekten trennen.

Während Langer (2016) keinen Einfluss der **Fahrzeugart** auf das ÜHV feststellt, bemerken Richter (2019) einen besonders hohen Anteil von ÜHA unter 1,00 Meter beim Schwerverkehr.

Der Tagesspiegel stellt größere ÜHA bei größerem **Abstand** von rechts **parkenden Fahrzeugen** fest.[115] Richter (2019) dagegen kommt zum Ergebnis, dass die ÜHA geringer werden, wenn Radfahrende in der linken statt der rechten Hälfte von Radfahr- oder

[113] Kaulen et al. 2013, S. 42.
[114] Huemer 2019; Langer 2016; Ohm et al. 2015; Richter 2019.
[115] Tagesspiegel Online 2018.

Schutzstreifen fahren. Insgesamt verringert sich der Abstand der Radfahrenden zu parkenden Fahrzeugen bei Überholvorgängen im Vergleich zur unbeeinflussten Fahrt.[116]

Das Tragen eines **Helmes** führt ebenfalls zu gegensätzlichen Ergebnissen bezüglich des ÜHA. Bei auffälliger **Kleidung** (Warnweste) wird dagegen in beiden Studien kein Einfluss festgestellt.[117] Auch bezüglich **Alter** und **Geschlecht** werden keine Auswirkungen auf ÜHA identifiziert.[118] Während Langer (2016) geringfügig kleinere ÜHA beim Radfahren mit **Anhänger** feststellt, werden Radfahrende, die **Kinder transportieren**, mit unwesentlich mehr Abstand überholt (8,4 Zentimeter mehr).[119]

Tabelle 3 Überblick ausgewählter nationaler Studien zu ÜHA

Autor: innen	***Erhebungs-methode***	***Mess-technik***	***Untersuchte Einflussfaktoren***
Kaulen et al. (2013)	Seitenraum	Kamera	Gegenverkehr Fahrbahnbreite, Mittlere Leitlinie Mit/ohne SSF (vorher/nachher)
Ohm et al. (2015)	Seitenraum	Kamera	Gegenverkehr Mischverkehr mit/ohne SSF Fahrbahnbreite
Langer (2016)	Messfahrrad	Kamera	Helm, Warnweste Anhänger Gegenverkehr Kernfahrbahnbreite, Schutzstreifenbreite Fahrzeugart Kfz-Geschwindigkeit
Tagesspiegel Online (2018)	Messfahrrad	Ultraschall-sensoren	Haupt-/Nebenstraßen, Fahrradstraßen MV mit/ohne SSF, RFS, Busspur Abstand Parkstreifen Kindertransport Helm, Warnweste, Alter, Geschlecht
Huemer (2019)	Fahrsimulator	Software	RFS, SSF, MV ohne SSF Gegenverkehr Fahrbahnbreite, Mittlere Leitlinie
Richter (2019)	Messfahrrad	Laser	Fahrzeugart (Pkw, Lkw, Bus) RFS, SSF Abstand Bord Mittlere Leitlinie
Schüller et al. (2020)	Messfahrrad	Kamera	Abstand Parkstreifen Fahrbahnbreite
Koppers et al. (2021)	Messfahrrad	Kamera	Mit/ohne Piktogrammketten (vorher/nachher) Abstand Bord/Parkstreifen Gegenverkehr

[116] Schüller et al. 2020; Koppers et al. 2021.
[117] Langer 2016; Tagesspiegel Online 2018.
[118] Tagesspiegel Online 2018.
[119] Ebd.

2.5 Zusammenfassung und Ableitung der Forschungshypothesen

Einerseits steigt die Anzahl der mit dem Rad zurückgelegten Wege beständig an, andererseits profitiert der Radverkehr nicht von sinkenden Unfallzahlen wie andere Verkehrsmittel. Rund 60 Prozent der Unfälle innerorts ereignen sich an Kreuzungen und Einmündungen, gefolgt von Unfällen auf homogenen Streckenabschnitten mit ruhendem Verkehr und im Längsverkehr.

Seit der StVO-Novelle im Jahr 2020 sind innerorts Mindestüberholabstände von 1,50 Metern zwischen Kfz- und Radfahrenden gesetzlich verankert. Bereits davor waren die 1,50 Meter in der Rechtsprechung ein verbreiteter Wert; auch in weiteren europäischen Ländern sind ÜHA von 1,00 bis 1,50 Meter festgeschrieben.

Die vorherigen Erläuterungen verdeutlichen die Komplexität und Antinomie der Effekte verschiedener Einflussfaktoren auf ÜHA. Nationale Studien zu ÜHA identifizieren Gegenverkehr, Fahrbahnbreiten, Leitlinien und die Art der Radverkehrsführung als wesentliche Parameter. Während bei Vorhandensein von Gegenverkehr und mittleren Leitlinien die Untersuchungen einhellig engere ÜHA ermittelten, gehen die Ergebnisse bei dem Einfluss der Radverkehrsführung oder der Fahrbahnbreiten auseinander. Bei den Untersuchungen kamen verschiedene Erhebungsmethoden und Messtechniken im Einsatz.

Basierend auf den Erkenntnissen bisheriger Studien werden in dieser Arbeit folgende Hypothesen untersucht.

1) Schutzstreifen führen zu geringeren ÜHA als RFS und Mischverkehr ohne SSF.
2) Der Abstand der Radfahrenden zum Bord beziehungsweise zu parkenden Fahrzeugen hat einen Einfluss auf ÜHA. Die mittleren ÜHA vergrößern sich im Mischverkehr ohne SSF, wenn weiter links gefahren wird, jedoch nimmt auch der Anteil besonders enger ÜHV zu.
3) Bei markierten Radverkehrsführungen (RFS, SSF) kommt es dabei zum „Leitlinieneffekt“[120], das heißt Kfz-Führende orientieren sich an den jeweiligen Markierungen und nicht an der Position der Radfahrenden auf der Straße, wodurch die mittleren ÜHA bei weiter links Radfahrenden sinken.
4) Bei Mischverkehr ohne SSF ohne Mittelmarkierung sind die ÜHA größer als bei Vorhandensein von Mittelmarkierungen.

Im Folgenden werden dazu das Untersuchungsdesign und die Methodik vorgestellt.

[120] Ohm et al. 2015, S. 66.

3 Untersuchungsdesign

3.1 Methodik

Zur Vorbereitung des Praxisteils dieser Arbeit wurden in einer Literaturrecherche die Randbedingungen zu ÜHV untersucht und vor allem verschiedene Einflussfaktoren auf Überholabstände ermittelt. Ausgehend davon wurden in Kapitel 2.5 Hypothesen aufgestellt, die im Praxisteil dieser Arbeit evaluiert werden. Dafür wurden Ultraschallmessungen durch Befahrung von ausgewählten Strecken mit einem Messfahrrad durchgeführt. Weitere Methoden zur Erfassung der Randbedingungen werden in Tabelle 4 dargestellt. Die Festlegung der Untersuchungsszenarien und der Prozess zur Auswahl der Messtechnik werden nachfolgend erläutert. Es folgen die Auswahl und Charakterisierung der Messstrecken und anschließend die Beschreibung des Aufbaus und der Inbetriebnahme des Sensors sowie dessen Kalibrierung. Die im Feldversuch erfolgten Messfahrten werden gemäß den einzelnen Szenarien unter Berücksichtigung des ermittelten erforderlichen Stichprobenumfangs dargestellt. Die erhobenen Rohdaten enthalten Zeitstempel, GPS-Koordinaten sowie seitliche Abstände und werden im Anschluss an die Messfahrten statistisch ausgewertet.

Tabelle 4 Erhebungsumfang und Erfassungsmethode

Merkmal	***Methode***
Querschnittsmaße	Vor-Ort-Messung (Laser)
Maße RFS/SSF	Vor-Ort-Messung (Laser)
Fahrlinie Rad	Vor-ab-Messung (Maßstab) & Definition Fixpunkte
Geschwindigkeit Rad	Erfassung basierend auf GPS-Daten (Garmin Forerunner 735 XT)
Überholabstände	Auswertung Ultraschallsensor
Wetter	Erfassung mit OpenWeather App

Abgrenzung der Arbeit

Die Arbeit fokussiert sich entsprechend der Aufgabenstellung auf innerörtliche Straßen der Stadt Weimar. Im Rahmen dieser Arbeit werden Überholvorgänge auf Straßen mit markierten Radverkehrsführungen (SSF und RFS) sowie im Mischverkehr ohne SSF durchgeführt. Die Auswahl der Messstrecken wird detailliert in Kapitel 3.3 beschrieben.

Aufgrund der gewählten Untersuchungsmethodik, die in Kapitel 3.4 begründet wird, können weder Gegenverkehr, Fahrzeugart noch Geschwindigkeiten der Kfz erfasst werden.

Die Messfahrten wurden außerdem ausschließlich durch die Autorin dieser Masterarbeit und mit einem Trekkingfahrrad durchgeführt.

3.2 Szenarien

Zur Überprüfung der Hypothesen ist eine Betrachtung der ÜHA auf verschiedenen Radverkehrsführungen erforderlich. Zusätzlich werden unterschiedliche Abstände zum rechten Fahrbahnrand (Bord/parkende Fahrzeuge) erhoben, um den Einfluss der Position des Fahrrads zu ermitteln. Für die Situation Mischverkehr ohne SSF wird zudem unterschieden in Straßen mit mittleren Leitlinien sowie ohne mittlere Leitlinien. Daraus ergeben sich die folgenden Szenarien, wie in Tabelle 5 dargestellt und in Abbildung 11 grafisch visualisiert.

Die Abstände der Radfahrenden nach rechts ergeben sich einerseits aus der Rechtsprechung, in der Abstände von 0,80 Metern bis 1,00 Meter empfohlen werden, da sie trotz Rechtsfahrgebot zulässig sind und gleichzeitig einen ausreichenden Sicherheitsabstand nach rechts darstellen (vgl. Kapitel 2.4.1).[121] Dass in Realität auch geringere Abstände nach rechts üblich sind, zeigen Schüller et al. (2020) (vgl. Kapitel 2.4.2). Gleichzeitig werden Maße von Autotüren bis zu einer Breite von 1,50 Metern angegeben[122]. Szeiler und Skoric (2017) stellen für Österreich fest, dass Abstände zu parkenden Fahrzeugen bis 1,40 Meter dem Rechtsfahrgebot entsprechen, und in aktivistischen Kontexten wird diskutiert, welche Auswirkungen ein Fahren mittig auf der Fahrbahn auf das Überholverhalten hat.[123] Aus diesen Gründen wird zudem ein Abstand von 1,30 bis1,50 Metern nach rechts untersucht.

Da es für Radfahrende aufgrund ihrer normalen Pendelbewegung nicht möglich ist, dauerhaft eine perfekte Linie zu fahren, werden Abstandskorridore von 0,20 Metern angegeben (vgl. Kapitel 2.4.2). Der Abstand der Position des Fahrrads wird dabei ab der Fahrradmittelachse gemessen.

Tabelle 5 Überblick untersuchter Szenarien und Szenarienbezeichnung

		Position Fahrrad (Abstand nach rechts)		
Art der Rad-verkehrsführung	***Mittelmarkierung***	**1 0,30-0,50 m**	**2 0,80-1,00 m**	**3 1,30-1,50 m**
Mischverkehr mit SSF (MmS+)	Ja (+)	MmS1+	MmS2+	MmS3+
Mischverkehr ohne SSF (MoS+)	Ja (+)	MoS1+	MoS2+	MoS3+
(MoS-)	Nein (-)	MoS1-	MoS2-	MoS3-
RFS (RFS+)	Ja (+)	RFS1+	RFS2+	RFS3+

[121] Kettler 2013, S. 20.
[122] Langer 2016, S. 10.
[123] Vgl z.B.Urbanist Magazin 2014.

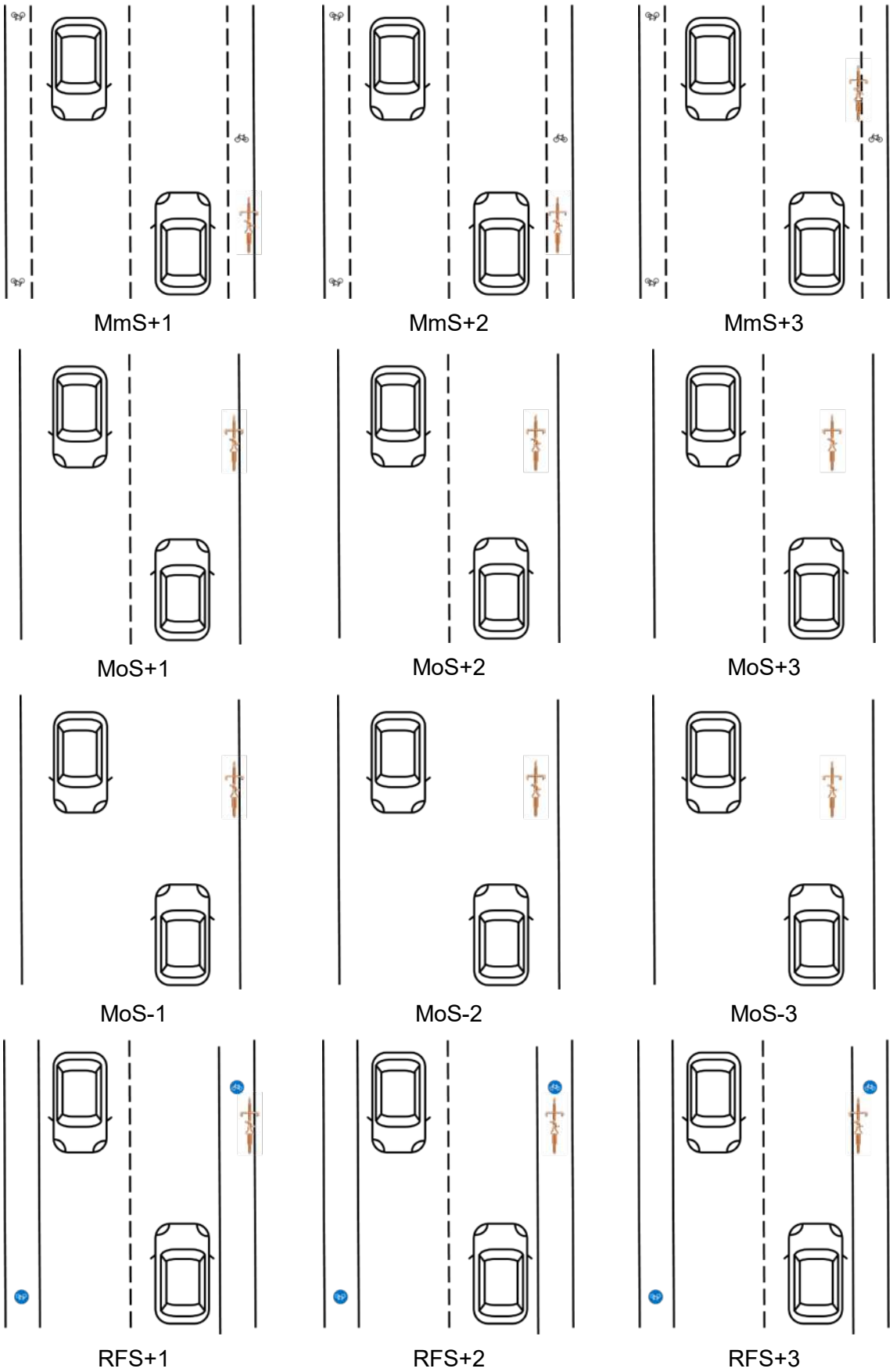


Abbildung 11 Untersuchte Szenarien - Querschnitte und Fahrradposition von oben (eigene Darstellung)

3.3 Auswahl Messstrecken

Weimar ist ein Mittelzentrum mit rund 65.000 Einwohnenden.[124] Der Anteil der Wege, die mit dem Fahrrad zurückgelegt werden, beträgt 16 Prozent und liegt damit im Vergleich zum Mittelwert anderer Mittelzentren in Stadtregionen um 6 Prozent-Punkte höher.[125] Gleichzeitig landet Weimar beim ADFC-Fahrradklimatest 2020 mit einer Schulnote von 4,19 auf Rang 80 von 110 Städten der Ortsgrößengruppe 50.000 bis 100.000 Einwohnenden.[126] 74 Prozent der Befragten in Weimar gaben an, dass sie sich als Radfahrende gefährdet fühlen, 80 Prozent sind häufig in Konflikte mit dem Kfz-Verkehr verwickelt, und 82 Prozent nannten, im Mischverkehr von Kfz bedrängt oder behindert zu werden.[127]
Neben dem Kriterium Mischverkehr mit/ohne Schutzstreifen, mit/ohne Mittelmarkierung sowie Radfahrstreifen erfolgte die Auswahl der Messtrecken für eine bessere Vergleichbarkeit untereinander nach folgenden Eigenschaften (Reihenfolge stellt keine Wertigkeit dar):

- Zwei Fahrspuren
- Hauptverkehrs-/Verkehrs-/Sammelstraße (gemäß Stadtverwaltung Weimar (2008))
- Ausreichender Knotenpunktabstand, sodass ÜHV möglich sind[128]
- Steigung/Gefälle < 3 Prozent

Ausschlusskriterien bei der Streckenauswahl waren

- Baustellen während des Erhebungszeitraums
- einseitig markierte Radverkehrsanlagen.

In Tabelle 6 Ausgewählte MessstreckenTabelle 6

Tabelle 6 findet sich die finale Streckenauswahl, die den obigen Kriterien entspricht, Abbildung 12 gibt einen Überblick, wo sich die Messstrecken in Weimar befinden.

Tabelle 6 Ausgewählte Messstrecken

	Messstrecken*
MmS+	Marienstraße, Steubenstraße
MoS+	Rudolf-Breitscheid-Straße, Berkaer Straße, Belvederer Allee
MoS-	Bodelschwinghstraße
RFS+	Erfurter Straße

[124] BMVI 2018; Statista 2021.
[125] Gerike et al. 2020, S. 4; Nobis 2019, S. 21.
[126] ADFC 2021, S. 5.
[127] ADFC und Team Red 2020, S. 4.
[128] Langer 2016, S. 46.

* Vgl. für ausgewählten Straßenabschnitt Abbildung 12

Im Anhang A.1 findet sich die ursprüngliche Streckenauswahl inklusive der Strecken, die nicht ausgewählt wurden, weil eine oder mehrere Eigenschaften nicht den obigen Anforderungen entsprechen.

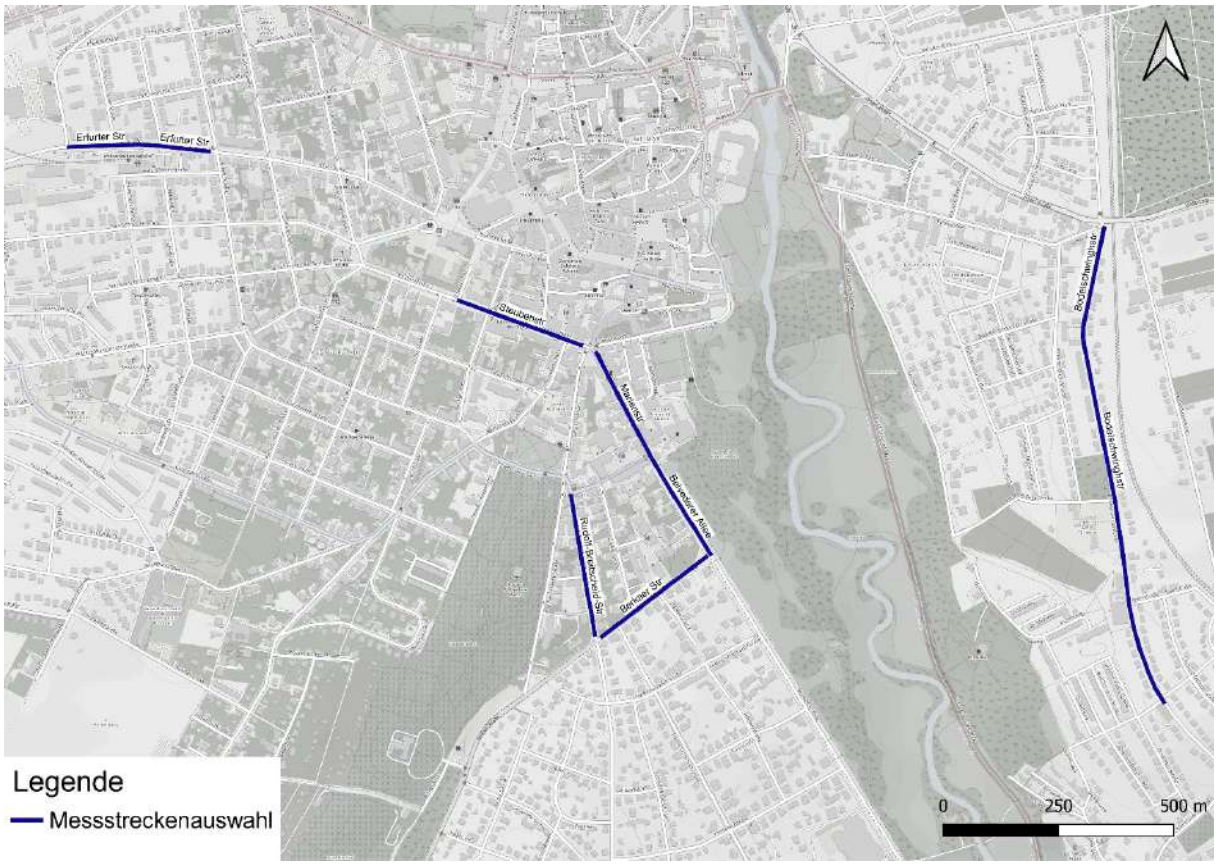
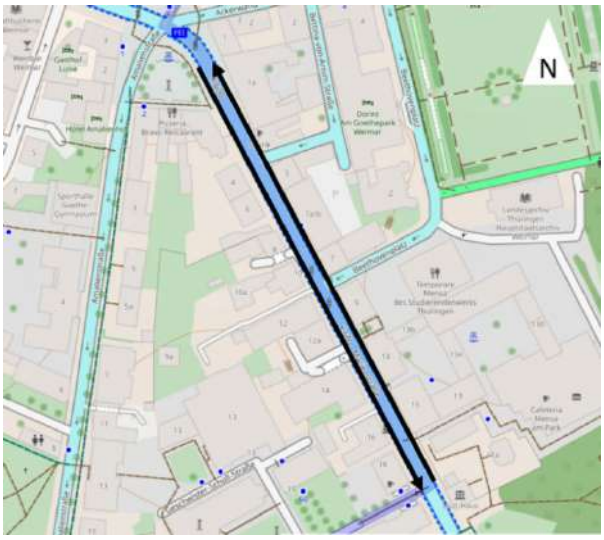


Abbildung 12 Lage der Messstrecken (dunkelblau markiert, eigene Darstellung)[129]

Abbildung 13 stellt exemplarisch die Messtrecke der Marienstraße vor. Neben bereits bekannten Informationen zur Radverkehrsführung und dem Vorhandensein der Mittelmarkierung werden weitere Streckencharakteristika wie die Breite der markierten Radverkehrsanlage und der Kernfahrbahn oder die Umfeldnutzung analysiert. Außerdem zeigt die Abbildung eine charakteristische Ansicht der Messstrecke. Alle weiteren Steckbriefe der Messstrecken mit den jeweiligen Merkmalsausprägungen finden sich im Anhang A.2.

[129] OpenStreetMap 2021.

Messstrecke Marienstraße



Typischer Querschnitt

Szenario MmS+

Länge der Strecke	Jeweils 280 m
Anzahl Fahrstreifen	2
Mittelmarkierung	Vorhanden
Breite Kernfahrbahn	6,0 m
Breite Schutzstreifen (beidseitig)	1,3 m
Ruhender Verkehr	nein
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	30 km/h
Umfeldnutzung	Wohnnutzung und Universität
Längsneigung	< 3 %
Besonderheiten/Anmerkungen	Knotenpunkt Wielandplatz ausgenommen wg. Fahrspuraufweitung & Lichtsignalanlage (LSA), ÜHV an LSA Marienstr. nur bei fließendem Verkehr erfasst, keine Rinne

Abbildung 13 Beispiel Steckbrief Messstrecke Marienstraße

3.4 Quantifizierung der seitlichen Abstände

Zur Messung von Überholabständen gibt es verschiedene Verfahren, die auf unterschiedlichen Sensoren basieren. In der Literaturrecherche zu seitlichen Überholabständen (Kapitel 2.4.3) werden dabei die bisher verwendeten Verfahren genannt: Kamera, Laser, LiDAR und Ultraschall. Dahinter steckt entweder das Sensorprinzip der optischen Triangulation, der Lichtlaufzeit oder Ultraschall. Abstände können auch mit induktiven oder kapazitiven Sensoren gemessen werden, die Reichweiten dieser Systeme liegen jedoch im Bereich von Millimetern bis wenigen Zentimetern, weshalb diese nicht für die Messung von ÜHA geeignet sind.[130]

Da diese Arbeit Messtechnik zur Distanzmessung für die Anwendung in der Verkehrsplanung untersucht, werden im Folgenden ausschließlich in diesem Bereich verwendete Verfahren erläutert und keine weiteren Entfernungsmesssysteme untersucht.

3.4.1 Übersicht Messtechnik

Kamera-basierte Auswertung von Überholabständen

Bei der Kamera-basierten Auswertung von seitlichen Abständen werden ÜHA ausgehend von Videobildern entweder anhand von Messschablonen[131], die als Maske über das Bild gelegt werden, oder basierend auf der Pixelanzahl ermittelt.[132]

Dabei wird der Abstand des Fahrradreifens zum Reifen des Kfz erfasst und für den relevanten ÜHA die halbe Fahrradlenkerbreite und mittlere Außenspiegelbreite von Kfz subtrahiert.[133]

Die Validierung der Abstandsmessung erfolgt anhand von Referenzpunkten wie zum Beispiel eines Kfzs mit bekannten Abmessungen oder eigens angebrachten Kreidestrichmarkierungen.[134] Kameras ermöglichen sowohl die statische Erhebung von ÜHA aus dem Seitenraum als auch die dynamische Erhebung von Abständen, wenn sie an einem Messfahrzeug montiert sind.[135]

Nicht alle Studien geben die Genauigkeit der Messungen an.[136] Während Apasnore et al. (2017) für ihre Messung aus dem Seitenraum eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern angeben, liegt sie bei der Studie von Langer (2016) im Bereich von 10 bis 30 Zentimeter (Messfahrrad).

Mittels der Videoauswertungen können eine Vielzahl von Einflussfaktoren aus den vier Aspekten Infrastruktur, Fahrverhalten, Eigenschaften Fzg(-Führende) sowie umweltbedingte, verkehrliche Faktoren erhoben werden (vgl. Tabelle 7). Die benötigten Referenzpunkte zur

---

[130] Hering und Schönfelder 2018, S.127-128.
[131] Langer 2016, S. 60f.; Parkin und Meyers 2010, S. 161; Kaulen et al. 2013, S. 48f.
[132] Apasnore et al. 2017, S. 144.
[133] Koppers et al. 2021, S. 70; Kaulen et al. 2013, S. 49.
[134] Apasnore et al. 2017, S. 144; Langer 2016, S. 47.
[135] Schüller et al. 2020, S. 20.
[136] Z.B. Koppers et al. 2021.

Auswertung der Abstände anhand von Messschablonen erfordern nach Langer (2016) für dynamische Erhebungen markierte Radverkehrsführungen, im Mischverkehr ohne Schutzstreifen fehlen diese Referenzpunkte.

Weiterhin muss der Datenschutz beachtet werden. Durch die geeignete Wahl der Kameraposition sowie Auflösung der Bilder können (und müssen) Gesichter und Kennzeichen unkenntlich gemacht werden.[137]

Bei der Ausstattung von Messfahrrädern kann die Sichtbarkeit der Kamera zu einer Veränderung des Überholverhaltens führen.[138] Zudem ist eine manuelle Auswertung von mehrstündigem Bildmaterial, wie bei Langer (2016); Parkin und Meyers (2010) beschrieben, zeitintensiv. Außerdem müssen die Lichtverhältnisse zu der gewählten Kamera passen; vielfach ist dafür Tageslicht erforderlich.

Vorteile beim Einsatz von Kameras sind, dass einzelne Videosequenzen wiederholt abgespielt werden können.[139] Außerdem werden auch Konflikte und Vorhandensein sowie Position von Gegenverkehr erfasst.[140]

Laser-basierte Auswertung von Überholabständen

Die Technologie nutzt Licht in Form eines gepulsten, das heißt nicht kontinuierlich strahlenden Lasers, also scharf gebündeltes Licht einer bestimmten Wellenlänge, um Entfernungen zu messen.[141] Die Impulse werden von Objekten reflektiert und ein Hochgeschwindigkeitszähler misst die Flugzeit (ToF – time of flight) vom Startimpuls bis zum Rückimpuls. Die Zeitmessung wird dann mit der bekannten Lichtgeschwindigkeit in eine Distanz umgerechnet.[142]

Laser können mit einer hohen Genauigkeit Abstände erfassen,[143] benötigen für weitere Informationen eines ÜHV jedoch weitere Informationen, zum Beispiel GPS-Sensoren für die Position des Messfahrrads oder Kamerabilder für die Fahrzeugart und das Vorhandensein von Gegenverkehr (vgl. Tabelle 7).[144]

---

[137] Burger et al. 2020, S. 37.
[138] Langer 2016, S. 65.
[139] Kaulen et al. 2013, S. 47.
[140] Ebd., S. 47; Koppers et al. 2021, S. 44.
[141] Olsen 2013, S. 33.
[142] Li und Ibanez-Guzman 2020, S. 52; Voigt und Kremsreiter 2020, S. 25.
[143] Li und Ibanez-Guzman 2020, S. 51.
[144] Llorca et al. 2017, S. 3f.

LiDAR-basierte Auswertung von Überholabständen

LiDAR steht für Light Detection and Ranging und basiert auf der Lasertechnologie. Ein gepulster Laser scannt in festen Winkelschritten einen 360°-Bereich, um Entfernungen zu messen und dreidimensionale Informationen über die Umwelt zu sammeln.[145] Die Zeitmessung vom Aussenden bis zum Empfangen des Lichtimpuls wird in eine Distanz umgerechnet.[146] Weitere Komponenten von LiDAR-Systemen, insbesondere im Einsatz als mobile LiDAR-Systeme im Verkehrsbereich, sind neben dem Laser globale Navigationssatellitensystem (GNSS)-Empfänger, um Position, Zeit, Geschwindigkeit und Richtung des erhebenden Objekts zu erfassen, eine Inertial Measurement Unit, um in höherer Frequenz als der GNSS-Empfänger Position und Orientierung der Messeinrichtung zu erfassen sowie weitere Hilfsmittel wie Kameras.[147]

LiDAR-Systeme sind für ihre hohe Genauigkeit bekannt (Millimeter bis wenige Zentimeter).[148] Sie können ÜHV in ihrer gesamten Dauer von der Annäherung eines Kfz bis zum Einscheren nach dem ÜHV und damit auch verschiedene Überholstrategien erfassen.[149] Außerdem wird der Gegenverkehr mit erfasst (vgl. Tabelle 7).[150]

Für Eigenschaften der Infrastruktur wie die Art der Radverkehrsführung oder Merkmale der Radfahrenden wie Helmbenutzung sind allerdings zusätzliche Informationen, zum Beispiel von Kamerabildern oder Ortsbesichtigungen, erforderlich (vgl. Tabelle 7).

Die Handhabung von LiDAR-Systemen erfordert nach Olsen (2013) erfahrene Geomatiker:innen. Außerdem ist das System deutlich sichtbar am Messfahrrad montiert und kann damit das Überholverhalten beeinflussen.[151]

Radar-basierte Auswertung von Überholabständen

MIttels Radar, also Radio Detection and Ranging, können neben Geschwindigkeiten, Form und Größe von Objekten auch Entfernungen gemessen werden. Hier erfolgt die Distanzmessung ebenfalls über die Laufzeitmessung, wobei in definierten Abständen Radioimpulse ausgesendet werden. Stoßen diese auf ein Objekt, wird ein Teil reflektiert und die ToF gemessen. Da es sich bei Radiowellen um elektromagnetische Wellen handelt, wird mithilfe der Lichtgeschwindigkeit die Entfernung ermittelt.[152] Radargeräte haben eine hohe Reichweite und eignen sich unter anderem zur Landvermessung.[153]

---

[145] Li und Ibanez-Guzman 2020, S. 51f.; Olsen 2013, S. 33.
[146] Li und Ibanez-Guzman 2020, S. 51.
[147] Olsen 2013, S. 33ff.
[148] Li und Ibanez-Guzman 2020, S. 51; Olsen 2013, S. 38f.
[149] Dozza et al. 2015, S. 30.
[150] Ebd., S. 32.
[151] Ebd.
[152] Hering und Schönfelder 2018, S. 280f.
[153] Ebd., S. 123.

Sie sind in keiner der untersuchten Studien Bestandteil zur Ermittlung von ÜHA, kommen im Kfz-Bereich aber zur Abstandsmessung zum Einsatz und sind weniger witterungsanfällig als Ultraschall gegen Wettereinflüsse.[154]

Ultraschall-basierte Auswertung von Überholabständen

Ultraschallsensoren basieren auf der Aussendung von Schallwellen, also mechanischen Wellen, die sich als Schwankungen von Druck und Dichte in verschiedenen Medien fortpflanzen. Ein Ultraschallsensor, der Sender und Empfänger umfasst, sendet einen Schallimpuls im Ultraschallbereich (20 Kilohertz bis 1 Gigahertz). Stößt die Schallwelle auf Objekte, reflektieren diese den Schall und werden vom Empfänger erfasst. Aus der Laufzeit des Schallimpulses wird mithilfe der bekannten Schallgeschwindigkeit (343 Meter pro Sekunde unter Normalbedingungen, das heißt 20° Celsius, 1013,25 Hektopascal und trockener Luft) die Entfernung berechnet.[155]

Die Genauigkeit wird mit 1 Zentimeter bei Walker (2013 S. 8), mit 1,5 Zentimeter bei Beck et al. (2019, S. 254) angegeben, die Reichweite liegt etwa bei 0 bis 3,3 Meter.

Ultraschallsensoren eignen sich für die Erfassung von Abständen zu Fahrzeugen unabhängig von Lichtverhältnissen oder dem Vorhandensein von Referenzmarkierungen, erfordern aber weitere Informationen zur Position des ÜHV mittels GPS-Sensoren und können auch weitere Einflussfaktoren wie Fahrzeugeigenschaften oder verkehrliche Begebenheiten nicht erfassen (vgl. Tabelle 7). Dafür sind sie einfach zu erhalten, günstig in der Anschaffung und sammeln keine Fahrzeug- oder Personendaten.[156]

[154] Hering und Schönfelder 2018, S. 281.
[155] Heinrich et al. 2020, S. 50.
[156] OpenBikeSensor-Community 2021a.

Tabelle 7 Überblick erfassbare Einflussfaktoren durch verschiedene Messtechnik

	Einflussfaktor	***Kamera***	***Laser***	***LiDAR***	***Ultraschall***
Infrastruktur	(Kern-)Fahrbahnbreite	+	-	-	-
	Art der Radverkehrsführung	+*[1]	-	-	-
	Mittlere Leitlinie	+	-	-	-
	Oberflächenbeschaffenheit	+	-	-	-
	Vorhandensein längsparkende Fzg	+	+	+	+
	Straßenbündige Bahnkörper	+	-	-	-
Fahrverhalten (Radfahrende, Kfz-Führende)	Geschwindigkeit	+	+	+	+
	Abstand nach rechts	+	+	+	+
	Überholstrategie	+	-	+	-
	Fahrlinie	+	+	+	+
Eigenschaften Rad(fahrende), Kfz(führende)	Fahrzeugart	+	-	-	-
	Gender	+	-	-	-
	Alter	+	-	-	-
	Helm (Radfahrende)	+	-	-	-
	Outfit (Radfahrende)	+	-	-	-
	Akzeptanz Mischverkehr	+	-	-	-
	Kindertransport (Radfahrende)	+	-	-	-
Weitere umweltbedingte und verkehrliche Einflussfaktoren	Lichtverhältnisse	+*[2]	-	-	-
	Sichtbeziehungen	+	-	-	-
	Gegenverkehr	+	-	+	-
	Zugelassene Geschwindigkeiten	+	-	-	-
	Verkehrsstärke/-dichte	+	-	-	-
	Anteil Schwerverkehr	+	-	-	-

+: Erfassung prinzipiell möglich (zum Teil abhängig vom Versuchsaufbau)
-: Erfassung nicht möglich/ zusätzliche Informationsquelle erforderlich
*[1] Markierungen als Referenzpunkte erforderlich
*[2] nur bei geeigneten Lichtverhältnissen möglich

3.4.2 Auswahl Messtechnik

Mithilfe von Videobeobachtungen können sämtliche Einflussfaktoren auf ÜHV ermittelt werden, jedoch erreicht diese Methode nicht die Präzision von Laser-, LiDAR- oder Ultraschallmessungen. Letztere erfordern zwar zusätzliche Informationen, aber mit weiteren Sensoren, oder wie beispielsweise bei Walker et al. (2014); Chuang et al. (2013); Beck et al.

(2019) zusätzlichen Kameras, die nicht zur Abstandsmessung, aber zur Erfassung weiterer Einflussfaktoren verwendet werden, können diese fehlenden Informationen ergänzt werden.

Da in dieser Arbeit auch die Situation Mischverkehr ohne Schutzstreifen betrachtet wird, reicht eine Ausstattung des Messfahrrads mit einer Kamera nicht aus. Außerdem werden Faktoren wie das Aussehen der Radfahrerin konstant gehalten und die Randbedingungen der Infrastruktur werden separat erfasst.

Ein LiDAR-System erfordert technisches Wissen und Erfahrung, die im Rahmen der Arbeit nicht zur Verfügung stehen. Laserentfernungsmessgeräte sind vielfältig verfügbar, allerdings nicht für kontinuierliche Messungen über lange Distanzen/Zeiten geeignet. Hier wäre eine Adaption für die Messung von ÜHA erforderlich, die im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden soll. Gleiches gilt für Radar-Messungen. Da bisherige Untersuchungen kein Radar zur Entfernungsmessung verwendet haben, müssten auch hier Systeme für die Messung von ÜHA angepasst werden, was den Aufwand dieser Arbeit übersteigt.

Für die Erhebung von ÜHA wurde basierend auf dem Radmesserprojekt des Berliner Tagesspiegel von der Fahrrad-Community ein ultraschallbasiertes Abstandsmessgerät entwickelt: der „OpenBikeSensor“. Anleitungen zum Bau des OBS sind als Open Source Projekt verfügbar.[157] Dieser ist günstig in der Anschaffung (circa 60 €[158]) und damit günstiger als Action-Kameras, die in Studien wie von Apasnore et al. (2017); Langer (2016) verwendet wurden (circa 200 bis 400 €[159]). Weiterhin ist keine Adaption für die Messung seitlicher Abstände erforderlich. Gleichzeitig bietet die Untersuchung mittels des OBS die Möglichkeit, die Bedeutung eines solchen, von der Fahrrad-Community entwickelten, Open Source Projekts für die Generierung von Daten für den Radverkehr zu bewerten. Daher wird der OBS als Erhebungsinstrument für diese Arbeit festgelegt. Bau, technische Komponenten sowie die Kalibrierung werden im nachfolgenden Kapitel dokumentiert. Die Kombination des OBS mit einer Kamera würde die Erhebung weiterer Einflussfaktoren ermöglichen – die Auswertung des Bildmaterials übersteigt jedoch den Bearbeitungsumfang dieser Arbeit.

[157] OpenBikeSensor-Community 2021a.
[158] OpenBikeSensor-Community.
[159] GoPro 2021.

4 Feldversuch

4.1 Vorbemerkung Erhebungskonzept

Der OpenBikeSensor nutzt zur Abstandsmessung von ÜHV einen JSN-SR04T-Ultraschallsensor, der mit einem ESP32 verbunden ist. Alle erforderlichen Komponenten werden in einem Hartschalengehäuse platziert, das für die Anbringung des OBS an der Sattelstütze entwickelt wurde und mit einem 3D-Drucker erstellt werden kann.[160]

Es werden zwei Ultraschallsensoren verwendet, die so am Gehäuse angebracht sind, dass sowohl der Abstand nach links zu überholenden als auch nach rechts zu parkenden Fahrzeugen gemessen wird. Zusätzlich gibt es ein Display, welches am Lenker montiert wird und bei dem unter anderem die Überholabstände und die Akkuladung angezeigt werden. Die Messung der Abstände erfolgt kontinuierlich, und erst durch Bestätigung per Knopfdruck (Knopf befindet sich am Display) wird ein gemessener Abstand als Überholvorgang gekennzeichnet. Das Gerät wird mit einem USB-C-Kabel aufgeladen und die Daten auf einer Micro-SD-Karte gespeichert. Die Datenübertragung kann kabellos via Drahtlosnetzwerk (WLAN) erfolgen oder durch Ausbau und Anschluss der SD-Karte an den Computer.

Nach der Auswahl der Szenarien, Messtrecken und der verwendeten Messtechnik folgte nun die praktische Umsetzung der Erhebung, für die zunächst der Aufbau der Hard- und Software dieses soeben beschriebenen Messverfahren erforderlich war. Dabei ist der Zusammenbau eines OBS nach Aussage der OBS-Community auch für zum Beispiel im Löten unerfahrene Menschen realisierbar.[161] Es wurden die erforderlichen Bauteile bestellt, die Hardware zusammengebaut und die Software auf den Sensor geflasht. Der Zeitaufwand für Lieferzeiten und möglicherweise auftretende Probleme beim Zusammenbau darf dabei nicht unterschätzt werden. Es folgte ein initialer Funktionstest des Sensors und anschließend die Kalibrierung des OBS. Diese umfasst sowohl die Bestimmung der Messgenauigkeit des Ultraschallsensors als auch die Ermittlung von deren Erfassungsbereich (Schallkeule) sowie den Einfluss des Zeitpunkts, bei dem manuell per Druckknopf bestätigt wird, dass es sich bei einer Abstandsmessung um einen ÜHV handelt.

Basierend auf einer Testfahrt wird der erforderliche Stichprobenumfang ermittelt, der bei einem relativen Stichprobenfehler von 5 Prozent mit einer Sicherheit von 95 Prozent gewährleistet, dass die Grundgesamtheit hinreichend genau beschrieben wird. Anschließend wird die Durchführung des Feldversuchs mit den Erhebungszeiten, der finalen Montage des OBS am Fahrrad und weiteren Randbedingungen, die während der Messfahrten möglichst konstant gehalten werden, detailliert beschrieben. Es folgt außerdem eine Dokumentation von

[160] OpenBikeSensor-Community 2021f.
[161] OpenBikeSensor-Community.

aufgetretenen Problemen und Fehlern, sowohl beim Bau des Sensors, bei der Durchführung der Messungen sowie bei der Auswertung.

4.2 Sensorbau

Beschaffung

Die OBS-Community hat sich über den webbasierten Kommunikationsdienst Slack vernetzt.[162] Dort besteht unter anderem die Möglichkeit, sich an Sammelbestellungen der Bauteile zu beteiligen. Auf der Website des OBS werden zwar alle erforderlichen Bauteile als Liste geführt,[163] eine individuelle Bestellung zeichnet sich jedoch durch signifikante Mehrkosten im Vergleich zur Beteiligung an einer Sammelbestellung aus.[164] Da Sammelbestellungen über die Community ausschließlich von Freiwilligen getragen werden, sind aufgrund mangelnder personeller Kapazitäten, der Einhaltung von Mindestbestellmengen oder potentiellen Krankheitsausfällen unabsehbare Verzögerungen im Bestellablauf zu erwarten, wobei mit Lieferzeiten von mehreren Wochen bis Monaten zu rechnen ist. Dafür wird ein vollständiger Bauteilsatz geliefert. Auch bei einer individuellen Bestellung der einzelnen Bauteile müssen Wartezeiten von mehreren Wochen einkalkuliert werden, da diverse Komponenten aus China importiert werden.[165]

Eine Übersicht über alle Bauteile findet sich im Anhang B.1

Zusätzlich zu den Bauteilen sind Werkzeuge und Verbrauchsgüter zum Zusammenbau erforderlich[166], unter anderem

- Lötstation/ Lötkolben
- Crimpzange für JST-XH-Steckverbinder
- Pinzette, Flachzange, Spitzzange
- Seitenschneider
- Abisolierzange
- Multimeter
- M3 Sechskantschraubendreher
- Lötzinn
- Entlötlitze/Entlötpumpe
- Isolierklebeband
- Circa 25 Millimeter dünne Litze (0,25 mm^2 / 23 AWG)

[162] OpenBikeSensor-Community 2021a; Slack.
[163] OpenBikeSensor-Community 2021f.
[164] OpenBikeSensor-Community 2021a.
[165] Ebd.
[166] Vgl. OpenBikeSensor-Community 2021f.

Maker Spaces oder vergleichbare Einrichtungen verfügen in der Regel über einen Großteil der benötigten Artikel.[167] Aufgrund der Corona-Pandemie erwies sich die Zusammenarbeit mit dem lokalen Maker Space der Bauhaus-Universität Weimar jedoch als schwierig. Letztlich konnten die erforderlichen Werkzeuge über Kontakt zum Technikum des Bauhaus-Instituts für zukunftsweisende Infrastruktursysteme (b.is) sowie private Kontakte ausgeliehen werden.

Hardware

Der OBS basiert auf folgenden Technologien:

- ESP32-Mikrocontroller (Espressif Systems)[168],
- GPS-Sensor NEO-6M (mögliche Frequenz der Datenaufzeichnung 0,25 Hertz bis 1 Kilohertz)[169],
- JSN-SR04T-Ultraschallsensoren (bis zu 60 Hertz Aufzeichungsfrequenz[170])

Die Bauanleitung für den OBS umfasst 19 Schritte, die kleinteilig mit Bild und Text beschreiben, in welcher Reihenfolge die jeweiligen Arbeiten zur Montage des Sensors durchzuführen sind (vgl. Anhang B.1).[171] Die ersten elf Schritte beziehen sich dabei auf das Bestücken des Printed Circuit Boards (PCB = Leiterplatte, Schaltplan siehe Anhang B.1) mit den verschiedenen Modulen wie dem USB-C-Lademodul oder dem GPS-Modul (Abbildung 14 zeigt das PCB in verschiedenen Stadien des Bauprozesses). Hier sind inbesondere Löt- und Crimp-Fertigkeiten erforderlich. Ohne Vorkenntnisse und mit guter Vorbereitung nahm dieser Teil der Montage knapp zwei Stunden in Anspruch.

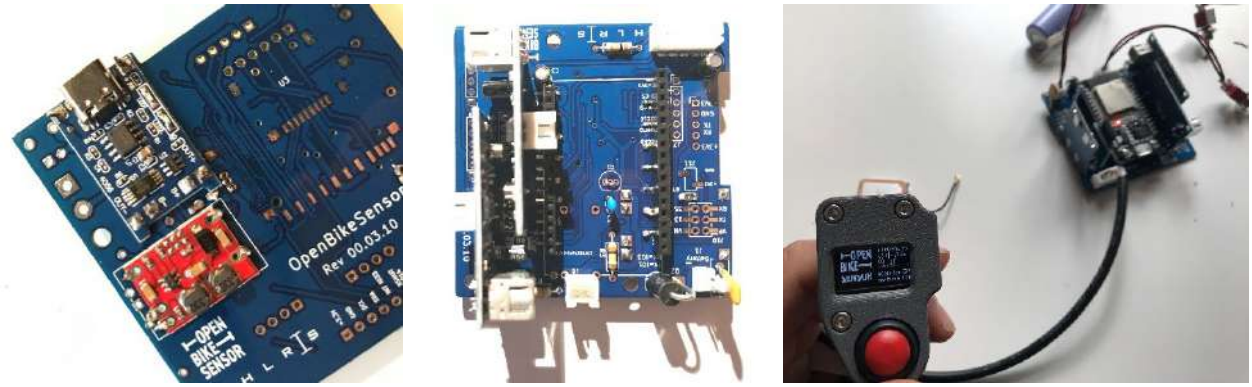


Abbildung 14 PCB des OBS mit Anbauteilen (links und mittig), Display mit rotem Druckknopf (rechts)

[167] OpenBikeSensor-Community 2021f.
[168] Espressif Systems.
[169] U-blox.
[170] OpenBikeSensor-Community.
[171] OpenBikeSensor-Community 2021e.

Im nächsten Arbeitschritt werden weitere Bauteile, wie der Hauptschalter und die Batterie, die über bereits vorkonfektionierte Steckverbindungen mit dem PCB verbunden werden, eingerichtet, das Display zusammengebaut und das Gehäuse vorbereitet.

Vor dem Einbau in das Gehäuse folgt das Aufspielen und Testen der Software, was nachfolgend noch ausführlicher beschrieben wird. Funktioniert dort alles, wird die Technik in das Gehäuse eingesetzt, fixiert und verschraubt.

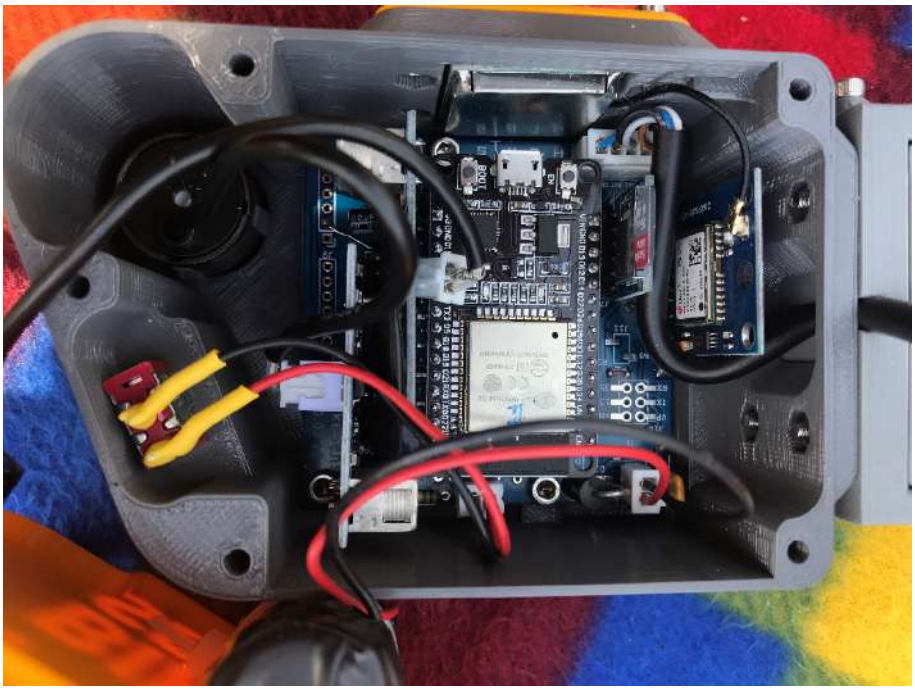


Abbildung 15 Blick auf die Platine mit Anbauteilen im Gehäuse des OBS

Dabei ist das Gehäuse passgenau auf das PCB mit seinen Anbauteilen zugeschnitten (vgl. Abbildung 15). Bei Unsauberkeiten durch den 3D-Druck kann es erforderlich sein, einige Stellen nachzufeilen, um ein problemloses Zusammenfügen aller Komponenten zu gewährleisten. Der Schritt des Einsetzens und Fixierens hat sich als kritisch erwiesen, da hierbei aufgrund der Formschlüssigkeit eine Querkraft auf das PCB ausgeübt wird, wobei mangelhaft verschmolzene Lötstellen zum Bruch neigen. Eine frühzeitige Überprüfung der elektrischen Durchgängigkeit platzierter Lötstellen mittels Multimeter erscheint sinnvoll. In Anbetracht der beengten Platzverhältnisse besteht kaum die Möglichkeit einer Nachbesserung unsauber verarbeiteter Kontaktstellen, weshalb im gegebenen Fall mehrere Module mittels Entlötpumpe erneut von der Platine abgelöst werden mussten. Weiterhin sind die Verwendung von hochwertigem Lötzinn mit genügend Flussmittel sowie die Verwendung einer Lötstation oder eines Lötkolbens, dessen Temperatur einstellbar ist, anzuraten. Auf diese Weise wird die Gefahr von kalten Lötstellen minimiert. Die Fehlersuche nach unvollkommenen Lötstellen verursachte unter Berücksichtigung nachträglich zu organisierender Hilfsmittel wie der

Entlötpumpe und einer hochwertigeren Lötstation einen zeitlichen Verzug von rund zwei Wochen, bis der Sensor letztlich einsatzbereit war.

Das Gesamtgewicht des OBS inklusive Gehäuse und Halterung beträgt circa 0,42 Kilogramm. Die Sensoren befinden sich in einer Höhe von 0,79 Metern an der Sattelstütze (vgl. Abbildung 16).

Abbildung 16 Messfahrrad mit OBS an Sattelstütze

Software

Um vom Sensor ÜHA ausgeben zu lassen, benötigt es eine entsprechende Software. Die OpenBikeSensor Firmware ist bei GitHub frei verfügbar und wird dort regelmäßig aktualisiert.[172] Für die Betriebssysteme Windows, Linux und macOS existieren entsprechende Anleitungen zum Flashen der Software auf den Mikrokontroller. Im Vergleich zu nachfolgenden Software-Updates, die per WLAN erfolgen können, ist hier einmalig der Download einer Zip-Datei sowie eines Flash-Tools erforderlich. Als Flash-Tool wird dabei das `esptool` von Espressif Systems verwendet.[173]

Bei Nutzung des Betriebssystems Windows ist zusätzlich ein USB 2 Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) Treiber erforderlich, um eine Kommunikation zwischen Windows und dem ESP32 zu ermöglichen. Trotz Befolgens der Anleitung und unabhängig vom verwendeten Computer oder USB-Kabel war das Flashen mit einem Rechner mit Windows 10

[172] OpenBikeSensorFirmware 2021.
[173] OpenBikeSensor-Community 2021c.

nicht erfolgreich. Da keine naheliegenden Fehler identifiziert werden konnten, erfolgte auf Hinweise in der Slackplattform das Aufspielen der Software schließlich über einen Computer mit Ubuntu, das heißt einer Linux-Distribution (Distribution = Gesamtpaket aus Softwarekomponenten). Im Vergleich zu Windows-Betriebssystemen ist das `esptool` hier bereits vorhanden. Nach dem Download der `Zip`-Datei, die einerseits Lizenzinformationen, andererseits vier `.bin`-Dateien enthält, wird mit dem folgendem Befehl auf die `.bin`-Dateien zugegriffen. Gemäß der Anleitung soll der links in Tabelle 8 angegebene Befehl ausgeführt werden. Auch hier erfolgte jedoch kein Flash der Software, da das zur Übertragung benötigte Skript nicht ordnungsgemäß aufgerufen werden konnte. Erst nach Anpassung der ersten Zeile des Codes (rechts, grau hinterlegt) war der Initial Flash der Software erfolgreich. Eine Formatierung der SD-Karte ist nicht erforderlich.[174]

Die Erhebung erfolgt mit der Firmware Version v0.5.531.

Tabelle 8 Python-Befehl zum Flashen der Firmware auf den OBS

Befehl laut Anleitung[175]:

```
python3 esptool.py \
    --chip esp32 \
    --port /dev/ttyUSB0 \
    --baud 921600 \
    --before default_reset \
    --after hard_reset \
    write_flash -z \
    --flash_mode dio \
    --flash_freq 40m \
    --flash_size detect \
    0x1000 0x01000.bin \
    0x8000 0x08000.bin \
    0xe000 0x0e000.bin \
    0x10000 0x10000.bin
```

Ausgeführter Befehl

```
esptool \
    --chip esp32 \
    --port /dev/ttyUSB0 \
    --baud 921600 \
    --before default_reset \
    --after hard_reset \
    write_flash -z \
    --flash_mode dio \
    --flash_freq 40m \
    --flash_size detect \
    0x1000 0x01000.bin \
    0x8000 0x08000.bin \
    0xe000 0x0e000.bin \
    0x10000 0x10000.bin
```

Nutzung und Datenupload

Zunächst wird der OBS am Fahrrad montiert. Die zum Gehäuse passende Halterung wird dafür an der Sattelstange mithilfe von Kabelbindern befestigt, das Gerät von der Seite darauf geschoben und mit einem Sicherungsstift arretiert (vgl. Abbildung 17, gelbe Ellipse). Zusätzlich zur empfohlenen Montage mit zwei Kabelbindern wird der OBS mit weiteren Kabelbindern und einer rutschhemmenden Unterlage vor eigenständiger Falschplatzierung bewahrt (vgl. Abbildung 17, blaue Ellipse).

[174] Slack (28.3.2021, #obs_sw_firmware "out of the box").
[175] OpenBikeSensor-Community 2021c.

Abbildung 17 Anbringung und Sicherung OBS an Sattelstütze

Das Displaykabel wird um das Oberrohr verlegt und ebenfalls mit Kabelbindern fixiert. Das Display selbst wird mithilfe der dafür vorgesehenen Halterung am Lenker montiert. Wegen der Lage der Brems- und Schalthebel des Messfahrrads, liegt das Display nicht in Reichweite des Daumens liegt, sodass die Hand zum Bestätigen von ÜHV vom Griff gelöst werden muss (vgl. Abbildung 18).

Abbildung 18 Displaymontage des OBS an Fahrradlenker

Zur Konfiguration des OBS wird dieser mit gedrücktem roten Taster eingeschaltet.

Befindet sich kein im OBS hinterlegtes WLAN in Reichweite, erstellt der OBS einen WLAN-Access-Point mit eigenem Service Set Identifier (SSID). Von einem Computer oder anderem Endgerät kann sich nun mittels des Standardpassworts 12345678 mit dem Access-Point verbunden werden. Die Konfiguration erfolgt dann über http://172.20.0.1.

Hier können Konfigurationen wie die Festlegung von Privatsphärezonen, WLAN-Verbindungsdaten, Back-Ups und das Wiederherstellen der Werkseinstellungen sowie generelle Einstellungen vom OBS vorgenommen werden.[176] Außerdem erhält man im „About“ Informationen zu den einzelnen Modulen (ESP32, Ultraschallsensoren, GPS sowie Display). Privatsphärezonen definieren einen Umkreis um ausgewählte Koordinaten, um im Falle eines öffentlichen Uploads der Daten zum Beispiel keinen Rückschluss auf den eigenen Wohnort zuzulassen. Generelle Einstellungen erlauben beispielsweise die Eingabe eines Offsets, um direkt den ÜHA unter Berücksichtigung der Lenker- und optional einer durchschnittlichen Fahrzeugaußenspiegelbreite zu erhalten. Außerdem erfolgt hier die Hinterlegung von Verbindungsinformationen zum Upload der aufgezeichneten Daten auf das HLRS-Portal.[177] Dazu ist eine Anmeldung bei dem Portal erforderlich. Hier erhalten Nutzende einen Application Programming Interface (API)-Key, der wiederum in der OBS-Konfiguration angegeben werden muss.

Mit dem konfigurierten und geladenen OBS beginnt die Messfahrt mit dem Einschalten des Geräts (Taster am Display wird nicht gedrückt). Es erscheint der Startbildschirm auf dem Display (vgl. Abbildung 19, links). Sobald das GPS-Modul genügend Satelliten erkannt und deren Positionsdaten (Almanach) empfangen hat, springt die Anzeige automatisch um und es erscheint die Darstellung für ÜHA nach links sowie eine Anzeige für den Ladezustand des Akkus (vgl. Abbildung 19, mittig). Diese Anzeige ist ebenfalls konfigurierbar – da bei den Messfahrten dieser Arbeit die ÜHA nach links betrachtet werden, wird die Einstellung jedoch beibehalten.

[176] OpenBikeSensor-Community 2021b.
[177] OpenBikeSensor-Community 2021d.

Abbildung 19 Display des OBS (Startbildschirm, Abstandsmessung, Datenupload)

Sobald der Ultraschallsensor Objekte registriert, wird auf dem Display nun die Distanz vom Messobjekt dargestellt. Wenn es sich bei dem Objekt um ein überholendes Fahrzeug handelt, ist dieses, wie bereits eingangs erwähnt, durch einmaliges Betätigen des roten Druckknopfes am Display als ÜHV zu kennzeichnen. Diese Abstandmessungen werden in der `.csv`-Datei nachfolgend als „bestätigte“ ÜHV markiert. Nach Beendigung der Fahrt muss zum Speichern der erhobenen Messungen beim Ausschalten des OBS der Taster am Display gedrückt gehalten werden.[178]

Zum Upload der Daten muss der OBS wiederum mit gedrücktem Druckknopf in Reichweite des konfigurierten WLAN eingeschaltet werden. Der OBS verbindet sich automatisch mit diesem und bietet anschließend die Möglichkeit, Sensordaten automatisch in das HLRS-Portal hochzuladen (vgl. Abbildung 19, rechts).

Dieses Portal visualisiert die hochgeladenen ÜHA auf einer Karte – dort, wo ein ÜHV stattgefunden hat, wird je nach eingehaltenem Abstand ein farblich markierter Kreis angezeigt. Außerdem besteht die Möglichkeit, die hochgeladenen Daten als `.csv`-Datei sowie den zugehörigen Routenverlauf als `.gpx`-Track herunterzuladen. Die Auswertung der Daten erfolgt nicht automatisch.[179]

Anfang Juni 2021 wurde das Portal jedoch von der OBS-Community abgeschaltet. Stand August 2021 wird an einem Neustart gearbeitet. Ein automatischer Upload der Daten ist dadurch temporär nicht mehr möglich. Stattdessen müssen, um an die Dateien zu kommen, das Gehäuse vom OBS geöffnet, die SD-Karte extrahiert und an den PC angeschlossen und die Daten manuell heruntergeladen werden.[180]

---

[178] OpenBikeSensor-Community 2021b.
[179] OpenBikeSensor-Community.
[180] OpenBikeSensor-Community 2021d.

4.3 Sensorvalidierung

Die Validierung des Ultraschallsensors erfolgt durch eine Abstandsmessung gegen eine flache Wand (vgl. Abbildung 20) sowie gegen eine Fahrzeugflanke (VW-Bus). Getestet werden die Reichweite des Sensors, seine Messgenauigkeit und die Winkelabhängigkeit der Messungen. Darüber hinaus wird die Erfassungsquote des Druckknopfes mit einem vorbeifahrenden Fahrzeug getestet und die Fahrlinie, die von der Radfahrerin eingehalten wird, geprüft. Ausführliche Protokolle der Versuche finden sich im Anhang C.1.

Abbildung 20 Bestimmung der Sensorgenauigkeit - Messung gegen Hauswandand

Dabei wird vorab kein Offset für eine durchschnittliche Kfz-Außenspiegelbreite, die in der Literatur mit 0,15 bis 0,20 Metern angegeben wird,[181] und auch nicht die halbe Lenkerbreite (0,325 Meter) eingestellt. Diese Maße, die für den im Kapitel 2.4.1 definierten ÜHA von Fahrzeugaußenkante zu Fahrradaußenkante relevant sind, werden bei der nachträglichen Bearbeitung der Rohdaten mit 0,45 Meter berücksichtigt. In die 0,45 Meter fließt auch mit ein, dass der Ultraschallsensor um 2,5 Zentimeter von der Fahrradmittelachse entfernt ist (entspricht der halben Gehäusebreite). Diese 2,5 Zentimeter müssen auch bei der Kalibrierung berücksichtigt werden, da das Lasermessgerät so positioniert ist, dass es ab Sensor- und damit Fahrradmittelachse misst.

Die Validierung des Ultraschallsensors an der flachen Wand ergibt eine Messgenauigkeit des Sensors von ± 1,50 Zentimeter (vgl. Abbildung 21 und Tabelle). Die Abweichung vom Lasermesswert streut dabei mit 0,92 Zentimetern um den Mittelwert von 0,03 Zentimetern.

[181] Ohm et al. 2015, S. 67; Schüller et al. 2020, S. 36; Kaulen et al. 2013, S. 49.

Tabelle 9 Statistische Kenngrößen: Abweichung der OBS-Messung zur Lasermessung

	Differenz Lasermessung – OBS-Messung (inkl. Offset)
Mittelwert	-0,03 cm
Median	-0,17 cm
Standardabweichung	0,92 cm
Stichprobenvarianz	0,84 cm^2
Wertebereich	3,00 cm
Minimum	-1,50 cm
Maximum	1,50 cm

Bei der Abweichung der OBS-Messung zur Lasermessung ist eine systematische Abweichung zu erkennen: Bei kleinen Abständen bis 1,00 Meter wird der Abstand unterschätzt, und der OBS misst geringere Werte, bei Strecken von > 2,00 Metern werden größere Abstände gemessen (jeweils maximal 1,5 Zentimeter Abweichung, vgl. Abbildung 21). Das Gerät hat einen Messbereich von 20 Zentimeter bis 320 Zentimeter.

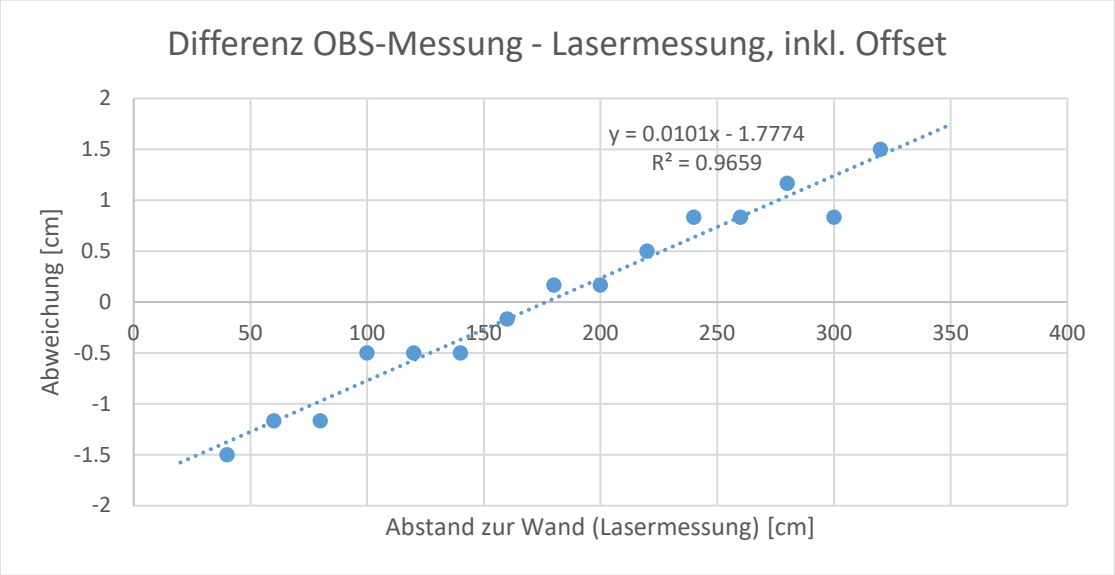


Abbildung 21 Mittelwerte der Abweichung der OBS-Messung zur Lasermessung

Für die Arbeit wurde *ein* OBS gebaut. Es ist zu vermuten, dass die Genauigkeit jedes einzelnen OBS variiert und die Messungenauigkeiten dieses Sensors nicht unmittelbar auf weitere übertragbar sind.[182]

Zusätzlich zur parallelen Ausrichtung des OBS zum Fahrzeug wurde der Einfluss von schrägen Ausrichtungen getestet (vgl. Abbildung 22).

[182] Beck et al. 2019, S. 254.

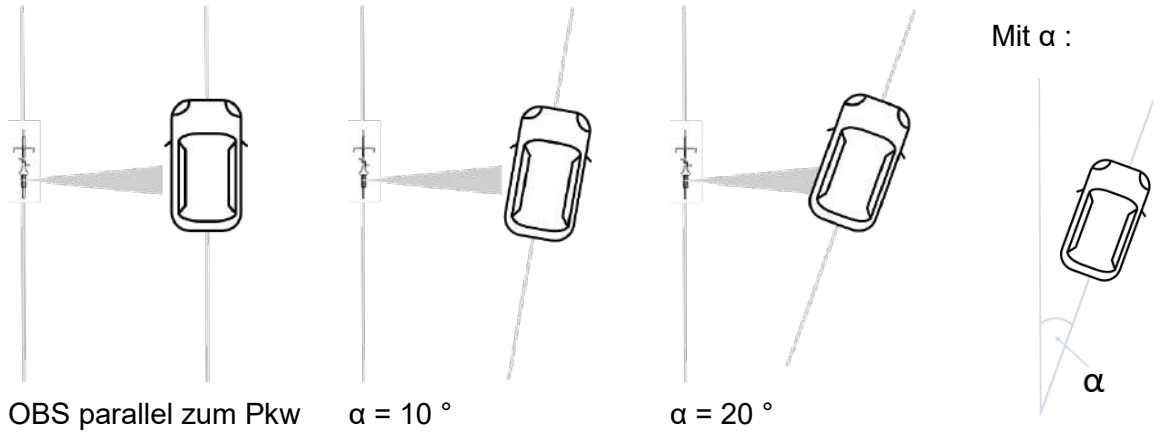


Abbildung 22 Ausrichtung Fahrrad - Fahrzeug, verschiedene Winkel (eigene Darstellung)

Die Messungen des Sensors zeigen dabei eine Abhängigkeit vom Winkel des Sensors zum Fahrzeug. Ab α = 30° wird das Fahrzeug nicht mehr erfasst. Bei 10° beziehungsweise 20° liegt die Abweichung bei vom erwarteten Messwert bei 3,3 Zentimeter bzw 2,3 Zentimeter. Bei ÜHV fährt ein Kfz nicht dauerhaft parallel am Radfahrenden vorbei, wie bei den Phasen eines ÜHV in Abbildung 10 im Kapitel 2.4.2 zu erkennen ist. Mit dem gewählten Messaufbau und der Anzahl der Messungen kann kein systematischer Zusammenhang zwischen Winkel und Abstandsmessung ermittelt werden. Dafür müssten weitere Messungen in kleineren Winkelabstufungen, zum Beispiel 5°-Schritten, durchgeführt werden. Basierend auf den Messungen werden daher pauschal Messungenauigkeiten in einer Größenordnung von 3 bis 5 Zentimeter angenommen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die pauschal angesetzten 0,45 Meter für die halbe Lenkerbreite sowie die Außenspiegelbreite bei anderen Winkeln als α = 0° von Fahrrad und Fahrzeug zueinander ebenfalls zu Ungenauigkeiten führen. Diese werden auf eine Größenordnung von 10 bis 15 Zentimeter geschätzt.

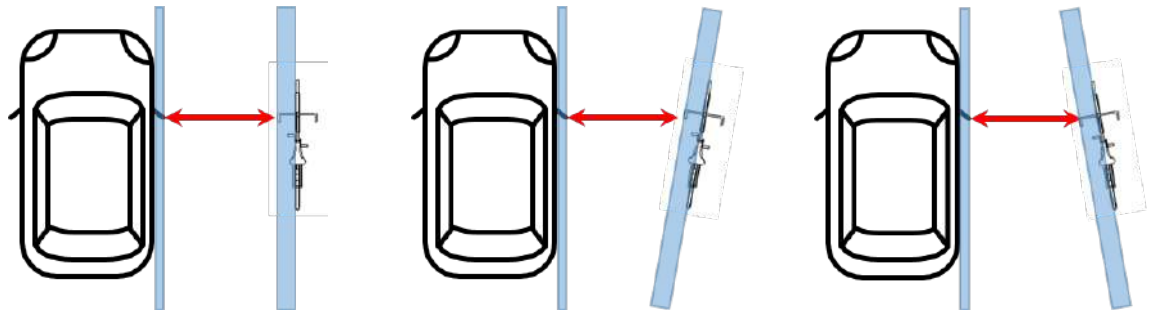


Abbildung 23 Ungenauigkeiten durch nicht parallele Position von Fahrzeug und Fahrrad (ohne Lenkeinschlag Fahrrad) (eigene Darstellung)

Zusätzlich wird überprüft, inwiefern Außenspiegel von Fahrzeugen erfasst werden. Dafür wird parallel zu parkenden Fahrzeugen geprüft, ob sich auf Höhe des Außenspiegels der Messwert

verändert. Dies ist bei verschiedenen Fahrzeugmodellen, deren Außenspiegel sich auf Höhen zwischen 0,86 Meter (Mini) und 102 Zentimeter (Opel Zafira) befinden, nicht der Fall (vgl. Anhang C.1).

Die Erfassungsquote wird durch den Zeitpunkt, wann der ÜHV als solcher mit dem Druckknopf bestätigt wird, beeinflusst. Es wird deutlich, dass ein Drücken des Knopfes *nachdem* das Fahrzeug das Fahrrad passiert hat, die Erfassungsquote deutlich erhöht. Wenn der Sensor direkt nach Betätigen des Druckknopfes weitere Abstände erfasst, erfolgt in der Regel keine Bestätigung des ÜHV. Daher ist darauf zu achten, dass erst nachdem das Fahrzeug am Sensor vorbeigefahren ist, der UHV als solcher bestätigt wird (vgl. Anhang C.1).

Für die Auswertung der Messfahrten hinsichtlich des Einflusses der Position der Radfahrenden auf der Straße ist zudem relevant, inwieweit ein konstanter Abstand zum rechten Bord oder zu rechts parkenden Fahrzeugen eingehalten werden kann. Dafür wurden zunächst Orientierungspunkte am Lenker als Schnittpunkt mit den Sichtachsen des Blickfelds definiert: Liegen sie in einer Flucht mit dem Rand der Fahrbahn, entspricht das jeweils einem Abstand der Fahrradmittelachse von 0,30 bis 0,50 Metern (Position 1), 0,80 bis 1,00 Metern (Position 2) oder 1,30 bis 1,50 Metern (Position 3). Mit diesen Fixpunkten wurden dann mehrere Testfahrten auf einer wenig befahrenen Einbahnstraße unternommen, mittels nasser Reifen die Fahrlinien sichtbar gemacht und vermessen. Die Wahl der „Abstandskorridore“ sowie der Orientierungspunkte erwies sich dabei als geeignet, um die Position der Fahrlinie innerhalb dieser Bereiche sicherzustellen (vgl. Anhang C.1).

Position 1 Position 2 Position 3

Abbildung 24 Fixpunkte am Fahrradlenker für seitliche Abstände nach rechts

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Messungenauigkeit des Ultraschallsensors vernachlässigbar klein ist im Vergleich zu den getroffenen Annahmen: Sowohl die Summe Außenspiegelbreite plus halbe Lenkerbreite – vor allem, wenn man Lenkmanöver und verschiedene Überholwinkel berücksichtigt – als auch der betrachtete Korridor, indem die

Fahrlinie liegt, beeinflussen den Messwert stärker als die Messungenauigkeit des OBS von 1,5 Zentimeter. Nachfolgende Aussagen zu ÜHA haben eine Genauigkeit von ± 15 Zentimetern. Aussagen zur Position der Radfahrerin auf der Straße liegen ebenfalls in dieser Größenordnung.

4.4 Stichprobenumfang

ÜHV, bei denen physikalische Kenngrößen wie der Abstand zwischen Kfz und Fahrrad erfasst werden, sind durch statistische Lage- und Streuparameter wie dem Mittelwert und der Standardabweichung gekennzeichnet.[183]

Ein einzelner Überholvorgang kann dabei einen stark abweichenden Wert produzieren und dadurch nicht repräsentativ für die Mehrheit der Überholvorgänge auf einem Streckenabschnitt sein. Daher muss eine ausreichende Anzahl an ÜHV ermittelt werden, die innerhalb der definierten Aussagegenauigkeit, verlässliche Aussagen zulässt. Das Vorgehen zur Ermittlung des erforderliche Stichprobenumfangs wird Schnabel et al. (1997, S. 126f.), entnommen.

Zur Berechnung des Stichprobenumfangs sind der Mittelwert und die Standardabweichung erforderlich. Diese sind jedoch nicht bekannt und müssen daher geschätzt werden. Zur Schätzung wird eine erste Testfahrt durchgeführt. Hier wird die Merkmalausprägung 0,80 bis 1,00 Meter Abstand nach rechts konstant gehalten, unterschiedliche Arten der Radverkehrsführung werden nicht gesondert betrachtet, sondern die einzelnen Messstrecken abgefahren. Weitere Randbedingungen wie Kleidung, Werktag und Tageszeit entsprechen denen der späteren Messfahrten. Es wird vereinfachend angenommen, dass die Berechnung des Stichprobenumfangs auf Basis von Merkmalsausprägungen der Voruntersuchung übertragbar für alle untersuchten Szenarien ist. Bei dieser Voruntersuchung werden 25 ÜHV erfasst. Aus diesen ÜHV werden der Mittelwert des ÜHA sowie die Standardabweichung bestimmt. Der erforderliche Stichprobenumfang *n* bestimmt sich mit der Formel für $N \rightarrow \infty$, da davon auszugehen ist, dass die Stichprobe nicht mehr als 5 Prozent der Elemente der Grundgesamtheit *N* enthält.[184]

[183] FGSV 2006, S. 18.
[184] Schnabel et al. 1997, S. 126.

$$n = \frac{k^2 * V^2}{d_r^2}, \qquad \text{für } N \to \infty \text{ mit } V = \frac{s}{x}$$

n: Mindestens erforderlicher Stichprobenumfang

N: Umfang der Grundgesamtheit

k: Genauigkeitsfaktor nach Schnabel et al. (1997), abhängig von der Statistischen Sicherheit S und vom Verteilungstyp

V: Variationskoeffizient

d_r: Zulässiger relativer Stichprobenfehler

s: Standardabweichung der Stichprobe

x: Mittelwert der Stichprobe

Dabei liegt die Statistische Sicherheit S (auch Konfidenzniveau genannt) typischerweise bei 0,95[185] und wurde entsprechend gewählt. Als Verteilung wird die Normalverteilung zugrunde gelegt (vgl. Shapiro-Wilk-Test im Anhang C.2). Als zulässiger relativer Stichprobenfehler wird d_r = 5 % gesetzt.[186]

Tabelle 10 Erforderlicher Stichprobenumfang bei α = 0,95, Normalverteilung, basierend auf Vorerhebung mit 25 ÜHV

Wert	
k =	1,96
s =	39,11 cm
x =	160,44 cm
n (d_r = 5 %) =	92
n (d_r = 10 %) =	23

Basierend auf dieser Berechnung wird für die einzelnen Szenarien jeweils ein Strichprobenumfang von mindestens 92 ÜHV angestrebt.

4.5 Durchführung der Erhebungsfahrten

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wird der OBS für den Feldversuch an einem Fahrrad unterhalb des Sattels an der Sattelstütze befestigt. Um ihn gegen Verrutschen während der Untersuchung zu sichern, wird er mit zusätzlichen Kabelbindern und einem Stück

[185] FGSV 2006, S. 24.
[186] Langer 2016, S. 58.

Fahrradschlauch befestigt. Abbildung 25 verdeutlicht, dass sich der OBS unterhalb des Sattels als unscheinbare graue Box präsentiert. Auch an LSA ist aus Sicht von Autofahrenden links der Radfahrerin nicht ersichtlich, worum es sich bei der Box handelt. Daher wird davon ausgegangen, dass der Messaufbau keine Auswirkungen auf das Überholverhalten der Kfz-Führenden hat.

Die Fahrradtasche befindet sich während der Messfahrten am Fahrrad. Die Fahrerin trägt Helm, legere Kleidung und bleibt während der Fahrten jeweils im Sattel sitzen (kein Wiegetritt).

Abbildung 25 Sichtbarkeit OBS an Sattelstütze

Anschließend wurden die Messfahrten durchgeführt. Ziel dabei war es, für jede Messstrecke Messfahrten mit einem Abstand von 0,30 bis 0,50 Meter, 0,80 bis 1,00 Meter und 1,30 bis 1,50 Meter zum rechten Fahrbahnrand durchzuführen und je Szenario rund 120 ÜHV (wegen der Erfassungsquote von circa 80 Prozent) zu erreichen.

Die Aufnahmen fanden vorwiegend in Zeiten statt, bei denen es nicht zum Rückstau an Knotenpunkten oder Fußgängerüberwegen (FGÜ) kam und ein ausreichend niedriges Verkehrsaufkommen ÜHV im Gegenverkehr erlaubte. Dies wurde bei den ersten Befahrungen ermittelt und die folgenden Messfahrten entsprechend terminiert.

Darüber hinaus erfolgten die Erhebungen ausschließlich werktags. Während die FGSV in den Empfehlungen für Verkehrserhebungen für Verkehrsmengen nur die Tage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag empfehlen, wurden hier auch montags und freitags Messfahrten durchgeführt, da angenommen wird, dass sich die ÜHA an diesen Tagen nicht von den anderen Werktagen unterscheiden.[187] Die Erhebungszeiten werden in Tabelle 11 dargestellt. Die Erhebungen fanden bei guten Wetterbedingungen und trockener Fahrbahn statt.

[187] EVE, Januar 2012, S. 44.

ÜHV durch Krafträder sowie durch andere Fahrradfahrende wurden nicht als solche markiert. Die Untersuchung beschränkt sich auf Pkw, Busse und Lkw – ohne diese jedoch zu unterscheiden. Kam es an Knotenpunkten zu einem Rückstau, an dem vorsichtig rechts vorbeigefahren werden konnte, wurden weder diese Abstandsmessungen noch ÜHV durch anfahrende Fahrzeuge markiert. Hielten oder parkten Fahrzeuge auf der Fahrbahn, so wurden ÜHV, die vor und nach dem Hindernis stattfanden, ebenfalls nicht als solche erfasst. Auf der Erfurter Straße musste eine präzise Zeitplanung bei den Messfahrten berücksichtigt werden, da dort der mit einer Schranke gesicherte Bahnübergang zu Lücken im Verkehr ohne ÜHV führte. Insbesondere auf der Marien- und Steubenstraße gab es Situationen, in denen vor oder hinter dem Messfahrrad weitere Radfahrende mit einem anderen Abstand zum rechten Bord unterwegs waren. War dies bei Radfahrenden im Sichtfeld der Autorin der Fall, wurden ÜHV ebenfalls nicht markiert. In wie vielen Fällen sich hinter der Autorin Radfahrende befanden, die einer anderen Fahrlinie auf der Straße folgten und welchen Einfluss deren Position auf das Überholverhalten der überholenden Fahrzeuge hat, kann im Rahmen dieser Untersuchungen nicht quantifiziert werden.

Die Messfahrten starteten am 3.6.2021 und endeten am 21.7.2021. Am 10.6.2021 wurde das Portal zum automatischen Upload der Daten abgeschaltet (vgl. Kapitel 4.2), es war jedoch schon ab dem 8.6.2021 nicht mehr erreichbar. Dadurch hätte der OBS zur Datenübertragung jeweils aufgeschraubt werden müssen. Da ausreichend Speicherplatz auf der SD-Karte vorhanden ist, wurden die Daten in gesammelter Form erst zum Ende der Erhebung abgerufen. Um einen Überblick über die ÜHV zu bekommen und um abschätzen zu können, wie viele Messfahrten noch erforderlich sind, wurden die ÜHV überschlägig manuell mitgezählt. Insgesamt wurden 480 Kilometer gefahren und 1919 ÜHV erfasst, von denen 1461 auf den definierten Messstrecken stattfanden.

Tabelle 11 Überblick über die Erhebungszeiten der Szenarien mit Witterung und mittlere Geschwindigkeit des Fahrrads

Erhebungstag		*Uhrzeit*	*Messstrecke*	*Position*	*Witterung*	$\bar{v}_{Fahrrad}$ *[km/h]*
Do.	3.6.2021	7:30-8:30*	MoS-	3	19° C, Sonnig	17,6
		16:00-16:30	MoS-	3	24° C, Sonnig	18,4
Fr.	4.6.2021	11:50-13:00	MoS-, RFS+	3	25° C, bewölkt	17,9
Mo.	7.6.2021	6:45-8:15	RFS+, MoS+, MmS+	3	16° C, bewölkt	15,8
		15:10-16:40	RFS+, MmS+	3	21° C, bewölkt	16,1
Di.	8.6.2021	8:20-9:10	RFS+, MoS+, MmS+	3	17° C, leicht bewölkt	15,7
		15:15-16:30	RFS+, MoS+, MmS+	3	23° C, bewölkt	16,1
Mi.	9.6.2021	8:00-9:10	RFS+, MoS+, MmS+	3	17° C, bewölkt	15,4
Mo.	14.6.2021	8:20-10:30	RFS+, MoS+, MmS+	2	15° C, sonnig	13,3
Di.	15.6.2021	8:40-10:20	RFS+, MoS+, MmS+	2	19° C, bewölkt	12,7
Mi.	16.6.2021	8:40-10:30	RFS+, MoS+, MmS+	2	20° C, bewölkt	12,4
Do.	17.6.2021	8:20-9:50	MoS-, RFS+, MoS+, MmS+	2	23° C, leicht bewölkt	14,2
Mo.	21.6.2021	8:00-9:30	MoS-, RFS+, MoS+, MmS+	2	19° C, bewölkt	16,7
Do.	24.6.2021	9:20-9:50	RFS+, MoS+, MmS+	1	17° C, leicht bewölkt	16,3
Mo.	28.6.2021	9:15-10:35	RFS+, MoS+, MmS+	1	20° C, bewölkt	15,0
Di.	29.6.2021	9:40-10:50	RFS+, MoS+, MmS+	1	18° C, bewölkt	16,0
Mi.	30.6.2021	8:50-9:55	RFS+, MoS+, MmS+	1	17° C, bewölkt	15,0
Do.	1.7.2021	9:00-10:05*	MoS-, RFS+, MoS+, MmS+	1	15° C, bewölkt	15,9
Fr.	2.7.2021	8:50-10:05	MoS-	1	14° C, bewölkt	16,7
Mo.	19.7.2021	7:35-9:00	MoS-	3	15° C, bewölkt	15,2
		15:00-16:00	MoS-, MoS-	3,1	22° C, leicht bewölkt	15,4
Mi.	21.7.2021	9:20-11:35	RFS+, MoS+	3,1	15° C, leicht bewölkt	12,8

*Erhebungsfahrten, die aufgrund von fehlenden Dateien/ fehlerhaften Koordination nicht ausgewertet wurden

5 Ergebnisse und Auswertung

5.1 Vorgehen zur Auswertung

Die OpenBikeSensor-Community stellt auf GitHub ein Toolkit bereit, um die im `.csv`-Dateiformat gespeicherten Rohdaten für eine grafische Visualisierung aufzubereiten. Dabei werden vier Schritte – kurz „FACE“ genannt – durchlaufen:[188]

Filtering (Filtern) – „Messungen mit ungültigem Zeitstempel, Standort oder Distanzmessung werden herausgefiltert. Weiterhin werden nur bestätigte Messungen beibehalten.“

Annotation (Zuordnung und Beschriftung) – „Jede Messung wird einem Weg zugeordnet, wie er in den OpenStreetMap-Daten beschrieben ist. GPS-Positionen werden durch Projektion auf den Weg korrigiert (Snapping). Weiterhin werden für jede bestätigte Messung Informationen aus OpenStreetMap wie zum Beispiel Straßennamen zur Messung dupliziert.“

Consolidating (Konsolidierung) – „Alle bestätigten und gültigen Messungen werden gesammelt und in einer Datei im `Json`-Format konsolidiert.“

Export (Exportieren) – „Die konsolidierten Messungen werden in das `GeoJson`-Format konvertiert und zur Visualisierung exportiert, wie es die *OpenBikeSensor-Visualisierung* verlangt.“

Die „OpenBikeSensor-Visualisierung“ bildet mittels FACE die aufbereiteten Daten ab, indem sie die Abstandsmessungen auf eine OpenStreeetMap-Karte legt („Map-Overlay“).[189] Diese erste grafische Visualisierung ist hilfreich für einen Überblick, wird aber nicht weiter für die Auswertung genutzt.

Da an verschiedenen Tagen drei verschiedene Positionen auf der Fahrbahn eingehalten wurden, wird FACE dreimal angewendet. Es werden drei Messdatensätze (`measurement.json`) erstellt (vgl. Anhang D.4), die ausschließlich bestätigte ÜHV mitsamt ihren Zeit- und (auf QGIS streckenbezogen magnetisierten) Ortsdaten enthalten. Diese konsolidierten Daten der FACE-Bearbeitung werden als drei Layer in QGIS eingelesen. Dabei wird deutlich, dass trotz Magnetisierung an Realwege („Snapping“) einige ÜHV zu Strecken abseits der erhobenen Messstrecke zugeordnet wurden. Da aus den Messfahrten bekannt ist, dass beispielsweise keine Messfahrten auf dem Parkplatz zwischen Erfurter und Wallendorfer Straße durchgeführt wurden, werden diese ÜHV ebenfalls der Erfurter Straße zugeordnet. Abbildung 26 zeigt die Problematik der ungenauen GPS-Daten sowie alle für die Auswertung ausgewählten ÜHV. In der Attributtabelle werden den selektierten ÜHV die Kurzbezeichnungen des jeweiligen Szenarios als ID zugeordnet.

---

[188] OpenBikeSensor-Community.
[189] OpenBikeSensor-Community.

Abbildung 26 Visualisierung der manuellen Zuordnung von ÜHV mit ungenauen GPS-Daten –am Beispiel Erfurter Straße[190]

Für eine detaillierte Auswertung der ÜHA werden die Werte aus QGIS als `.csv`-Datei exportiert und in Microsoft Excel eingelesen. Die ÜHA werden dort zunächst mit dem Korrekturwert von -0,45 Metern belegt, der die durchschnittliche Außenspiegelbreite sowie die halbe Fahrradlenkerbreite berücksichtigt. Anschließend findet eine manuelle Plausibilisierung der Daten statt. Dabei fällt beim Szenario MmS+3 sowie RFS+3 jeweils ein Wert auf, der unter Berücksichtigung der Lenker- und Spiegelbreiten negativ wird (vgl. Tabelle 12). Diese zwei Werte wurden manuell aussortiert, da es sich offensichtlich um Fehlmessungen handelt (vgl. Fehlerdokumentation in Kapitel 4.5). Werte, die außerhalb des Messbereichs des OBS liegen, sind nicht vorhanden, damit ist die Plausibilisierung der Daten mit dem Ausschluss der beiden negativen Werte abgeschlossen. Nach der Aufbereitung der Rohdaten findet die statistische Auswertung der übrigen Daten statt:

Zunächst werden die Messwerte der einzelnen Szenarien mit statistischen Kenngrößen wie dem Mittelwert und der Standardabweichung beschrieben (Deskriptive Statistik). Erste Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Merkmalsausprägungen werden mit Boxplot-Diagrammen dargestellt. Außerdem wird geprüft, welche Verteilung den Messwerten zu Grunde liegt, um Zusammenhänge zwischen den Szenarien mithilfe von Varianzanalysen zu ermitteln. Die Berechnungen erfolgen neben Microsoft Excel mit Jamovi[191], einem auf dem Programm R basierenden Programm und werden ausführlich im Anhang D dargestellt.

---

[190] Kartenbasis OpenStreetMap 2021 (eigene Darstellung).
[191] Jamovi 2021.

Deskriptive Statistik

In diesem Schritt werden mit Excel folgende statistischen Kenngrößen für jedes Szenario ermittelt (vgl. Anhang D.1):

- Mittelwert (arithmetisches Mittel),
- Median,
- Standardfehler
- Standardabweichung
- Varianz der Stichprobe
- Wertebereich (Differenz zwischen Minimum und Maximum)
- Minimum
- Maximum
- Anteil ÜHV ≤1,50 m
- Anzahl n der jeweiligen Stichprobe

Zudem wird untersucht, ob die Messdaten für alle Szenarien jeweils normalverteilt sind. Diese Auswertung erfolgt mit Jamovi und findet sich ebenfalls im Anhang D.1.

Boxplot-Diagramme

Boxplot-Diagramme veranschaulichen die Lage und Verteilung von den Messwerten und erlauben erste Vergleiche zwischen den Szenarien. Es werden der Median, das 25-Prozent-Quartil, das 75-Prozent-Quartil sowie Ausreißer dargestellt (vgl. Abbildung 27). Ausreißer sind Werte, die den Interquartilsabstand (entspricht Höhe der blauen Box in Abbildung 27) um das 1,5-fache über- beziehungsweise unterschreiten.[192]

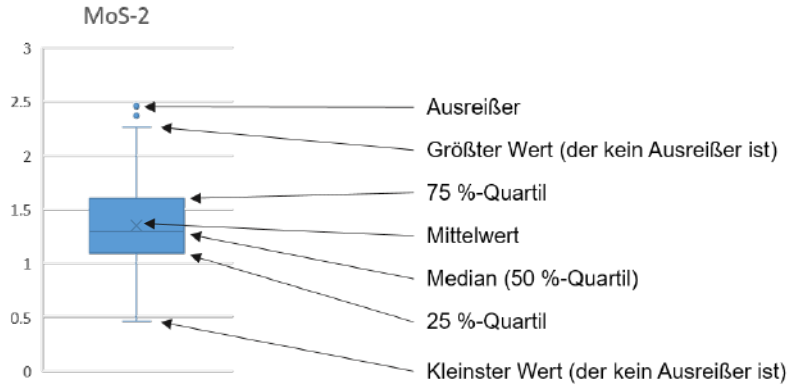


Abbildung 27 Ablesbare Kenngrößen aus Boxplot-Diagramm[193]

[192] Brosius 2019, S. 403f.
[193] Eigene Darstellung nach ebd., S. 403f.

Varianzanalyse

Varianzanalysen dienen der Überprüfung von möglichen Unterschieden zwischen Gruppen verschiedener Merkmalsausprägungen beziehungsweise Szenarien.[194] Sind die Daten normalverteilt, erfolgt die Überprüfung mit einer parametrischen ANOVA (analysis of variance[195]), die es erlaubt, mehr als zwei Gruppen miteinander zu vergleichen. Wenn die Daten nicht normalverteilt sind, wird alternativ eine nicht-parametrische ANOVA, in diesem Fall der Kruskal-Wallis-Test, durchgeführt.[196] In beiden Fällen ist die Nullhypothese, dass die Mittelwerte der Szenarien gleich sind. Wird diese abgelehnt, weil der mit Jamovi ermittelte p-Wert kleiner als α ist, muss geprüft werden, zwischen welchen Gruppen signifikante Unterschiede vorliegen. Dies erfolgt mit Post-hoc-Tests in Jamovi, die die Szenarien paarweise vergleichen. Auch hier gilt, dass die Nullhypothese angenommen wird, wenn der p-Wert größer α ist.[197]

5.2 Fehlerdokumentation

Feldversuch

Eine Herausforderung bei den Erhebungsfahrten war die Wartezeit, bis das GPS eine ausreichende Anzahl Satelliten (mindestens vier) gefunden hatte, was im Schnitt 18 Minuten dauerte. Erfahrungsberichten zur Folge soll sich diese Wartezeit in nachfolgenden Firmware-Versionen des Sensors reduzieren.[198] Bei der Auswertung zeigte sich zudem, dass die GPS-Daten teilweise deutlich von der tatsächlich gefahrenen Route abwichen (vgl. Abbildung 26), dies ist bei der Auswertung zu berücksichtigen und verhindert, dass beispielsweise fahrstreifenfeine Rückschlüsse getroffen werden können.

Auf der Berkaer Straße in Richtung Friedhof (süd-westliche Richtung) auf Höhe der Einmündung der Bauhausstraße kam es wiederholt zu Phantommessungen, das heißt es wurde ein ÜHA gemessen, ohne dass sich ein Objekt in Reichweite des Sensors befand. War dies der Fall, wurden in dem betroffenen Abschnitt keine ÜHV bestätigt, auch wenn ÜHV stattfanden. Die Ursache für die Phantommessungen, die nur an dieser Stelle stattfanden und lediglich unregelmäßig auftraten, ließ sich nicht identifizieren.

Außerdem gab es drei Situationen, in denen der Pkw jeweils mit mehr als 3,20 Metern Abstand überholte, sodass er nicht durch den OBS erfasst wurde. Da bei der Auswertung vor allem

---

[194] Handl und Kuhlenkasper 2017, S. 329.
[195] Ebd., S. 337.
[196] Ebd., S. 339.
[197] Jamovi 2021.
[198] Slack (13.6.2021 #kommunikation_obs-twitter).

Mittelwerte betrachtet werden, ist der Einfluss dieser fehlenden Werte als gering einzuschätzen.

Nach Aufschrauben des Sensors und dem Abruf der Rohdaten fehlt die erste Routenaufzeichnung vom 3.6.2021 vormittags. Eine mögliche Erklärung ist, dass der Sensor ohne Betätigen des roten Druckknopfs ausgeschaltet worden ist und daher nichts gespeichert wurde. Am 19.7.2021 wurde diese Messfahrt daher wiederholt. Da nicht für alle Szenarien ausreichend ÜHV vorlagen, wurde am 21.7.2021 zudem eine weitere Messfahrt durchgeführt.

Datenauswertung

Die Auswertung der Daten erfolgte wie bereits beschrieben mithilfe von Microsoft Excel, Jamovi, QGIS sowie von der OpenBikeSensor Community bereitgestellten Skripten.

Beim Durchlaufen der Skripte gibt es für die Datei vom 1.7.2021 den Fehler „`must be real number, not NoneType`“ (vgl. Abbildung 28). Dadurch konnte keine `.json`-Datei für den Export in QGIS erstellt werden und daher wurde dieser Tag nicht in der Auswertung betrachtet.

```
PS C:\Users\wmros> cd .\Desktop\
PS C:\Users\wmros\Desktop> python .\OpenBikeSensor-Scripts-main\obs\bin\obs_face.py -ACV
C:\Users\wmros\AppData\Local\Packages\PythonSoftwareFoundation.Python.3.9_qbz5n2kfra8p0\L
stime\leaps.py:110: RuntimeWarning: Leap second data is expired.
  warnings.warn("Leap second data is expired.", RuntimeWarning)
2021-08-02 17:03:11 __main__ INFO Loading OpenStreetMap data
2021-08-02 17:03:11 __main__ INFO Collecting datasets
2021-08-02 17:03:11 __main__ INFO Annotating and filtering CSV files
2021-08-02 17:03:11 __main__ INFO annotating datasets
Traceback (most recent call last):
  File "C:\Users\wmros\Desktop\OpenBikeSensor-Scripts-main\obs\bin\obs_face.py", line 437
    main()
  File "C:\Users\wmros\Desktop\OpenBikeSensor-Scripts-main\obs\bin\obs_face.py", line 368
    measurements, statistics = process_datasets(datasets, args.path_annotated, map_source
  File "C:\Users\wmros\Desktop\OpenBikeSensor-Scripts-main\obs\bin\obs_face.py", line 156
    dummy_process.dequeue_and_process()
  File "C:\Users\wmros\Desktop\OpenBikeSensor-Scripts-main\obs\bin\obs_face.py", line 209
    measurements = self.annotate(dataset)
  File "C:\Users\wmros\Desktop\OpenBikeSensor-Scripts-main\obs\bin\obs_face.py", line 240
    measurements = self.annotator.annotate(measurements)
  File "c:\users\wmros\desktop\openbikesensor-scripts-main\obs\face\annotate\AnnotateMeas
    self.ensure_map_coverage(measurements)
  File "c:\users\wmros\desktop\openbikesensor-scripts-main\obs\face\annotate\AnnotateMeas
    self.map_source.ensure_coverage(lat, lon, extend=self.point_way_tolerance)
  File "c:\users\wmros\desktop\openbikesensor-scripts-main\obs\face\osm\DataSource.py", 1
    tiles = self.tile_source.get_required_tiles(lat, lon, self.tile_zoom, extend=extend)
  File "c:\users\wmros\desktop\openbikesensor-scripts-main\obs\face\osm\TileSource.py", 1
    s_lat, s_lon = LocalMap.get_scale_at(lat[i], lon[i])
  File "c:\users\wmros\desktop\openbikesensor-scripts-main\obs\face\mapping\LocalMap.py",
    s_lon = s_lat / math.cos(math.radians(lat))
TypeError: must be real number, not NoneType
```

Abbildung 28 Ausschluss der Erhebung vom 1.7.2021 wegen Fehlermeldung

Im Rahmen der Auswertung fand eine manuelle Plausibilisierung der Daten statt, nachdem der gemessene ÜHA mit der Breite des Außenspiegels und des halben Fahrradlenkers belegt wurde. Dabei fällt beim Szenario MmS+3 sowie RFS+3 jeweils ein Wert auf, der unter Berücksichtigung dieser Lenker- und Spiegelbreiten negativ wird (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12 Fehlerhafte Messwerte: Netto-ÜHA negativ

Tag	ÜHA [m]	Confirmed	Szenario	Netto-ÜHA [m]
07.06.2021, 07:31	0.43	TRUE	MmS+3	-0.02
21.07.2021, 09:33	0.34	TRUE	RFS+3	-0.11

Auch unter Berücksichtigung der angenommenen Messabweichungen (vgl. Kapitel 4.3) handelt es sich offenbar um fehlerhafte Messwerte, da keine derart enge Überholung in diesen Situationen auffällig war. Inwieweit ausschließlich diese beiden Messwerte fehlerhaft sind, oder auf wie viele weitere Werte das zutrifft, lässt sich nicht beurteilen. Bei der Sensorvalidierung fielen keine fehlerhaften Messwerte auf.

5.3 Ergebnisse der Szenarien

Deskriptive Statistik

Insgesamt wurden n_{gesamt} = 1461 ÜHV an den Messstrecken aufgezeichnet, von denen 1459 ausgewertet werden. Im Mittel wurde mit $\overline{x}_{gesamt}$ = 1,27 Meter Abstand überholt, die Werte streuen um σ_{gesamt} = ± 0,40 Meter um den Mittelwert und rund 73 Prozent der Überholenden unterschritten den Mindestabstand von 1,50 Metern.

Von den 1459 ÜHV erfolgten 347 im Mischverkehr mit Schutzstreifen und Mittelmarkierung (Szenario MmS+), 393 im Mischverkehr ohne SSF, aber mit Mittelmarkierung (Szenario MoS+), 381 im Mischverkehr ohne SSF und ohne Mittelmarkierung (Szenario MoS-) sowie 338 auf Radfahrstreifen und vorhandener Mittelmarkierung (Szenario RFS+).

Tabelle 13 Mittelwert, Standardabweichung und Anzahl ÜHV der Szenarien

	Position 1	***Position 2***	***Position 3***
MmS+	$\overline{x}$ = 1,19 m σ = 0,31 m n = 97	$\overline{x}$ = 1,06 m σ = 0,36 m n = 140	$\overline{x}$ = 0,95 m σ = 0,33 m n = 110
MoS+	$\overline{x}$ = 1,27 m σ = 0,42 m n = 133	$\overline{x}$ = 1,26 m σ = 0,36 m n = 163	$\overline{x}$ = 1,25 m σ = 0,32 m n = 97
MoS-	$\overline{x}$ = 1,42 m σ = 0,41 m n = 135	$\overline{x}$ = 1,34 m σ = 0,40 m n = 137	$\overline{x}$ = 1,34 m σ = 0,37 m n = 109
RFS+	$\overline{x}$ = 1,68 m σ = 0,32 m n = 118	$\overline{x}$ = 1,34 m σ = 0,32 m n = 98	$\overline{x}$ = 1,10 m σ = 0,32 m n = 122

Zunächst ist zu erkennen, dass für alle Szenarien der ermittelte Mindeststichprobenumfang von n ≥ 92 überschritten wurde. Pro Szenario wurden zwischen 97 bis 163 ÜHV erfasst.

Es ist zu beachten, dass jeder Einzelmesswert einer angenommenen Unsicherheit von σ_x = ± 15 Zentimeter unterliegt. Damit schwankt die Abweichung einer Einzelmessung um den jeweils wahren Wert um σ_{wahr} = ± 1,5 Zentimeter für n = 97 und σ_{wahr} = ± 1,2 Zentimeter für n = 163 (sogenannter Stichprobenfehler). Die Berechnung erfolgt mit folgender Formel:[199]

[199] Dinter 2011, S. 7.

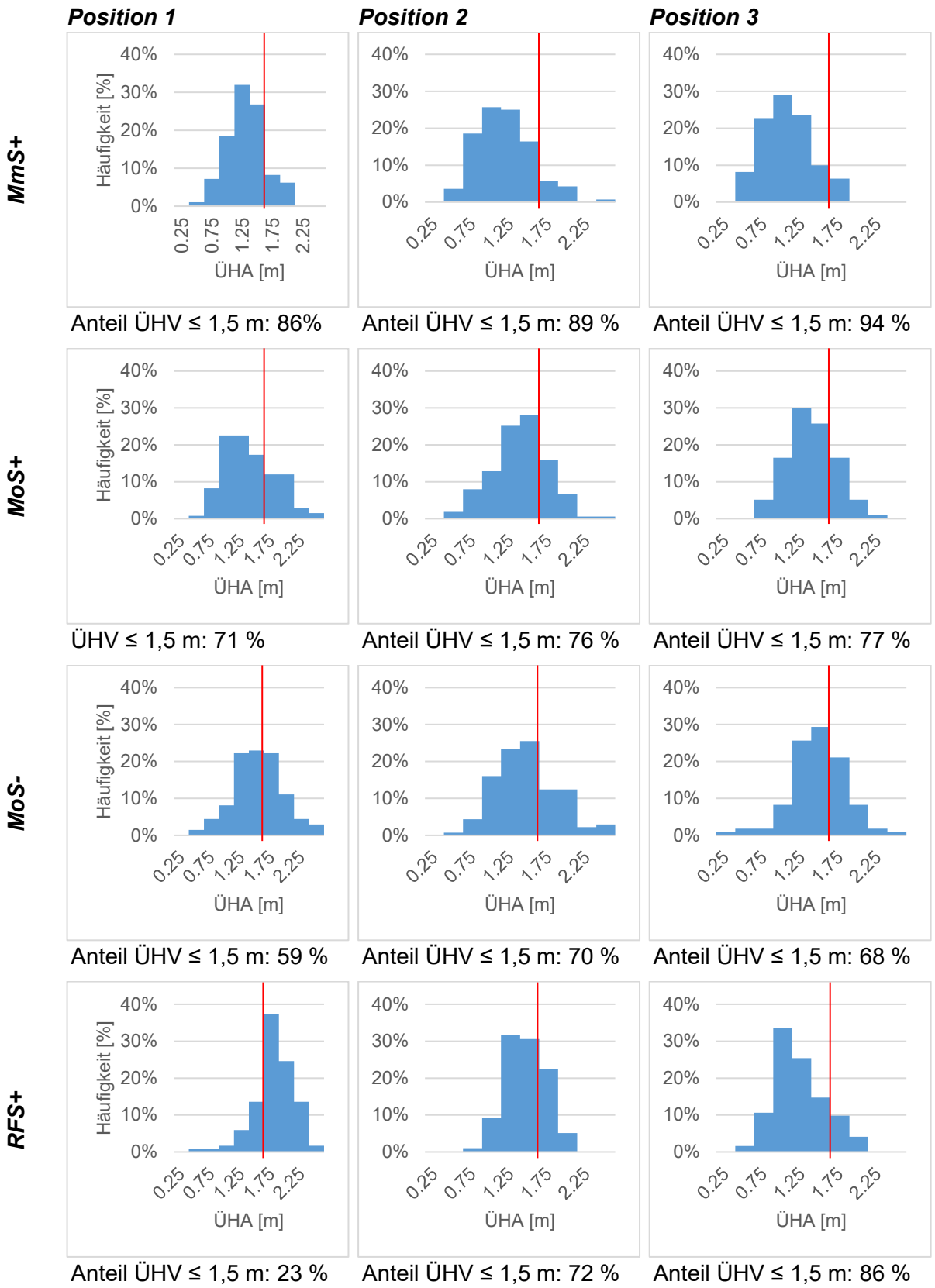
$$\sigma_{wahr} = \frac{1}{\sqrt{n}} * \sigma_x$$

mit

σ_{wahr}: Stichprobenfehler

σ_x: Standardabweichung Einzelmessung

Eine Aufbereitung der Daten als Histogramme findet sich in Abbildung 29. Hier werden für jedes untersuchte Szenario die relativen Häufigkeiten der eingehaltenen Abstände dargestellt und der Mindestüberholabstand von 1,50 Metern als rote Linie markiert. Die Mittelwerte der ÜHA aller Szenarien außer dem Szenario RFS+1 unterschreiten den Mindestüberholabstand von 1,50 Metern deutlich um im Mittel 0,27 Meter. Auf dem Radfahrstreifen wird der Mindestabstand eingehalten, wenn die Radfahrerin auf Position 1, also 0,30 bis 0,50 Meter vom rechten Fahrbahnrand entfernt, fährt. Hier liegt der Anteil der Fahrzeuge, die mit weniger als 1,50 Meter überholen bei 23 Prozent (vgl. Abbildung 29). Bei den übrigen Szenarien zeigt die Abbildung 29, dass ein Großteil der Kfz-Führenden mit weniger als 1,50 Meter Abstand überholt.



Rote Markierung: ÜHA ≤ 1,50 m

Abbildung 29 Histogramme der ÜHA aller Szenarien

Die Abbildung 30 visualisiert die ÜHA der Szenarien für Position 1 in einer Karte, auch hier ist zu erkennen, das ein Großteil der einzelnen ÜHV unter 1,50 Metern stattfand. Für die Positionen 2 und 3 findet sich die Karte in Anhang D.1.

Abbildung 30 Karte Messstrecken - ÜHA bei Position 2[200]

Boxplots

Den Boxplots in Abbildung 31 und Abbildung 32 kann entnommen werden, dass es Unterschiede zwischen den verschiedenen Radverkehrsführungsformen und Positionen auf der Straße gibt. Bei den markierten Radverkehrsführungsformen verringert sich der ÜHA, je weiter mittig die Radfahrerin auf der Fahrspur fährt (Abbildung 31). Die ANOVA im Anhang D.2 bestätigt den signifikanten Unterschied zwischen verschiedenen Positionen auf Schutz- und Radfahrstreifen. Abbildung 31 zeigt aber auch, dass im Mischverkehr ohne Schutzstreifen die Position der Radfahrerin auf der Straße keinen signifikanten Einfluss auf die Überholabstände hat (vgl. ANOVA im Anhang D.2). Im Szenario ohne Mittelmarkierung sind geringfügig höhere ÜHA als beim Querschnitt mit Mittelmarkierung zu erkennen. Die ANOVA bestätigt auch hier, dass es zwischen den beiden Szenarien signifikante Unterschiede gibt.

[200] Kartenbasis: OpenStreetMap 2021.

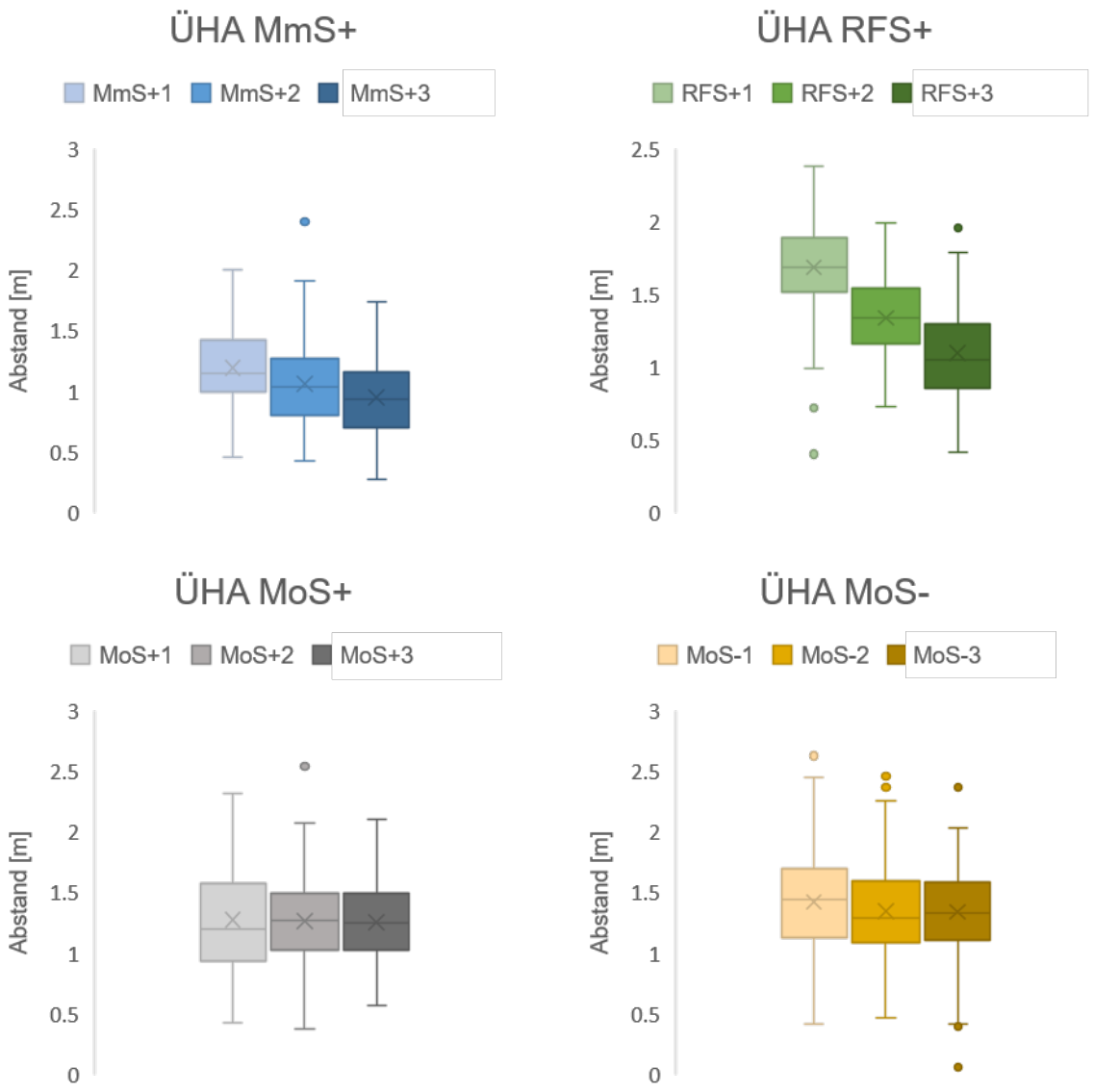


Abbildung 31 Boxplots ÜHA: Einfluss der Position der Radfahrerin bei den jeweiligen Radverkehrsführungsformen

Abbildung 32 zeigt die Unterschiede zwischen den verschiedenen Radverkehrsführungen bei der jeweiligen Position auf der Straße. Während bei der Position 1 beim Radfahrstreifen die größten ÜHA eingehalten werden, verändert sich dies je weiter rechts Rad gefahren wird. Bei Position 3 werden im Mischverkehr ohne Schutzstreifen die höchsten ÜHA eingehalten.

Bei der Position 1 ist außerdem der Wertebereich zwischen dem ersten und dritten Quartil bei den Führungsformen ohne markierte Radverkehrsführung größer als bei den markierten Radverkehrsführungen. Bei Position 3 sind dahingehend keine Unterschiede mehr erkennbar.

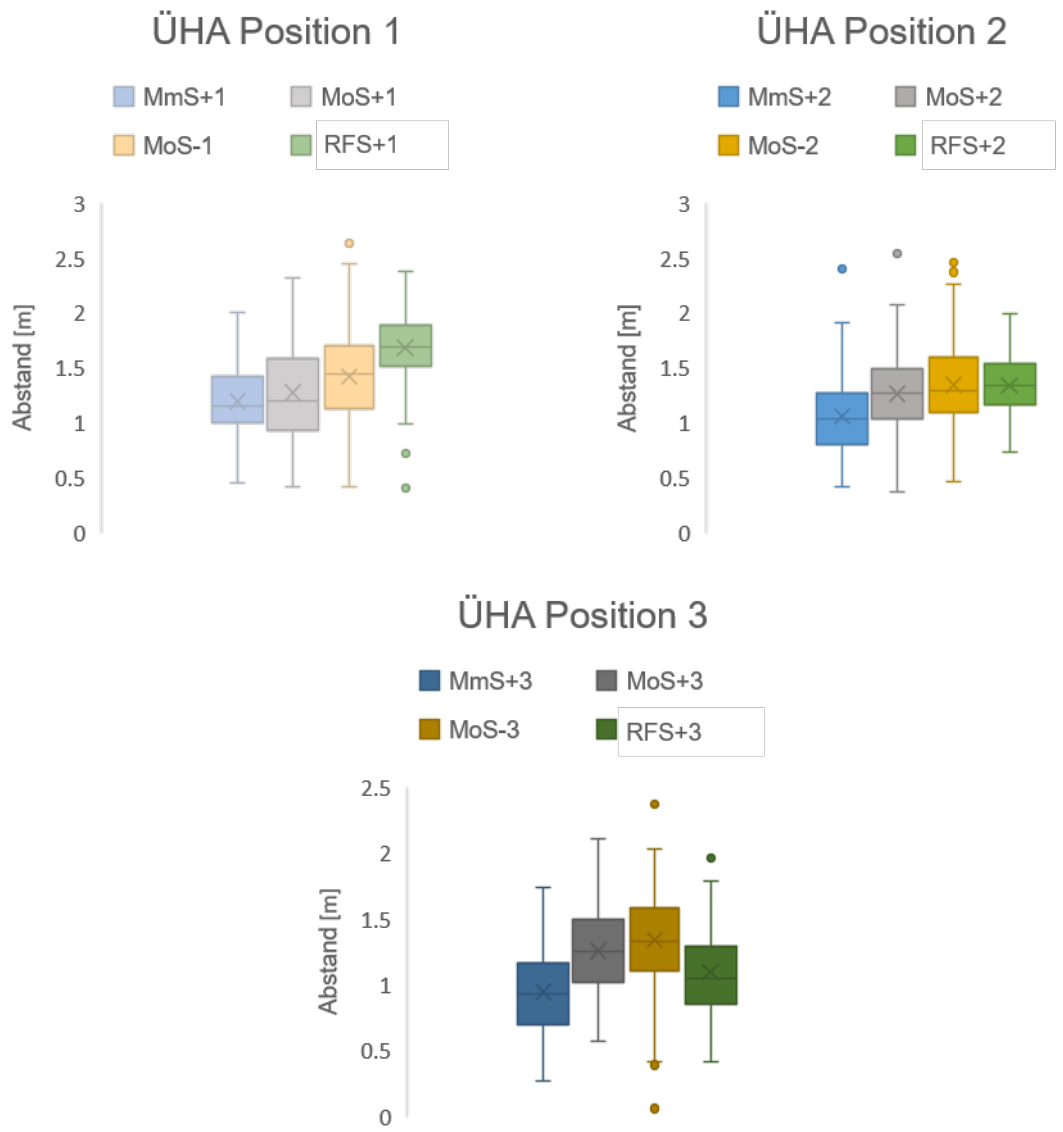


Abbildung 32 Boxplots ÜHA: Einfluss der unterschiedlichen Radverkehrsführungen je nach Position der Radfahrerin

Abbildung 33 zeigt die Anteile der ÜHV nach Abstandsklassen für den Mischverkehr ohne Schutzstreifen (vgl. Wertetabelle Anhang D.3). In Kombination mit den Boxplots in Abbildung 31 ist keine Zunahme der großen und kleinen ÜHA in Abhängigkeit der Position auf der Straße zu erkennen.

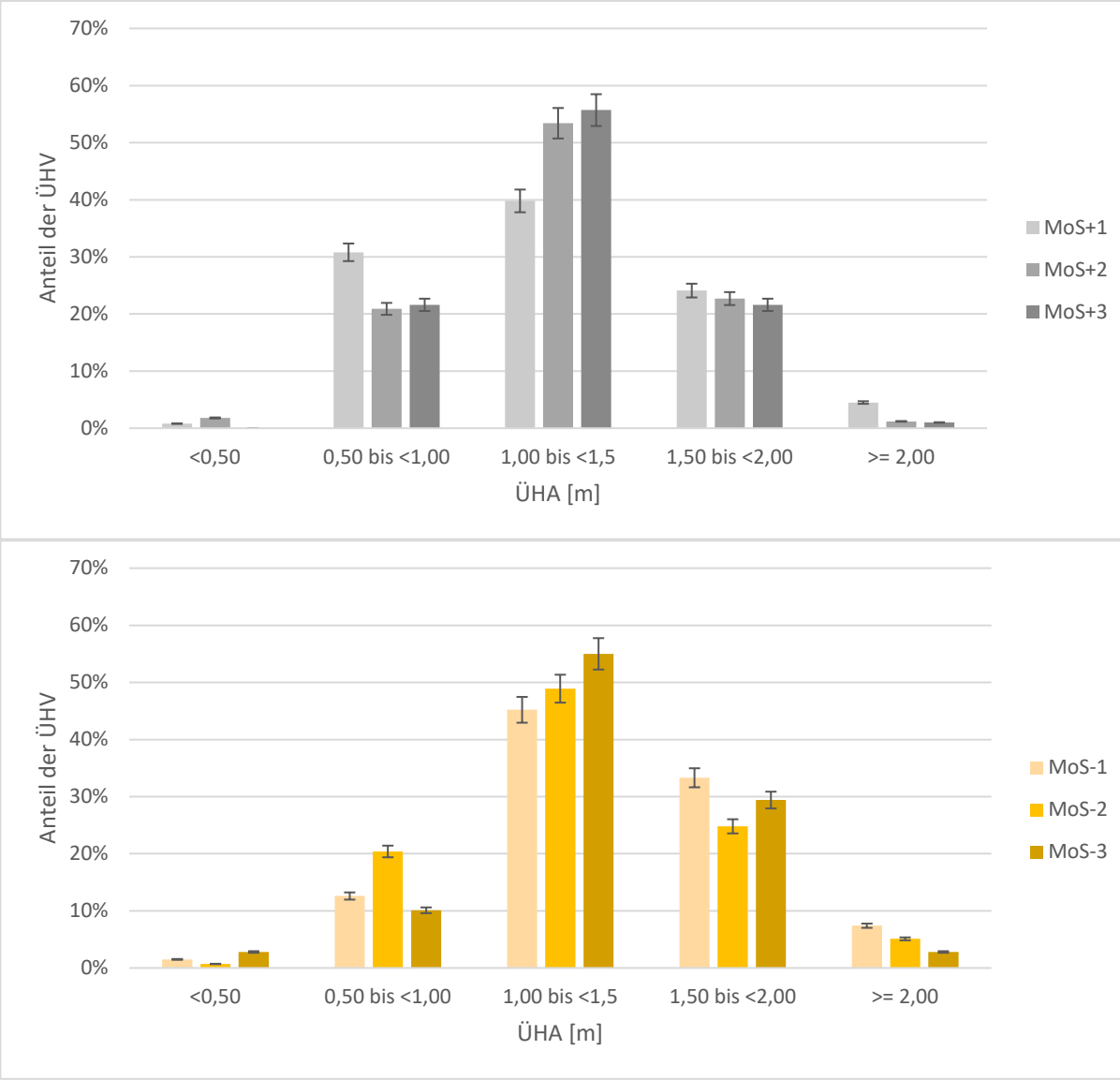


Abbildung 33 Histogramm der relativen Anteile der ÜHV nach Abstandsgruppe im Szenario MoS

5.4 Diskussion und Auswertung

Überprüfung der Hypothesen

Schutzstreifen führen zu geringeren ÜHA als RFS und Mischverkehr ohne SSF.

Die gemessenen ÜHA bestätigen die These, dass Schutzstreifen zu geringeren ÜHA als RFS und Mischverkehr ohne SSF führen. Im Szenario MoS+ wird im Durchschnitt mit 0,20 Meter mehr Abstand überholt, im Szenario MoS- sowie im Szenario RFS+ mit 0,30 Meter beziehungsweise 0,31 Meter mehr Abstand.

Der Abstand der Radfahrenden zum Bord beziehungsweise zu parkenden Fahrzeugen hat einen Einfluss auf ÜHA. Die mittleren ÜHA vergrößern sich im Mischverkehr ohne SSF, wenn weiter links gefahren wird, jedoch nimmt auch der Anteil besonders enger ÜHV zu.

Es lässt sich bestätigen, dass die Position der Radfahrenden einen Einfluss auf den ÜHA hat. Dies gilt jedoch nur für die Messstrecken mit markierter Radverkehrsführung. Im Mischverkehr ohne Schutzstreifen (MoS+, MoS-) lässt sich keine signifikante Veränderung der Mittelwerte bestätigen. Der Anteil besonders kleiner beziehungsweise großer ÜHV bei diesen Messstrecken steigt ebenfalls nicht, wenn weit links (Position 3) gefahren wird.

Bei markierten Radverkehrsführungen (RFS, SSF) kommt es dabei zum „Leitlinieneffekt“[201], *das heißt Kfz-Führende orientieren sich an den jeweiligen Markierungen und nicht an der Position der Radfahrenden auf der Straße, wodurch die mittleren ÜHA bei weiter links Radfahrenden sinken.*

Zwar sinken die mittleren ÜHA bei Radfahrenden, die auf Position 3 fahren. Allerdings wäre die Erwartung für einen stark ausgeprägten Leitlinieneffekt, dass der Abstand der Kfz zum Bord konstant bleibt, während der Abstand des Fahrrads zum Bord steigt. Beim RFS erkennt man eine Tendenz, dass der Abstand der Kfz zum Bord weniger stark steigt als beim Fahrrad (vgl. Steigung der Geraden in Abbildung 34). Auch beim Szenario MmS erhöht sich der Abstand der Kfz verhältnismäßig weniger als bei dem Fahrrad. Jedoch ist der Einfluss beim MmS schwächer ausgeprägt. Anhand der vorliegenden Daten kann der Leitlinieneffekt daher nicht bestätigt werden. Eine Tendenz dazu ist aber erkennbar.

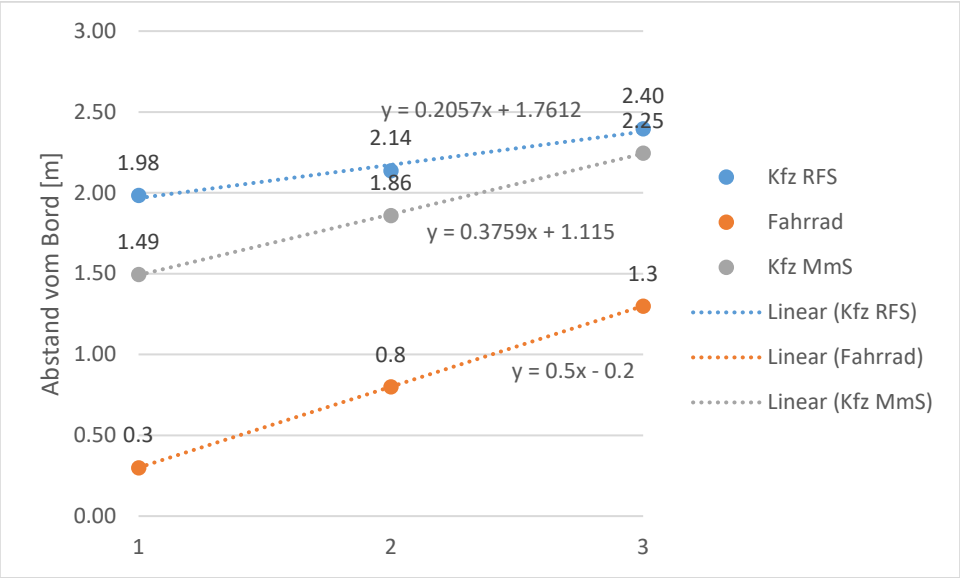


Abbildung 34 Zusammenhang zwischen Position Fahrrad und Position Kfz bei MmS und RFS

Bei Mischverkehr ohne SSF ohne Mittelmarkierung sind die ÜHA größer als bei Vorhandensein von Mittelmarkierungen.

[201] Ohm et al. 2015.

Die vierte Hypothese lässt sich bestätigen, im Schnitt wird im Szenario MoS- mit rund 10 Zentimeter mehr Abstand überholt, der Unterschied ist signifikant (vgl. Abbildung 35).

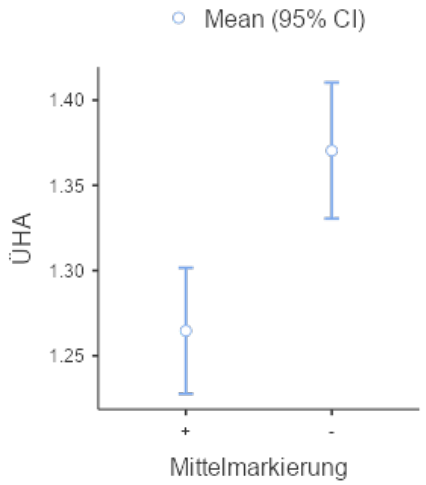


Abbildung 35 Vergleich ÜHA Szenario MoS mit und ohne Mittelmarkierung

Bei der Überprüfung der Hypothesen ist neben dem unbekannten Einfluss des Gegenverkehrs zu berücksichtigen, dass die Fahrbahnbreiten (vgl. Anhang A.2) auf den einzelnen Messquerschnitten nicht identisch sind. Um den Einfluss der Fahrbahnbreite zu eliminieren, wären Erhebungen auf mehreren Messtrecken mit jeweils gleicher Fahrbahnbreite erforderlich. So ist insbesondere beim Vergleich der RFS zu den SSF nicht auszuschließen, dass die Fahrbahnbreite einen größeren Einfluss als die Art der Markierung der RVA hat.

Einordnung der Ergebnisse

Den Einfluss der **Radverkehrsführung** wurde unter anderem von Kaulen et al. (2013), Richter (2019); Tagesspiegel Online (2018), und Ohm et al. (2015) (vgl. Kapitel 2.4.3: Tabelle 1, Tabelle 3) untersucht, die jeweils zu unterschiedlichen Ergebnissen kamen. Wie bei Ohm et al. (2015) wird auch in dieser Arbeit ein geringerer Abstand bei ÜHV im Mischverkehr mit Schutzstreifen zu der Situation Mischverkehr ohne Schutzstreifen festgestellt. Richter (2019) und Tagesspiegel Online (2018) stellten keinen Einfluss von Radfahr- oder Schutzstreifen auf ÜHA fest – solange kein Gegenverkehr vorhanden ist. Da in der vorliegenden Untersuchung der Gegenverkehr keine Berücksichtigung fand, kann nicht überprüft werden, inwiefern diese Aussage auch auf die vorliegenden ÜHV zutrifft. Dass bei Strecken mit Schutzstreifen mit geringfügig mehr Abstand überholt wird, als bei Strecken ohne Schutzstreifen, wie von Kaulen et al. (2013) ermittelt, lässt sich nicht bestätigen.

Bei der Betrachtung der **mittleren Leitlinie** kommen Huemer (2019), Richter (2019) sowie Kaulen et al. (2013) übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass sich die ÜHA bei vorhandener Leitlinie verringern. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Aussage nur für die Situation Mischverkehr ohne Schutzstreifen untersucht und deckt sich mit den genannten Studien.

Der Einfluss der **Position** von Radfahrenden wurde von Richter (2019) sowie dem Tagesspiegel Online 2018 untersucht. Wie bei Richter zeigt sich in der vorliegenden Arbeit, dass sich ÜHA verringern, wenn Radfahrende weiter links auf SSF oder RFS fahren. Dass Kfz mit größeren Abständen überholen, wenn Radfahrenden mit größerem Abstand von rechts parkenden Fahrzeugen verkehren, kann nicht bestätigt werden.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die vorliegende Studie bisherige Untersuchungen bestätigen kann und keine unerwarteten Ergebnisse produziert.

6 Zusammenfassung und Fazit

6.1 Zusammenfassung

Mit der StVO-Novelle im Jahr 2020 wird ein Mindestabstand beim innerörtlichen Überholen zwischen Kfz- und Radverkehr von 1,50 Metern gesetzlich festgelegt. Studien, die vor der StVO-Novelle durchgeführt wurden, zeigen, dass in der Regel mit geringeren Abständen überholt wird. Dabei beeinflussen eine Vielzahl von infrastrukturellen, das Fahrverhalten und -eigenschaften betreffende sowie umweltbedingte und verkehrliche Faktoren den Überholabstand. Enge Überholvorgänge haben insbesondere einen Einfluss auf das subjektive Sicherheitsempfinden und die Akzeptanz von Radverkehrsführungen auf der Fahrbahn.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen Überholabständen, Art der Radverkehrsführung sowie Position der Radfahrenden auf der Straße untersucht. Dafür kam der OpenBikeSensor zum Einsatz, der mit Ultraschalllaufzeitmessungen Abstände erfasst. Für die Untersuchung wurden Messstrecken definiert und der Sensor zusammengebaut. Anschließend folgte die Validierung des Sensors, die eine Messgenauigkeit von ± 1,5 Zentimetern ergab. Das Untersuchungsdesign führte zu weiteren Messungenauigkeiten in der Größenordnung von ± 15 Zentimetern für die Einzelmessungen. Es wurden zwölf Szenarien betrachtet, für die jeweils mindestens rund 90 Überholvorgänge erforderlich waren.

Dafür wurden mit einem Messfahrrad ausgewählte Messtrecken befahren und dabei jeweils systematisch der Abstand der Radfahrenden zum rechten Fahrbahnrand verändert.

Es zeigte sich, dass sowohl die Position der Radfahrenden als auch die Radverkehrsführung und das Vorhandensein einer Mittelmarkierung Einfluss auf ÜHA haben. Auf Strecken mit Schutzstreifen sind die ÜHA dabei am geringsten, auf Radfahrstreifen sind sie dann am höchsten, wenn weit rechts gefahren wird. Im Mischverkehr ohne SSF bleiben die ÜHA in etwa konstant im Bereich von 1,25 Meter bis 1,35 Meter unabhängig von der Position der Radfahrenden. Bei den markierten Radverkehrsführungen sinkt der Abstand mit zunehmender Entfernung zum rechten Fahrbahnrand. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass Einflussfaktoren wie der Gegenverkehr mit dem OBS nicht erfasst werden.

Insgesamt decken sich die Ergebnisse der vorliegenden Erhebung mit vorherigen Untersuchungen. Trotz der StVO-Novelle liegen die Abstände in der Praxis im Durchschnitt unter den geforderten 1,50 Metern.

6.2 Reflexion der Methodik und weiterer Forschungsbedarf

Für die vorliegende Untersuchung kam der OpenBikeSensor zum Einsatz. Dieser musste selbst zusammengebaut werden. Auch wenn dieser Schritt als anfänger:innentauglich eingestuft wird, ausführliche Anleitungen vorliegen und im Slack die Möglichkeit besteht,

Fragen zu stellen,[202] handelt es dennoch nicht um ein niederschwelliges Angebot. Die moderaten Investitionskosten müssen daher in Verhältnis zum Arbeitsaufwand gesetzt werden, der benötigt wird, bis der OBS fehlerfrei funktioniert. Das gilt nicht nur für die Hardware, sondern auch für die Software. Hier zeigt das Abschalten des Portals, welches zum Upload der Daten dient, dass man zu einem gewissen Grad abhängig von der Community ist, die hinter dem Projekt steht. Während das neue Portal aufgesetzt wird, können zwar weiterhin Messfahrten durchgeführt werden, ein Zugriff auf eigene Daten ist jedoch nur umständlich möglich. Abhilfe könnte hier ein anderes USB-C-Modul sein, das nicht nur das Laden, sondern auch den Datenaustausch erlaubt. Der Zugriff auf open data von anderen Radfahrenden ist nicht möglich. Für die Auswertung der eigenen Daten werden auf GitHub Skripte bereitgestellt, die übernehmen, was sonst beim Upload in das Portal erfolgt wäre. Da keine grafische Oberfläche zur Verwendung dieser Skripte existiert, sind auch hier grundlegende Programmierkenntnisse erforderlich, die dazu führen, die dazu führen, dass die Auswertung erhobener Messdaten auch hier mit fachspezifischen Hürden versehen ist.

Die Überholabstände werden vom OBS ausschließlich mit einem Ultraschallsensor erfasst, dessen Messgenauigkeit im Bereich von ± 1,5 Zentimetern liegt. Die Validierung des Sensors hat jedoch ergeben, dass die Winkelstellung vom überholten Fahrrad zum überholenden Kfz einen Einfluss von ±15 Zentimetern auf den gemessenen Abstand hat. Um die daraus resultierende Ungenauigkeit zu reduzieren, könnte eine andere Messanordnung helfen. Die Hochschule RheinMain arbeitet in dem Projekt „Sicher überholt!“ ebenfalls mit Ultraschallsensoren zur Erfassung von Messquerschnitten[203]. Im Vergleich zum OBS sind jedoch zwei Ultraschallsensoren zur Messung der ÜHA am Fahrrad montiert – einer an der Vorderachse, einer am Hinterbauausfallende oder am Gepäckträger. Beide Ultraschallsensoren geben für einen einzelnen ÜHV mehrere Messwerte aus. Diese werden in Form von zwei Kurven in einem Diagramm dargestellt, wobei das Minimum der beiden Messkurven den gewerteten ÜHA definiert. Einzelne Ausreißer in der Messung eines ÜHV durch Ausreißer können somit nicht zu einer Verfälschung der Daten beitragen. Zudem wird die Ungenauigkeit durch die Position der Fahrzeuge zueinander durch die Anbringung der beiden Sensoren mit möglichst großem Abstand am Fahrrad reduziert.[204] Die in Kapitel 4.5 festgestellte Problematik von unrealistischen (negativen) Messwerten könnte auf diese Weise ebenfalls verhindert werden. Auch eine Kalibrierung des Sensors mit mehreren Messungen pro Abstand sowie Messungen im fließenden Verkehr mit einem zweiten Sensor zur Erfassung der Abstände, würden genauere Aussagen über das Vorhandensein von Messfehlern ermöglichen.

---

[202] OpenBikeSensor-Community.
[203] Blees 2017.
[204] Werntges 2021.

Die Wartezeiten, bis der OBS seine GPS-Position ermittelt hat, lagen für die verwendete Firmware v0.5.531 im Durchschnitt bei 18 Minuten. Dies ist nicht praxistauglich, wenn es darum geht, alltägliche Wege hinsichtlich der ÜHA zu erfassen. Neuere Firmware-Versionen sollen kürzere Wartezeiten aufweisen. Dennoch ist zu prüfen, ob es sinnvoll ist, den OBS auf Positionsdaten vom Smartphone zugreifen zu lassen. Während damit alle Daten direkt in einem Gerät zusammenlaufen und kein mobiles Endgerät erfordern, wäre der Vorteil bei der Verbindung mit dem Smartphone, dass der OBS in andere Applikationen, wie die SimRa-App integriert werden könnte. Die hierzu erforderliche Bluetooth-Schnittstelle ist im OBS standardmäßig enthalten. Auch die Integration in die SimRa-App war und ist in einigen Firmware-Versionen möglich, war in der zum Zeitpunkt der Erhebung aktuellen und verwendeten Firmwareversion jedoch nicht vorgesehen[205].

Wie in Kapitel 3.1 erwähnt und in Kapitel 3.4 erläutert, können aufgrund der gewählten Untersuchungsmethodik verschiedene Einflussfaktoren nicht berücksichtigt werden. Dazu gehören der Einfluss von Gegenverkehr, Fahrzeugart, Kfz-Geschwindigkeiten und der Verkehrsstärke auf ÜHA. Aufgrund der in Kapitel 5.1 visualisierten GPS-Ungenauigkeiten wird zudem auf eine Auswertung der einzelnen ÜHV nach Kernfahrbahn- und – wenn vorhanden – Schutzstreifen beziehungsweise Radfahrstreifenbreite, verzichtet, da die Abweichungen der GPS-Daten keine derart präzise Zuordnung der Messwerte zu Abschnitten definierter Breite zulassen. Wie diese Einflussfaktoren die vorliegenden Ergebnisse beeinflussen, lässt sich daher nicht quantifizieren. In bisherigen Untersuchungen wird das Vorhandensein von Gegenverkehr als wichtigster Einflussfaktor für den ÜHA identifiziert. Es wird davon ausgegangen, dass dies auch in der vorliegenden Untersuchung der Fall ist. Sowohl zur Erfassung des Gegenverkehrs, als auch für die Ermittlung von weiteren Einflussfaktoren wie der Fahrzeugart und der Überprüfung der GPS-Position wäre eine Ergänzung des OBS um eine Kamera, die im Moment des Überholens auslöst, vorteilhaft.

Zudem lässt sich die Überholrate mit der gewählten Methodik nicht erfassen. Dabei wäre dies insbesondere beim Variieren der Position der Radfahrenden auf der Fahrbahn eine wichtige Einflussgröße, um zu erfassen, ob weniger Fahrzeuge überholen, wenn die Abstände nicht eingehalten werden können. Für die Auswertung der Überholrate könnte eine zusätzliche stationäre Video-Beobachtung der Messstrecken aus dem Seitenraum dienen, wie sie zum Beispiel bei Ohm et al. (2015)verwendet wurde. Diese Beobachtungen könnten zusätzlich dazu dienen, die Position der Radfahrenden auf der Straße zu erfassen, da bei größerer Anzahl von Proband:innen das Vorgehen, die Position auf der Straße mithilfe von Fixpunkten am Lenker zu bestimmen, umständlich und eine mögliche Fehlerquelle ist. Die Position auf der Straße könnte alternativ auch mit einem ausreichend starken Laser als Linie auf die Straße projiziert werden.

---

[205] Slack, #flurfunk_obs-simra.

Kaulen et al. (2013, S. 50) vermuten, dass gerade im innerstädtischen Bereich die Streckenlängen, die zum Überholen zur Verfügung stehen, Auswirkungen auf die Überholvorgänge haben. Welchen Einfluss die Länge der Untersuchungsabschnitte hat und auch, ob der Abstand der Knotenpunkte die ÜHV beeinflusst, lässt sich mit dem vorliegenden Untersuchungsdesign nicht feststellen. Dafür fehlen längere Vergleichsstrecken und Strecken mit größeren Knotenpunktabständen.

Bei der Literaturanalyse wurde außerdem eine größere Unfallhäufigkeit auf Schutzstreifen im Vergleich zu Radfahrstreifen festgestellt. Ob die geringeren ÜHA auf Schutzstreifen dies bedingen, lässt sich nicht feststellen, ist aber ein Hypothese, die mit gezielten Untersuchungen und größeren Untersuchungskollektiven überprüft werden könnte.

Insgesamt sind größere Proband:innenzahlen erforderlich, um die Komplexität der Wechselwirkungen, die ÜHA beeinflussen, genauer zu beschreiben – durch die oben genannten Beschränkungen sowie durch die Limitation auf ausgewählte Messstrecken in Weimar, die durch eine einzige Person befahren wurden, ist die Aussagekraft der vorliegenden Untersuchung begrenzt. Die vorliegende Arbeit liefert daher einen Anknüpfungspunkt, wie genau der OBS misst und zeigt, dass die Art der Radverkehrsführung sowie die Position auf der Straße einen Einfluss auf ÜHA haben. Der OBS selbst eignet sich dabei gut, um grundlegend zu identifizieren, wo welche Überholabstände eingehalten werden. Es würde helfen, viele Radverkehrsteilnehmende von der Nutzung des OBS zu überzeugen, um umfangreichere Datenbestände für spätere Auswertungen zu generieren. Für verkehrsplanerische Aufgabenstellungen, die eine detaillierte Analyse verschiedener Einflussfaktoren erfordern, bedarf es entweder der Ergänzung einer Kamera, die bei ÜHV Bilder aufnimmt, oder der Ergänzung der OBS-Messungen um weitere Feldversuche beispielsweise mit LiDAR oder mit Kamerabeobachtungen aus dem Seitenraum.

6.3 Handlungsempfehlungen und Ausblick

Im Folgenden wird diskutiert, wie Abstandsmessungen dazu führen können, dass der gesetzlich geforderte Mindestüberholabstand eingehalten wird und welche Chancen Open-Data-Ansätze bieten. Ob eine Art der Radverkehrsführungsform sinnvoller ist oder vermieden werden sollte, lässt sich aus dieser Untersuchung nicht ableiten, da weitere Faktoren wie die Breite, zum Beispiel des Schutzstreifens, eine Rolle spielen, die jedoch nicht erfasst wurden. Um aus Abstandmessungen aussagekräftige Rückschlüsse hinsichtlich bestimmter Radverkehrsführungsformen treffen zu können, sind größere Untersuchungskollektive, die Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren sowie, wenn möglich, Vorher-Nachher-Vergleiche bei Umgestaltung von Straßen oder Verkehrsversuchen erforderlich. In diesen Untersuchungen sollten ergänzend Pop-Up-Bikelanes berücksichtigt werden, die während der

Corona-Pandemie in verschiedenen Städten entstanden sind.[206] Außerdem sollte bei Schutzstreifen geprüft werden, inwiefern Sicherheitstrennstreifen zu parkenden Fahrzeugen dazu führen, dass sich Radfahrende außerhalb der Dooring-Zone bewegen und dennoch mit genügend Abstand überholt werden. Auch wenn die Untersuchung der objektiven Verkehrssicherheit Probleme insbesondere in Knotenpunktbereichen identifiziert, sollte mit umfangreicheren Untersuchungen überprüft werden, infrastrukturelle Veränderungen vorzunehmen, um den Trend, dass mehr Menschen das Fahrrad nutzen, zu beschleunigen, und auch die subjektive und gleichzeitig die objektive Sicherheit zu erhöhen.

Eine Empfehlung an Radfahrende zu ihrer Position auf der Straße ist nicht zweckmäßig. Durch die StVO und bisherige Rechtsprechungen besteht eine Empfehlung zum Fahren in circa 0,80 Meter bis 1,00 Meter Abstand nach rechts. Ausgehend von der Beobachtung, dass der ÜHA geringer wird, je mehr Abstand Radfahrende auf Schutz- oder Radfahrstreifen zum rechten Fahrbahnrand halten, sollte die Fragestellung bei vertiefenden Untersuchungen stattdessen sein, wie breit Schutz- und Radfahrstreifen markiert werden müssen, damit ÜHA eingehalten werden – unter Berücksichtigung der Akzeptanz durch Kfz-Fahrende.

Zur Durchsetzung der geforderten ÜHA können außerdem öffentlichkeitswirksame Kampagnen beitragen. Hier leisten Abstandsmessungen, die zu enge Überholvorgänge mess- und damit sichtbar machen, einen wichtigen Beitrag, um auf die Problematik aufmerksam zu machen. Ein gutes Beispiel ist hier Präsenz des Radmesserprojekts vom Tagesspiegel in der medialen Berichterstattung, aber auch die Kontrolle von Überholabständen durch die Polizei. In Hannover existiert in diesem Kontext eine Zusammenarbeit zwischen dem ADFC und der Stadt: Im Juni wurden 45 Radfahrende mit dem OBS ausgestattet, um ÜHV in der Region zu erfassen. Die Daten werden nun ausgewertet und dienen unter anderem der Identifizierung von kritischen Stellen für enge ÜHA. An diesen kritischen Stellen führen Ordnungsbehörden nachfolgend Kontrollen mittels Videoaufnahmen und Markierungen auf der Straße durch, wobei Verstöße entsprechend geahndet werden.[207] Statt dieses zweistufigen Mechanismus zur Ahndung von zu engen ÜHA sollte die Polizei mit einem geeichten Messgerät ausgestattet werden, um direkt ÜHA zu erfassen. In den USA wurden derartige Verfahren beispielsweise im Jahr 2015 getestet.[208]

Für wissenschaftliche Untersuchungen ist in diesem Kontext ist das Projekt SPACE2RIDE der TU Dresden zu erwähnen, das ab Juli 2021 bis Juni 2022 läuft. Basierend auf dem Radmesserprojekt vom Tagesspiegel wird ein Seitenabstandsmessgerät mit integrierter Kamera entwickelt. Ein Fokus liegt unter anderem auf der Frage, inwiefern sich die Sensordaten in das mCloud Datenökosystem des BMVI integrieren lassen und damit für die

[206] Kraus und Koch 2021, S. 1.
[207] Haase 2021.
[208] Farivar 2015.

Radverkehrsplanung zur Verfügung stehen.[209] Dafür gibt es vom BMVI die Förderrichtlinie mFund, die datenbasierte Projekte verschiedenster Initiativen finanziell fördert und Dateninfrastrukturen bereitstellt.[210] Bei dem OpenBikeSensor ist die Verbindung mit der SimRa-App eine erste Variante einer plattformübergreifenden Datenintegration, aber auch hier sollte die Bereitstellung der Daten innerhalb der mCloud und in europäischen Datenportalen wie dem CycleDataHub[211]untersucht werden. Denn einerseits hat die vorliegende Untersuchung gezeigt, dass größere Untersuchungskollektive für diverse Fragestellungen erforderlich sind. Andererseits existieren bereits Datenmengen, die jedoch auch zugänglich sein müssen, um in Wissenschaft, Verwaltung und Wirtschaft Anwendung zu finden.

Eine weitere Untersuchung sollte sich dem Potenzial der Kombination und Vernetzung verschiedener open data und open source Projekte widmen. Der OBS misst Überholabstände, die SimRa-App erkennt Gefahrenhäufungen, die als „Beinahe-Unfälle“ nicht in die Unfallstatistik einfließen.[212] Mit dem EmoCyclingConcept existiert ein Projekt, in dem mittels Humansensorik Häufungsstellen von Stresswahrnehmung durch Radfahrende erfasst werden.[213] Mit Telraam existiert außerdem eine auf Künstlicher Intelligenz basierende, datenschutzkonforme open data-Lösung zum Erfassen von Verkehrsstärken.[214] Zukünftige Studien sollten untersuchen, ob durch die beispielhaft genannten oder vergleichbare Projekte der wechselseitige Einfluss verschiedener Faktoren auf Überholvorgänge genauer beschreiben kann und damit modellierbar macht.

[209] Lißner 2021.
[210] BMVI 2021.
[211] BITS 2021.
[212] ECDF.
[213] Groß und Zeile 2016.
[214] Telraam 2021.

7 Literaturverzeichnis

ADFC (2021): ADFC-Fahrradklimatest 2020 Ergebnistabelle. URL: https://fahrradklima-test.adfc.de/fileadmin/BV/FKT/Download-Material/Ergebnisse_2020/ADFC-Fahrradklima-Test_2020_Ergebnistabelle_Druck_Gesamt_A3.pdf, Stand: 04.07.2021.

ADFC; Team Red (2020): Thüringer Ergebnisse des ADFC-Fahrradklima-Tests 2020. Weimar. URL: https://fkt.object-manager.com/data/2020/Weimar_16055000_FKT2020.pdf, Stand: 06.07.2021.

VwV-StVO, vom 22.05.2017 (26.01.2001): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung.

Alrutz, Dankmar (2009): Unfallrisiko und Regelakzeptanz von Fahrradfahrern. Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.262: Unfallrisiko, Konfliktpotenzial und Akzeptanz der Verkehrsregelungen von Fahrradfahrern (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik). Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss. URL: https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/191/file/V184.pdf, Stand: 15.03.2021.

Alrutz, Dankmar; Bohle, Wolfgang; Maier, Reinhold (2015): Einfluss von Radverkehrsaufkommen und Radverkehrsinfrastruktur auf das Unfallgeschehen (Nr. 29). Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft. URL: https://udv.de/de/publikationen/forschungsberichte/einfluss-radverkehrsaufkommen-und-radverkehrsinfrastruktur-das-unfallgeschehen, Stand: 04.07.2021.

Apasnore, Peter; Ismail, Karim; Kassim, Ali (2017): Bicycle-vehicle interactions at mid-sections of mixed traffic streets: Examining passing distance and bicycle comfort perception. In: Accident; analysis and prevention 106, S. 141–148.

Assembleia da República (03.09.2013): Código da Estrada Lei n.º 72/2013. In: Diário da República. URL: https://dre.pt/web/guest/legislacao-consolidada/-/lc/150109691/202106250709/73923970/diploma/indice?consolidacaoTag=Autom%C3%B3veis, Stand: 25.06.2021.

Beck, Ben; Chong, Derek; Olivier, Jake; Perkins, Monica et al. (2019): How much space do drivers provide when passing cyclists? Understanding the impact of motor vehicle and infrastructure characteristics on passing distance. In: Accident; analysis and prevention 128, S. 253–260. DOI: 10.1016/j.aap.2019.03.007.

Below, Ariane von (2016): Verkehrssicherheit von Radfahrern - Analyse sicherheitsrelevanter Motive, Einstellungen und Verhaltensweisen (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen M, Mensch und Sicherheit, Heft M 264). Bremen: Fachverlag NW. URL: https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/1626, Stand: 05.03.2021.

BGH, vom 10.01.1957. In: BeckRS 1957, 31191952.

Bicycle and Intelligent Transport Systems (BITS) (2021): CycleDataHub, Stand: 04.07.2021.

Bike Citizens Mobile Solutions GmbH: Bike Citizens. URL: https://www.bikecitizens.net/, Stand: 04.07.2021.

Blees, Volker (2017): „Sicher überholt!“ – Untersuchung des Überholvorgangs zwischen Auto Fahrenden und Rad Fahrenden. Hg. v. NRVP. URL: https://nationaler-radverkehrsplan.de/de/praxis/sicher-ueberholt-untersuchung-des-ueberholvorgangs, Stand: 25.06.2021.

BMVI (25.02.2020). Twitter. URL: https://twitter.com/BMVI/status/1232354304608043013, Stand: 07.07.2021.

BMVI (2021): mFund-Förderinformationen. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-foerderung.html, Stand: 30.07.2021.

Brosius, Felix (2019): SPSS.

Bulc (2017): Parliamentary Questions. Answer given by Ms Bulc on behalf of the Commission Question reference: E-002358/2017. E-002358/2017(ASW). Hg. v. Europäisches Parlament. URL: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-8-2017-002358-ASW_EN.html, Stand: 26.05.2021.

StVO, vom 24.01.2021 (06.07.1960): Bundesgesetz vom 6. Juli 1960, mit dem Vorschriften über die Straßenpolizei erlassen werden (Straßenverkehrsordnung 1960). Fundstelle: jusline.at. URL: https://www.jusline.at/gesetz/stvo/gesamt, Stand: 25.06.2021.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2018): RegioStaR. Regionalstatistische Raumtypologie für die Mobilitäts- und Verkehrsforschung. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/regiostar-raumtypologie.pdf?__blob=publicationFile, Stand: 07.07.2021.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2021): mCLOUD. URL: https://www.mcloud.de/, Stand: 04.07.2021.

Burger, Sheila; Mayer, Ernestine; Wannenmacher, Erwin; Salamon, Birgit et al. (2020): KFV - Sicher Leben #20. Dooring-Unfälle. Risiken des Radfahrens im Längsverkehrneben haltenden und parkenden Kfz - Eine Untersuchung verkehrstechnischer Lösungen. Hg. v. Kuratorium für Verkehrssicherheit (KFV). Wien. URL: https://radkompetenz.at/1701/studie-zur-dooring-gefahr-neben-parkenden-fahrzeugen/, Stand: 26.06.2021.

Chuang, Kai-Hsiang; Hsu, Chun-Chia; Lai, Ching-Huei; Doong, Ji-Liang et al. (2013): The use of a quasi-naturalistic riding method to investigate bicyclists' behaviors when motorists pass. In: Accident; analysis and prevention 56, S. 32–41. DOI: 10.1016/j.aap.2013.03.029.

Code de la route, vom 22.06.2003 (2003): Code de la route - Partie réglementaire (Articles R110-1 à R442-7) - Livre IV: L'usage des voies (Articles R411-1 à R422-7). URL:

https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074228/LEGISCTA000006129092/#LEGISCTA000006129092, Stand: 25.06.2021.

Department of Transport (01.10.2015): The Highway Code. Highway Code, vom 23.03.2021. URL: https://www.gov.uk/guidance/the-highway-code/using-the-road-159-to-203#overtaking-162-to-169#rule162, Stand: 25.06.2021.

Deutscher Verkehrssicherheitsrat (DVR) (27.04.2020): Das ändert sich mit der StVO-Novelle. Fohmann, Julia. URL: https://www.dvr.de/presse/pressemitteilungen/das-aendert-sich-mit-der-stvo-novelle, Stand: 21.06.2021.

Dinter, Ralf (2011): Fehlerrechnung für Einsteiger. Eine beispielorientierte Einführung für Studierende der TUHH. URL: https://www2.physnet.uni-hamburg.de/TUHH/Versuchsanleitung/Fehlerrechnung.pdf, Stand: 30.07.2021.

Dirección General de Tráfico (05.09.2006): Reglamento General de Circulación, vom 18.07.2015. URL: https://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/normativa-legislacion/reglamento-trafico/2015/reglamento_trafico184.pdf, Stand: 25.06.2021.

Dozza, Marco; Bianchi Piccinini, Giulio Francesco; Werneke, Julia (2016): Using naturalistic data to assess e-cyclist behavior.

Dozza, Marco; Fernandez, Andre (2014): Understanding Bicycle Dynmaics and Cyclist Behaviour From Naturalistic Field Data. November 2012 (IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 15).

Dozza, Marco; Schindler, Ron; Bianchi-Piccinini, Giulio; Karlsson, Johan (2015): How do drivers overtake cyclists? CHALMERS - University of Technology, Department of Applied Mechanics, Sweden. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457515301585, Stand: 30.07.2021.

Dunkel, Erhard; Bellmann, Anne; Harder, Raimo: Radverkehrskonzept Weimar 2030. Abschlussbericht Dezember 2017. URL: https://stadt.weimar.de/fileadmin/Civserv2/Anliegen/60.30/radverkehrskonzept_weimar_2030.pdf, Stand: 15.03.2021.

Einstein Center Digital Future (ECDF): SimRa: Sicherheit im Radverkehr. Unter Mitarbeit von David Bermbach. URL: https://www.digital-future.berlin/forschung/projekte/simra/, Stand: 04.07.2021.

Erdei, Elke-Henriette; Steinmann, Jochen; Hagemeister, Carmen (2020): Comparing perception of signals in different modalities during the cycling task: A field study. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 73, S. 259–270. DOI: 10.1016/j.trf.2020.06.011.

Erlemann, Kai (2007): Objektorientierte mikroskopische Verkehrsflusssimulation. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. URL: https://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/1435/file/diss.pdf, Stand: 13.07.2021.

Espressif Systems: ESP32 Series. Datasheet. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf, Stand: 10.07.2021.

Europäisches Parlament (2017): Parliamentary Questions. Subject: Minimum lateral clearance distance when passing cyclists. E-002358-17. URL: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-8-2017-002358_EN.html?redirect, Stand: 25.06.2021.

Farah, Haneen; Bianchi Piccinini, Giulio; Itoh, Makoto; Dozza, Marco (2019): Modelling overtaking strategy and lateral distance in car-to-cyclist overtaking on rural roads: A driving simulator experiment. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 63, S. 226–239. DOI: 10.1016/j.trf.2019.04.026.

Farivar, Cyrus (2015): Police use ultrasonic device to make sure drivers stay 3 feet from cyclists. Chattanooga Police now armed with custom-built device to teach drivers the law. In: ars technica. URL: https://arstechnica.com/tech-policy/2015/06/police-use-ultrasonic-device-to-make-sure-drivers-stay-3-feet-from-cyclists/, Stand: 30.07.2021.

Ferrer, Elionor (2021): Safe 1,5 m distance while overtaking cyclists approved in the Czech Parliament. URL: https://www.cyclurban.eu/safe-15-m-distance-while-overtaking-cyclists-approved-in-the-czech-parliament/, Stand: 25.06.2021.

FGSV (2006): Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Fundstelle: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik.

FGSV (2006): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen. RASt.

FGSV (2010): Empfehlungen für Radverkehrsanlagen. ERA.

FGSV (Januar 2012): Empfehungen für Verkehrserhebungen. EVE. Fundstelle: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik.

Gehlert, Tina; Kröling, Sophie (2020): Verkehrsklima in Deutschland 2020. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (Unfallforschung kompakt, 105). URL: https://udv.de/de/mensch/verkehrsklima/verkehrsklima-deutschland-2020, Stand: 04.07.2021.

Gerike, Regine; Hubrich, Stefan; Ließke, Frank; Wittig, Sebastian et al. (2020): Mobilitätssteckbrief für Weimar 2019. Mobilität in Städten - SrV 2018. TU Dresden. Dresden. URL: https://stadt.weimar.de/fileadmin/Civserv2/Anliegen/60.30/Weimar_2019_2_Steckbrief.pdf , Stand: 25.06.2021.

Gerike, Regine; Schmotz, Martin; Maier, Michael M.; Reinartz, Angelika (2019): Künftige Herausforderungen für den Entwurf von innerörtlichen Straßen, Fuß- und Radwegen. Schlussbericht. BMVI. URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjz8KTnmZryAhUJg_0HHV_WBcQQFnoECAUQAw&url=https%3A%2F%2Fmedia.frag-den-staat.de%2Ffiles%2Ffoi%2F576876%2F70.0926_Schlussbericht.pdf&usg=AOvVaw0qWGFhKaVVdkQKGn37N_tu, Stand: 21.06.2021.

Giancoli, DOuglas C. (2010): Physik. Pearson Deutschland GmbH. URL: https://books.google.de/books?id=bIlf3HCpDy8C&pg=PA561#v=onepage&q&f=false, Stand: 07.07.2021.

Gibson, James J.; Crooks, Laurence E. (1938): A Theoretical Field-Analysis of Automobile-Driving. In: The American Journal of Psychology 51 (3), S. 453.

Gion, Dirk; Haase, Daniel (2020): Experiment: Wie gefährlich ist Fahrradfahren im Stadtverkehr (Quarks), 10.12.2020. URL: https://www.ardmediathek.de/video/quarks/mehr-sicherheit-fuer-fahrradfahrer/wdr-fernsehen/Y3JpZDovL3dkci5kZS9CZWI0cmFnLTljNzI2MWE5LTFlNzgtNGRjNC05ZjYwLTMzYWU3YjYzYTMwNw/, Stand: 31.07.2021.

GoPro (2021): Kameras. URL: https://gopro.com/de/de/shop/cameras, Stand: 07.07.2021.

Groß, Dennis; Zeile, Peter (2016): EmoCyclingConcept – Potenziale der emotionalen Stadtkartierung. TU Kaiserslautern. URL: https://gispoint.de/fileadmin/user_upload/paper_gis_open/AGIT_2016/537622040.pdf, Stand: 30.07.2021.

Haase, Bernd (2021): Kontrolle in der List: Jeder zweite Autofahrer kommt Radlern zu nahe. In: Hannoversche Allgemeine Zeitung (HAZ). URL: https://www.haz.de/Hannover/Aus-der-Stadt/Kontrolle-in-Hanover-Jeder-zweite-Autofahrer-ueberholt-Radler-zu-dicht, Stand: 22.07.2021.

Handl, Andreas; Kuhlenkasper, Torben (2017): Multivariate Analysemethoden. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Harkey, David L.; Stewart, J. Richard (1997): Evaluation of Shared-Use Facilities for Bicycles and Motor Vehicles. In: Transportation Research Record 1578 (1), S. 111–118.

Hedderich, Jürgen; Sachs, Lothar (2016): Hypothesentest. In: Jürgen Hedderich und Lothar Sachs (Hg.): Angewandte Statistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 424–757.

Heinrich, Berthold; Linke, Petra; Glöckler, Michael (2020): Sensorik. In: Berthold Heinrich, Petra Linke und Michael Glöckler (Hg.): Grundlagen Automatisierung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 31–121.

Hering, Ekbert; Schönfelder, Gert (2018): Sensoren in Wissenschaft und Technik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Hon, Sarah (2007): Bikeways and Bike Collisions. How the Presence of Bikeways affect Bicycle-Motor Vehicle Collisions: A San Francisco Bay Area Case Study. URL: https://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2007final/Hon.pdf, Stand: 04.07.2021.

Huemer, A. K.; Strauß, F. M. (2021): Attitude vs. infrastructure: Influences on the intention to overtake bicycle riders. In: Transportation Research Interdisciplinary Perspectives 10.

Huemer, Anja Katharina (2019): Wie beeinflusst die Infrastruktur für Radfahrer das Überholverhalten von Autofahrern? Hg. v. TU Braunschweig. URL: https://www.adfc.de/fileadmin/user_upload/Im-Alltag/Fahrradklimatest/Download/2018/Fachveranstaltung_Vortrag_A.K.Huemer_TU_Braunschweig.pdf, Stand: 15.03.2021.

Jagusch, Heinrich; Hentschel, Peter (1995): Straßenverkehrsrecht. 33. Aufl. 5 Bände. München: C.H. Beck.

jamovi (2021). The jamovi project: The jamovi project. URL: https://www.jamovi.org, Stand: 19.07.2021.

Kaulen, Ralf; Reintjes, Matthias; Dudde, Christina (2013): Gutachten zum Einsatz und zur Wirkung von einseitigen, alternierenden und beidseitigen Schutzstreifen auf schmalen Fahrbahnen innerorts. Projektabschlussbericht. Hg. v. Stadt- und Verkehrsplanungsbüro Kaulen (SVK). Arbeitsgemeinschaft Fahrradfreundlicher Kommunen in Baden-Württemberg e.V. (AGFK-BW). Aachen/München. URL: https://www.agfk-bw.de/uploads/tx_news/SVK-AGFK-BW_Gutachten-Schutzstreifen_Langfassung_20131014.pdf, Stand: 03.03.2021.

Kettler, Dietmar (2013): Recht für Radfahrer. Ein Rechtsberater. 3., überarb., erw. und aktualisierte Aufl. Berlin: Rhombos. URL: https://docplayer.org/54128165-Recht-fuer-radfahrer-ein-rechtsberater-bearbeitet-von-dietmar-kettler.html, Stand: 25.06.2021.

Verkeersreglement, vom 14.02.2021 (01.12.1975): Koninklijk besluit van 1 december 1975 houdendealgemeen reglement op de politie van het wegverkeeren van het gebruik van de openbare weg“Verkeersreglement”. URL: https://wegcode.be/download/Verkeersreglement.pdf, Stand: 25.06.2021.

Koppers, Anne (2021): Piktogrammketten - Wirkung auf Fahrverhalten und Sicherheit. Bergische Universität Wuppertal. Web-Seminar.

Koppers, Anne; Ruf, Stefanie; Gerlach, Jürgen; Leven, Tanja et al. (2021): Radfahren bei beengten Verhältnissen – Wirkung von Piktogrammen und Hinweisschildern auf Fahrverhalten und Verkehrssicherheit. Abschlussbericht. URL: https://www.svpt.uni-wuppertal.de/de/home/forschung/projekte/radfahren-bei-beengten-verhaeltnissen.html, Stand: 28.06.2021.

Kovaceva, Jordanka; Nero, Gustav; Bärgman, Jonas; Dozza, Marco (2019): Drivers overtaking cyclists in the real-world: Evidence from a naturalistic driving study. In: Safety Science 119, S. 199–206.

Kraus, Sebastian; Koch, Nicolas (2021): Provisional COVID-19 infrastructure induces large, rapid increases in cycling. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 118 (15). URL: https://www.researchgate.net/publication/350477157_Provisional_COVID-19_infrastructure_induces_large_rapid_increases_in_cycling, Stand: 30.07.2021.

Kroll, Bonnie J.; Ramey, Melvin R. (1977): Effects of Bike Lanes on Driver and Bicyclist Behavior. In: Transp. Engrg. J. 103 (2), S. 243–256.

Küster, Dennis; Schering, Johannes; Janßen, Christian; Putze, Felix et al. (2020): Intelligente und aufmerksamkeitssensitive Systeme in der Fahrradmobilität. In: Alexandra Appel, Joachim Scheiner und Mathias Wilde (Hg.): Mobilität, Erreichbarkeit, Raum (Studien zur Mobilitäts- und Verkehrsforschung). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 143–158.

Langer, Ralf (2016): Seitlicher Überholabstand von Radfahrern durch den motorisierten Verkehr – Empirische Analyse mit Hilfe von Kameradaten. Diplomarbeit an der Professur für Verkehrsökologie. 6/2016. TU Dresden (Verkehrsökologische Schriftenreihe). URL: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-201073.

Leuw, Peter de (2013): Urteile zum Fahrrad- und Fußgängerverkehr. Seitenabstand/ Überholen. URL: https://pdeleuw.de/fahrrad/urteile.html#seitenabstand, Stand: 30.04.2021.

Li, You; Ibanez-Guzman, Javier (2020): Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems. In: IEEE Signal Process. Mag. 37 (4), S. 50–61. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9127855, Stand: 07.07.2021.

Lißner, Sven (2021): SPACE2RIDE. Hg. v. Professur für Verkehrsökologie. TU Dresden. URL: https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/voeko/forschung/forschungsprojekte/space2ride, Stand: 31.07.2021.

Llorca, Carlos; Angel-Domenech, Antonio; Agustin-Gomez, Fernando; Garcia, Alfredo (2017): Motor vehicles overtaking cyclists on two-lane rural roads: Analysis on speed and lateral clearance. In: Safety Science 92, S. 302–310. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925753515002921, Stand: 07.07.2021.

Love, David C.; Breaud, Autumn; Burns, Sean; Margulies, Jared et al. (2012): Is the three-foot bicycle passing law working in Baltimore, Maryland? In: Accident; analysis and prevention 48, S. 451–456.

MCC (2021): Corona-Krise zeigt: Mehr Radwege führen zu deutlich mehr Radverkehr. Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (Berliner Klimaforschungsinstitut MCC). URL: https://nationaler-radverkehrsplan.de/de/aktuell/nachrichten/corona-krise-zeigt-mehr-radwege-fuehren-zu, Stand: 30.07.2021.

Ministry of Transport, Public Works and Water Management (26.07.1990): Reglement verkeersregels en verkeerstekens 1990. RVV, vom 31.12.2020. URL: https://wetten.overheid.nl/BWBR0004825/2020-01-01, Stand: 25.06.2021.

Morrison, Christopher N.; Thompson, Jason; Kondo, Michelle C.; Beck, Ben (2019): On-road bicycle lane types, roadway characteristics, and risks for bicycle crashes. In: Accident; analysis and prevention 123, S. 123–131.

National Conference of State Legislatures (Hg.) (2021): Safely Passing Bicyclists Chart. USA. URL: https://www.ncsl.org/research/transportation/safely-passing-bicyclists.aspx, Stand: 25.06.2021.

Nobis, Claudia (2019): Mobilität in Deutschland - MiD. Analysen zum Radverkehr und Fußverkehr. im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. infas; DLR; IVT; infas 360. Bonn. URL: http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Analyse_zum_Rad_und_Fu%C3%9Fverkehr.pdf, Stand: 25.06.2021.

NRVP (16.03.2021): Ergebnisse des ADFC-Fahrradklima-Tests 2020 vorgestellt. Radfahrende in Deutschland vergeben die Note 3,9. URL: https://nationaler-radverkehrsplan.de/de/aktuell/nachrichten/ergebnisse-des-adfc-fahrradklima-tests-2020, Stand: 04.07.2021.

Ohm, Dirk; Fiedler, Frank; Zimmermann, Frank; Kraxenberger, Tobias et al. (2015): Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen. Bericht zum Forschungsprojekt: FE 77.0496/2010. Bremen (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik). URL: https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/1346, Stand: 05.03.2021.

OLG Frankfurt am Main, Beschluss vom 30.09.1980, Aktenzeichen 2 Ss 478/80.

OLG Hamm, Rechtssprechung vom 10.11.1992, Aktenzeichen 9 U 66/92. In: BeckRS 1992, 09381.

Olsen, Michael James (2013): Guidelines for the use of mobile LIDAR in transportation applications (NCHRP report, 748). Washington, D.C.: Transportation Research Board. URL: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_748.pdf, Stand: 07.07.2021.

OpenBikeSensor-Community: Häufig gestellte Fragen (FAQ). URL: https://www.openbikesensor.org/faq/, Stand: 04.07.2021.

OpenBikeSensor-Community: JSN-SR04T - All-in-one ultrasonic distance measurement instruction manual. Data sheet. URL: https://www.openbikesensor.org/docs/hardware/general/collective-order/jsn-sr04t-en.pdf, Stand: 10.07.2021.

OpenBikeSensor-Community: obs-face. OpenBikeSensor-Scripts. URL: https://github.com/openbikesensor/OpenBikeSensor-Scripts/blob/main/docs/obs-face.md, Stand: 17.07.2021.

OpenBikeSensor-Community: OpenBikeSensor Visualization. URL: https://github.com/openbikesensor/OpenBikeSensor-Scripts/blob/main/visualization/README.md, Stand: 17.07.2021.

OpenBikeSensor-Community (2021a): OpenBikeSensor. URL: https://www.openbikesensor.org/, Stand: 04.07.2021.

OpenBikeSensor-Community (2021b): Schnellstart-Anleitung OBS. URL: https://www.openbikesensor.org/docs/user-guide/quickstart/, Stand: 04.07.2021.

OpenBikeSensor-Community (2021c): OBSFirmware. Initial ESP flashing. URL: https://github.com/openbikesensor/OpenBikeSensorFirmware/blob/master/docs/software/firmware/initial_flash.md, Stand: 04.07.2021.

OpenBikeSensor-Community (2021d): OBS Portal. URL: https://openbikesensor.hlrs.de/.

OpenBikeSensor-Community (2021e): Bauanleitung für v00.03.12. URL: https://www.openbikesensor.org/docs/hardware/v00.03.12/build-instructions/, Stand: 04.07.2021.

OpenBikeSensor-Community (2021f): Bauteile für v.00.03.12. URL: https://www.openbikesensor.org/docs/hardware/v00.03.12/parts/, Stand: 04.07.2021.

OpenBikeSensorFirmware (2021). GitHub: OpenBikeSensor: OpenBikeSensor. URL: https://github.com/openbikesensor/OpenBikeSensorFirmware, Stand: 06.06.2021.

OpenStreetMap. Lizenz CC BY-SA 2.0 (2021). OpenStreetMap Mitwirkende: OpenStreetMap Mitwirkende. URL: https://www.openstreetmap.org/, Stand: 30.07.2021.

Papula, Lothar (2016): Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Parkin, John; Meyers, Ciaran (2010): The effect of cycle lanes on the proximity between motor traffic and cycle traffic. In: Accident; analysis and prevention 42 (1), S. 159–165.

Peters, Ervin (2011): Seitliche Sicherheitsabstände. Grundlagen und Strategien zur Verkehrssicherheitsarbeit. ADFC Weimar. URL: https://sichtfahrgebot.de/download/Seitenabstand.pdf, Stand: 28.04.2021.

Reutter, Thomas (2021a): Sicherheit im Radverkehr. Eng überholt statt ernst genommen. URL: https://www.tagesschau.de/inland/gesellschaft/radfahren-101.html?utm_source=pocket-newtab-global-de-DE, Stand: 30.07.2021.

Reutter, Thomas (2021b): Radfahrer werden an den Rand gedrängt. In: SWR. URL: https://www.swr.de/radfahren/besser-radfahren-im-suedwesten-106.html, Stand: 30.07.2021.

Richter, Thomas (Hg.) (2019): Sicherheit und Nutzbarkeit markierter Radverkehrsführungen. Unter Mitarbeit von Oliver Beyer, Jörg Ortlepp und Marcel Schreiber (Nr. 59). Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Unfallforschung der Versicherer. URL: https://udv.de/de/publikationen/forschungsberichte/sicherheit-und-nutzbarkeit-markierter-radverkehrsfuehrungen, Stand: 03.03.2021.

SA.GOV.AU (2017): Cyclist road rules and safety. Government of South Australia. URL: https://www.sa.gov.au/topics/driving-and-transport/cycling/cyclist-road-rules-and-safety, Stand: 25.06.2021.

Schlittgen, Rainer (2009): Multivarinate Statistik. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.

Schnabel, Werner; Lohse, Dieter; Lätzsch, Lothar (1997): Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. 2. Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen.

Schüller, Hagen; Niestegge, Miriam; Hantschel, Sebastian; Kühn, Benjamin et al. (2020): Akzeptanz und Verkehrssicherheit des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen. Schlussbericht. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Hg. v. PTV Transport Consult GmbH. Stuttgart/Dresden. URL: https://fops.de/wp-content/uploads/2021/02/70.0907_Schlussbericht_Mischverkehr.pdf, Stand: 21.06.2021.

Shapiro, S. S.; Wilk, M. B. (1965): An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). 52. Aufl. Biometrika (3/4). URL: https://www.jstor.org/stable/2333709?origin=JSTOR-pdf, Stand: 07.07.2021.

SINUS-Institut (2019): Fahrrad-Monitor Deutschland 2019. Ergebnisse einer repräsentativen Online-Befragung. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/fahrradmonitor-2019-ergebnisse.pdf?__blob=publicationFile, Stand: 04.07.2021.

SINUS-Institut (2021): Fahrrad-Monitor Deutschland Corona-Befragung 2020. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/fahrrad-monitor-deutschland-corona-befragung-2020.pdf?__blob=publicationFile, Stand: 30.07.2021.

Slack: OpenBikeSensor. URL: https://openbikesensor.slack.com, Stand: 04.07.2021.

Sonntag, Sebastian (2021): Radsicherheit: Abstandsmesser selber bauen. Unter Mitarbeit von Moritz Metz, 09.05.2021. URL: https://www.deutschlandfunknova.de/beitrag/radsicherheit-abstandsmesser-selber-bauen, Stand: 31.07.2021.

Stadtverwaltung Weimar (Hg.) (2008): Verkehrsentwicklungsplan. Fortschreibung 2008. Unter Mitarbeit von R+T Topp Huber-Erler Hagedorn und Verkehr 2000 Ahner + Münch.

URL: https://stadt.weimar.de/fileadmin/Civserv2/Anliegen/60.30/vep_abschlussbericht_dezember_2008.pdf, Stand: 15.03.2021.

Statista (2021): Entwicklung der Einwohnerzahl in Weimar (kreisfreie Stadt) von 1995 bis 2020. Statistisches Bundesamt (Destatis). URL: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/375299/umfrage/entwicklung-der-gesamtbevoelkerung-in-weimar/#professional, Stand: 07.07.2021.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2020): Verkehrsunfälle - Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr 2019. URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/unfaelle-zweirad-5462408197004.html, Stand: 04.07.2021.

StVO, vom 18.12.2020 (01.04.2013): Straßenverkehrs-Ordnung. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/StVO.pdf, Stand: 05.03.2021.

Szeiler, Michael; Skoric, Michael (2017): Unfalltyp Dooring. Erkenntnisse aus der Studie„Radfahren im Längsverkehr neben haltenden und parkenden Fahrzeugen“im Auftrag des Kuratoriums für Verkehrssicherheit (KFV). Österreich. URL: https://radkompetenz.at/wp-content/uploads/2017/06/20170427_KFV_Fachtagung_Dooring_Szeiler-Skoric_v2.pdf, Stand: 25.06.2021.

Tagesspiegel Online (2018): Radmesser. Gefahrengebiete. Auf diesen Straßen überholen Autofahrer Berlins Radfahrer am gefährlichsten. URL: https://interaktiv.tagesspiegel.de/radmesser/kapitel8.html, Stand: 04.07.2021.

Telraam (2021): TELRAAM. URL: https://telraam.net/en/what-is-telraam, Stand: 30.07.2021.

Thüringer OLG Jena, vom 28.10.2008, Aktenzeichen 5 U 596/06.

u-blox: NEO-6. u-blox 6 GPS Modules. Data sheet. URL: https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf, Stand: 10.07.2021.

Unfallforschung der Versicherer (UDV) (Hg.) (2018): Rechtsgutachten zu markierten Radverkehrsführungen. vorgelegt von Prof. Dr. jur. Dieter Müller. Unter Mitarbeit von Dieter Müller. Berlin. URL: https://udv.de/de/strasse/stadtstrasse/radverkehr/radfahrstreifen-und-schutzstreifen, Stand: 03.03.2021.

Urbanist Magazin (2014): Radfahren in der Fahrbahnmitte? Na klar! Oder: Wie viel Abstand muss ich als Radfahrer halten? (urbanist magazin). URL: https://www.urbanist-magazin.de/radfahren-in-der-fahrbahnmitte-na-klar/, Stand: 30.04.2021.

Voigt, Eric; Kremsreiter, Maria (2020): LiDAR in Anwendung. Chemnitz. URL: https://www.tu-chemnitz.de/physik/EXSE/ForPhySe/LiDAR_in_Anwendung.pdf, Stand: 07.07.2021.

Walker, Ian (2007): Drivers overtaking bicyclists: objective data on the effects of riding position, helmet use, vehicle type and apparent gender. In: Accident; analysis and prevention 39 (2), S. 417–425. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001457506001540.

Walker, Ian; Garrard, Ian; Jowitt, Felicity (2014): The influence of a bicycle commuter's appearance on drivers' overtaking proximities: an on-road test of bicyclist stereotypes, high-visibility clothing and safety aids in the United Kingdom. In: Accident; analysis and prevention 64, S. 69–77.

Werntges, Heinz (2021): "Sicher überholt!" - Projektergebnisse, 22.06.2021. Videokonferenz mit Wiebke Mros.

ZIV (2018): Zahlen-Daten-Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2017. ZIV Wirtschaftspressekonferenz. Ernst Brust. Berlin, 13.03.2018. URL: https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PK-2018_13-03-2018_Praesentation.pdf, Stand: 25.06.2021.

ZIV (2021): Zahlen, Daten, Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2020. Wirtschaftspressekonferenz Zweirad-Industrieverband (ZIV). Ernst Brust. Berlin, 10.03.2021. URL: https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PM_2021_10.03._ZIV-Praesentation_10.03.2021_mit_Text.pdf, Stand: 25.06.2021.

Verzeichnis der Anhänge

Anhang A LXXXVIII

A.1 Ursprüngliche Streckenauswahl LXXXVIII

A.2 Steckbriefe Messstrecken VII

Anhang B XIV

B.1 Sensorbau XIV

Anhang C XIX

C.1 Validierung Sensor XIX

C.2 Prüfung Normalverteilung zur Ermittlung der Stichprobengröße XXXIII

Anhang D XXXV

D.1 Deskriptive Statistik Ergebnisse XXXV

D.2 ANOVA XLII

D.3 Anteile ÜHV nach Abstandsklassen für Mischverkehr ohne Schutzstreifen L

D.4 Messdatensätze L

Anhang A

A.1 Ursprüngliche Streckenauswahl

Straße	Art der RVA[1]	Mittel-markierung	Baustelle [2]	Anzahl Fahrspuren[3]	Hauptverkehrs-/Verkehrs-/Sammelstraße[4]	Steigung/ Gefälle <3 %	Radhaupt-/-nebennetz[5]	Überholen möglich?[6]	Auswahl
Am Poseckschen Garten	MV ohne SSF	ja	nein	2	ja	ja	Ja	nein	nein
Bad Hersfelder Straße	MV ohne SSF	nein	nein	2	ja	ja	nein	nein	nein
Belvederer Allee	andere	ja	nein	2	ja	ja	Ja	ja	nein
Berkaer Straße zwischen Belvederer Allee und Rudolf-Breitscheid-straße	MV ohne SSF	ja	nein	2	ja	ja	Ja	ja	ja
Bodelschwinghstraße	MV ohne SSF	nein	nein	2	ja	ja	nein	ja	ja
Buttelstedter Straße	andere	ja	nein	2	ja	nein	Ja	ja	nein
Carl-August-Allee	MV ohne SSF	nein	nein	2	ja	nein	Ja	ja	nein
Coudraystraße	MV ohne SSF	nein	ja	2	ja	ja	nein	ja	nein
Erfurter Straße außerhalb Stadtring	RFS (2)	ja	nein	2	ja	ja	Ja	ja	ja
Erfurter Straße innerhalb Stadtring	MV ohne SSF	ja	ja	2	ja	ja	Ja	ja	nein
Ernst-Thälmann-Straße	MV mit SSF (2)	nein	nein	2	ja	nein	Ja	ja	nein
Ettersburger Straße	andere	ja	ja	2	ja	nein	Ja	ja	nein
Friedensstraße	MV ohne SSF	ja	ja	2	ja	ja	Ja	ja	nein
Friedrich-Ebert-Straße	MV mit SSF (2)	ja	nein	2	ja	nein	Ja	ja	nein
Fuldaer Straße	MV ohne SSF	ja	nein	2	ja	ja	nein	nein	nein
Goetheplatz	MV ohne SSF	ja	ja	2	ja	ja	Ja	ja	nein
Harry-Graf-Kessler-Str/Weimarplatz	MV ohne SSF	ja	nein	2	ja	ja	Ja	nein	nein
Heinrich-Heine-Straße	MV ohne SSF	ja	ja	2	ja	ja	Ja	ja	nein
Humboldt Straße	MV ohne SSF	ja	nein	2	ja	nein	Ja	ja	nein
Jenaer Straße	MV mit SSF (2)	ja	nein	2	ja	nein	Ja	ja	nein
Karl-Liebknecht-Straße	MV ohne SSF	ja	ja	2	ja	ja	Ja	ja	nein
Marienstraße	MV mit SSF (2)	ja	nein	2	ja	ja	Ja	ja	ja

Martin Luther Straße	MV ohne SSF	nein	nein	2	ja	nein	nein	ja	nein
Nordstraße	andere	ja	nein	2	ja	ja	Ja	ja	nein
Rießner Straße	RFS (1)	ja	nein	2	ja	ja	Ja	ja	nein
Rudolf-Breitscheid-Straße	MV ohne SSF	ja	nein	2	ja	ja	nein	ja	ja
Schopenhauer Straße	MV ohne SSF	nein	nein	2	nein	ja	nein	ja	nein
Schwanseestraße außerhalb Stadtring	andere	ja	nein	2	ja	ja	Ja	ja	nein
Schwanseestraße innerhalb Stadtring	MV mit SSF (1)	nein	nein	2	ja	ja	Ja	ja	nein
Steubenstraße (Gropiusstraße bis August-Frölich-Platz)	MV ohne SSF	nein	nein	2	nein	ja	Ja	nein	nein
Steubenstraße (Wielandplatz bis Gropiusstraße)	MV mit SSF (2)	ja	nein	2	ja	ja	Ja	ja	ja
Taubacher Straße	andere	ja	nein	2	ja	ja	Ja	ja	nein
Trierer Straße	MV ohne SSF	ja	nein	2	ja	ja	nein	nein	nein
Washington Straße (August-Frölich Platz bis Erfurter Straße)	MV ohne SSF	nein	ja	2	nein	ja	Ja	ja	nein

[1] (1) entspricht einseitiger RVA, (2) entspricht beidseitiger RVA

[2] Baustelle oder Baustelleneinzugsbereich und daher veränderte Verkehrsführung oder -mengen

[3] auf Strecke, das heißt ohne Aufstellstreifen an Knotenpunkte o.ä.

[4] basierend auf Verkehrsentwicklungsplan[215]

[5] gemäß[216]

[6] ausreichender Knotenpunktabstand, Sichtweiten ausreichend

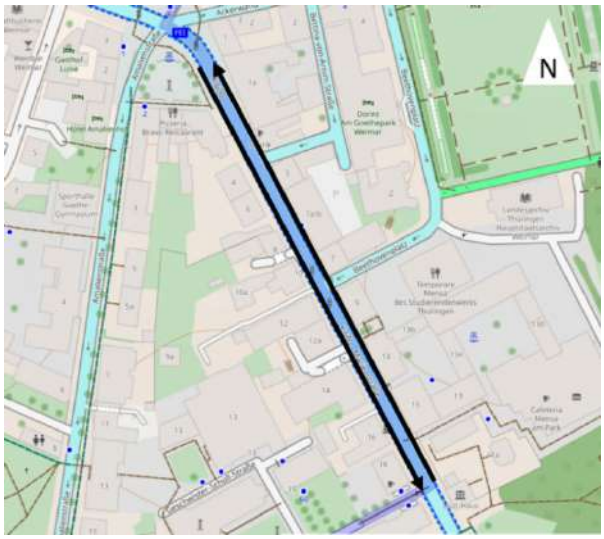
[215] Stadtverwaltung Weimar 2008.

[216] Dunkel et al.

A.2 Steckbriefe Messstrecken

Steckbriefe

Messstrecke Marienstraße[217]

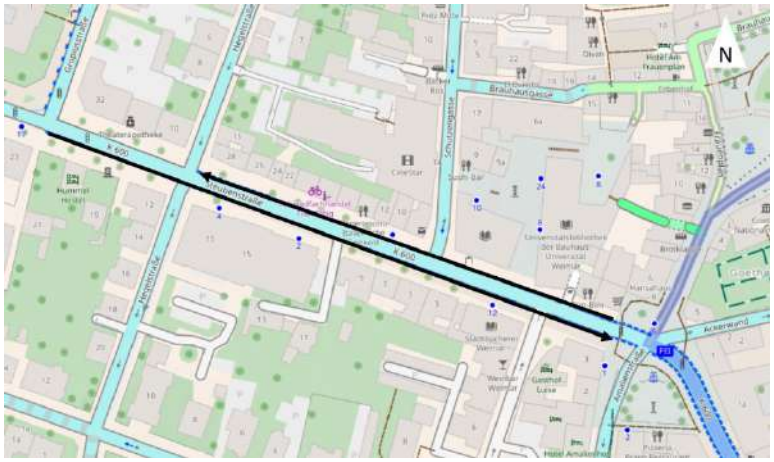


Typischer Querschnitt

Szenario MmS+	
Länge der Strecke	Jeweils 280 m
Anzahl Fahrstreifen	2
Mittelmarkierung	Vorhanden
Breite Kernfahrbahn	6,0 m
Breite Schutzstreifen (beidseitig)	1,3 m
Ruhender Verkehr	nein
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	30 km/h
Umfeldnutzung	Wohnnutzung und Universität
Längsneigung	< 3 %
Besonderheiten/Anmerkungen	Knotenpunkt Wielandplatz ausgenommen bei ÜHV wegen Fahrspuraufweitung und LSA ÜHV an LSA Marienstraßen nur bei fließendem Verkehr erfasst, Keine Rinne

[217] Kartenbasis: OpenStreetMap 2021.

Messstrecke Steubenstraße[218]



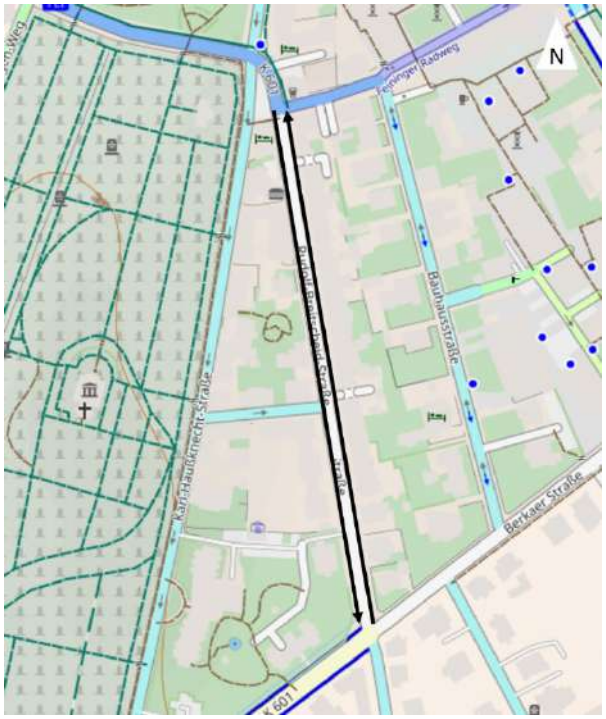
Typischer Querschnitt

Szenario MmS+

Länge der Strecke	290 m (2x)
Anzahl Fahrstreifen	2
Mittelmarkierung	Vorhanden
Breite Kernfahrbahn	7,00 m
Breite Schutzstreifen (beidseitig)	1,70 m
Ruhender Verkehr	Im Seitenraum, Längsparken
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	30 km/h
Umfeldnutzung	Vorrangig Mischnutzung
Längsneigung	0 %
Besonderheiten/Anmerkungen	Knotenpunkt Wielandplatz ausgenommen bei ÜHV, wegen Fahrspuraufweitung und LSA ÜHV an LSA Marienstraßen nur bei fließendem Verkehr erfasst Rinne

[218] Kartenbasis: OpenStreetMap 2021.

Messstrecke Steubenstraße[219]



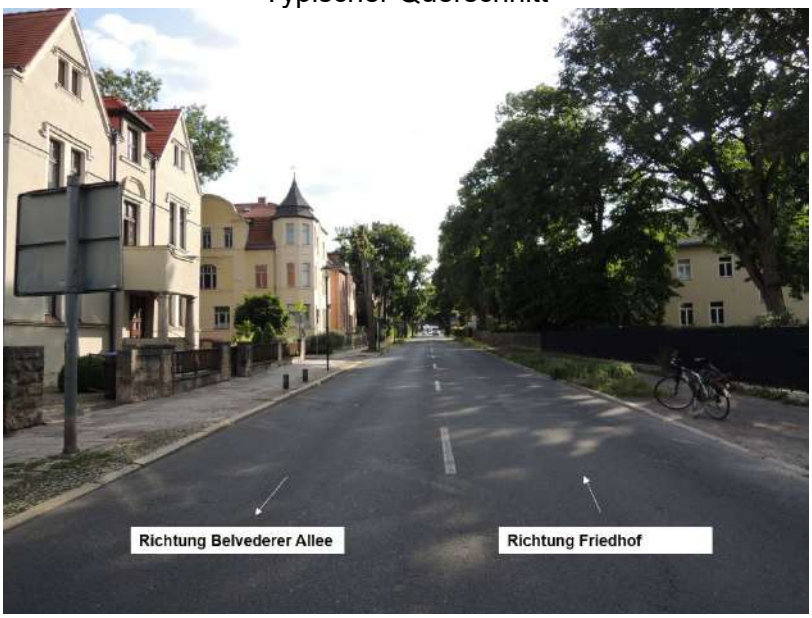
Typischer Querschnitt

Szenario MoS+	
Länge der Strecke	280 m (2x)
Anzahl Fahrstreifen	2
Mittelmarkierung	Vorhanden
Breite Kernfahrbahn	6,8 m
Breite RVA	Mischverkehr
Ruhender Verkehr	Einseitig auf Fahrbahn
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	50 km/h
Umfeldnutzung	Vorrangig Wohnnutzung
Längsneigung	1 %
Besonderheiten/Anmerkungen	Rinne

[219] Kartenbasis: OpenStreetMap 2021.

Messstrecke Berkaer Straße[220]

Typischer Querschnitt



Szenario MoS+	
Länge der Strecke	280 m (2x)
Anzahl Fahrstreifen	2
Mittelmarkierung	Vorhanden
Breite Kernfahrbahn	7,6 m
Breite RVA	Mischverkehr
Ruhender Verkehr	nein
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	50 km/h
Umfeldnutzung	vorrangig Wohnnutzung / Universität (einseitig)
Längsneigung	0 %
Besonderheiten/Anmerkungen	Keine Rinne

[220] Kartenbasis: OpenStreetMap 2021.

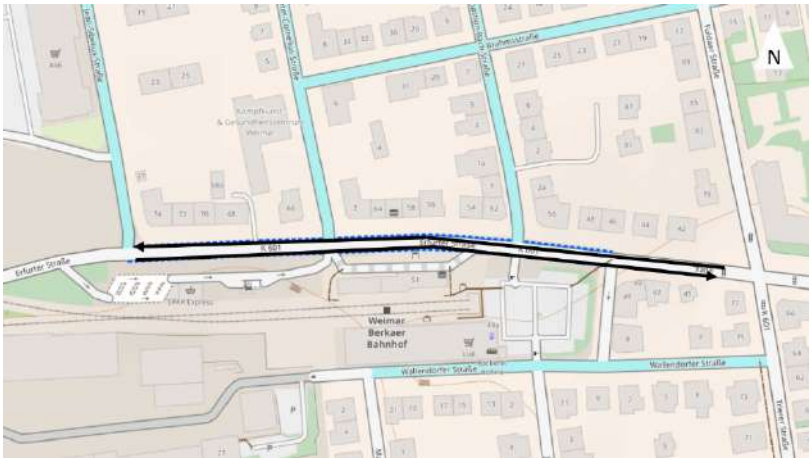
Messstrecke Belvederer Allee[221]

Typischer Querschnitt

Szenario MoS+	
Länge der Strecke	200 m (1x)
Anzahl Fahrstreifen	2
Mittelmarkierung	Vorhanden
Breite Kernfahrbahn	7,6 m
Breite RVA	Mischverkehr
Ruhender Verkehr	Nein
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	50 km/h
Umfeldnutzung	Freiland / Universität (einseitig)
Längsneigung	0 %
Besonderheiten/Anmerkungen	Parallel: Gehweg Fahrrad frei (in Richtung Marienstr.)

[221] Kartenbasis: OpenStreetMap 2021.

Messstrecke Erfurter Straße[222]

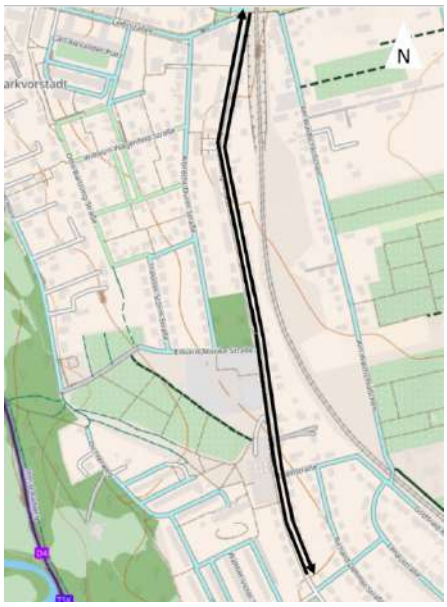


Typischer Querschnitt

Szenario RFS+	
Länge der Strecke	300 (2x)
Anzahl Fahrstreifen	2
Mittelmarkierung	Vorhanden
Breite Kernfahrbahn	11 m (direkt an KP Trierer/Fuldaer Str) 6,5 m ab Erfurter Str. 66 stadtauswärts
Breite Radfahrstreifen (beidseitig)	2,0 m (direkt an KP Trierer/Fuldaer Str) Verjüngend auf 1,8 m ab Erfurter Str. 66 stadtauswärts
Ruhender Verkehr	Einseitig (Schrägaufstellung)
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	50 km/h
Umfeldnutzung	Geschäftsnutzung / gewerbliche Nutzung, Wohnnutzung (gemischt)
Längsneigung	0 %
Besonderheiten/Anmerkungen	Aufstellstreifen zwischen Kp Trierer/Fuldaer Str auf Höhe Lidl, Querungshilfe Fußgänger (Mittelinsel) Höhe Erfurter Str. 66 (Berkaer Bahnhof)

[222] Kartenbasis: OpenStreetMap 2021.

Messstrecke Bodelschwinghstraße[223]



Typischer Querschnitt

Szenario MoS-	
Länge der Strecke	1000 m
Anzahl Fahrstreifen	2
Mittelmarkierung	Keine Mittelmarkierung
Breite Kernfahrbahn	6,5 m
Breite RVA	Mischverkehr ohne Schutzstreifen
Ruhender Verkehr	Teilweise im Seitenraum (Längsparken)
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	50 km/h (30 km/h)
Umfeldnutzung	Vorrangig Wohnnutzung, z.T. Freiraum, Geschäftsnutzung, Schule
Längsneigung	0 % (1,8 %)
Besonderheiten/Anmerkungen	Schule (dort vzul 30km/h), eine kleine, kurze (50m) Steigungsstrecke im Bereich 30 km/h; FGÜ Höhe Nahkauf

[223] Kartenbasis: OpenStreetMap 2021.

Anhang B

B.1 Sensorbau

Bauteilliste für v00.03.12[224]

	Menge	Bauteil
Module		
	1	ESP32-WROOM Development Board
	1	0.96-Zoll OLED Display
	1	USB-C Lademodul
	1	SD-Karten-Modul
	1	Buck-Boost Modul for LiPo, 3.3V
	1	18650 LiIon-Akku (mit Lötfahnen)
	1	SD-Karte
	1	GPS-NEO-6M Modul
	2	JSN-SR04T Sensormodule
Kleinteile		
	1	12mm Drucktaster
	1	Miniatur-Kippschalter
	Circa 2 m	Displaykabel
Steckverbinder		
	15	JST-XH Crimp-Kontakte (BXH-001T-P0.6)
	3	JST-XH Gehäuse 2-polig (XHP-2)
	2	JST-XH Platinenstecker 2-polig 90°
	1	JST-XH Gehäuse 4-polig (XHP-4)
	1	JST-XH Gehäuse 5-polig (XHP-5)
	1	JST-XH Platinenstecker 2-polig (B2B-XH-A)
	1	JST-XH Platinenstecker 5-polig (B5B-XH-A)
	1	Batteriekabel und Platinenstecker (gerade, 2-polig, mit rot-schwarzen Kabeln, 2.54mm RM)
	1	Winkelstiftleiste (mind. 10-polig, 2.54mm RM)
	1	Stiftleiste gerade (mind. 11-polig, 2.54mm RM)
	2	SMD-Buchsenleisten (15-polige, 2.54mm SMD, wechselseitig, BL LP 5 SMD) (15-polige Variante ist selten; 16-polige kann gekürzt werden)
Elektronische Bauelemente		
	1	Widerstand (THT) 10 kΩ, 250 mW, 5 %
	1	Widerstand (THT) 150 kΩ, 250 mW, 5 %
	1	Widerstand (THT) 300 kΩ, 250 mW, 5 %
	2	Widerstand (THT) 1.1 kΩ, 250 mW, 5 %

[224] **OpenBikeSensor-Community 2021f.**

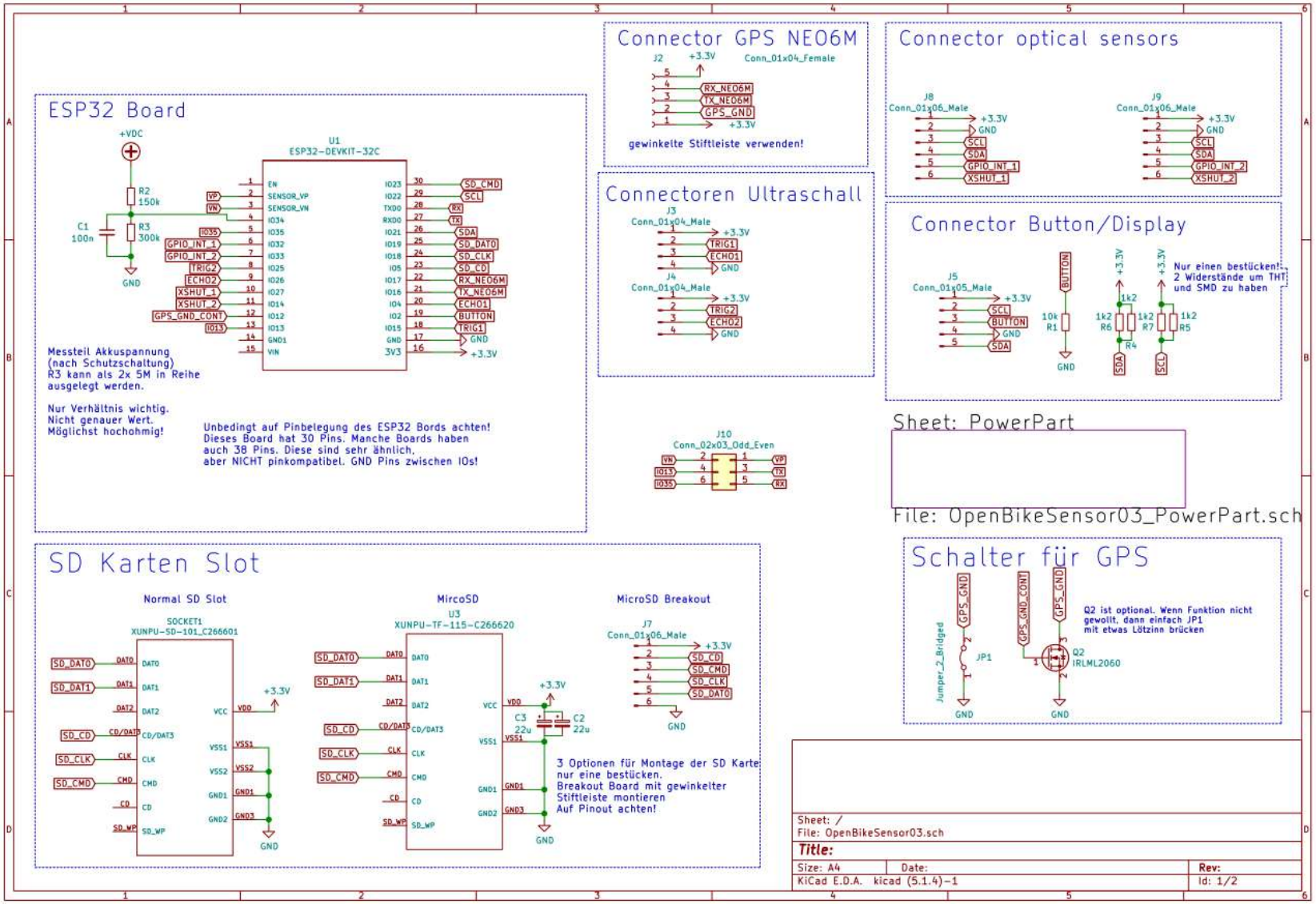
	1	Keramikkondensator 100 nF, 10 %
	2	Elektrolytkondensator, radial, 22 µF, 10 V, niedrige ESR
	1	Schottky-Diode, 60 V, 5 A, DO-201AD
	1	Rückstellende Sicherung, max. 40 A - 30 V, 6.6 sec, Typ PFRA, radiale Bauform
Mechanische Bauteile		
	4	Neodym-Magnete, 20x10x2mm
	4	Neodym-Magnete, 3x3x3mm
	19	M3x8mm Zylinderschraube mit Innensechskant (DIN912)
	1	M3x30mm Zylinderschraube mit Innensechskant (DIN912)
	6	M3 Mutter (DIN934)
	13	Gewindeeinsatz / Einpressmutter M3x5.7
Spezialanfertigungen		
	1	PCB v00.03.12
	1	Hauptgehäuse "Vertical Case"
	1	Display-Gehäuse "SlideOnDisplay"

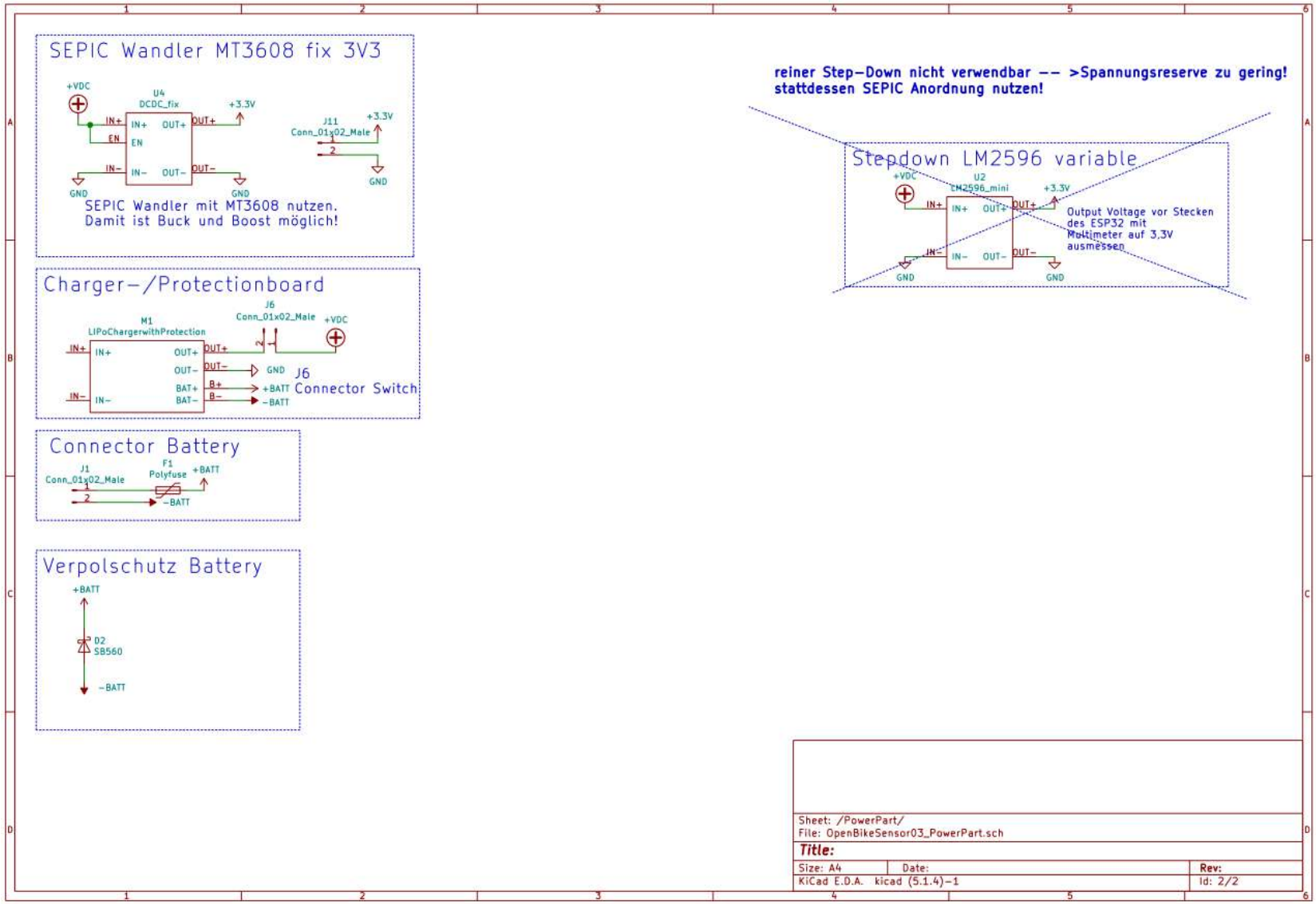
Übersicht Bauteilsatz

Schritte Zusammenbau Sensorhardware

Schritt 1: Buchsenleisten
Schritt 2: Spannungsregler (rot)
Schritt 3: Lademodul (blau)
Schritt 4: Widerstände
Schritt 5: Kondensatoren
Schritt 6: Lötpunkt / Brücke
Schritt 7: Stromversorgung
Schritt 8: Verbinder für Taster und Display
Schritt 9: Sensorboards
Schritt 10: SD-Modul
Schritt 11: GPS-Modul
Schritt 12: Ein/Aus-Schalter
Schritt 13: Ultraschallsensor-Kabel kürzen und crimpen
Schritt 14: Batteriekabel anlöten
Schritt 15: Gehäuse vorbereiten
Schritt 16: Display-Kabel
Schritt 17: Display Zusammenbau
Schritt 18: Elektronik testen
Schritt 19: Zusammenbau

Schaltplan OBS v03 https://raw.githubusercontent.com/openbikesensor/OpenBikeSensor_PCB_Board/merged/OpenBikeSensor03/generated/OpenBikeSensor_pcb_Schaltplan.pdf




SEPIC Wandler MT3608 fix 3V3
+VDC
U4
DCDC_fix
IN+
EN
IN−
OUT+
OUT−
+3.3V
J11
Conn_01x02_Male
GND
SEPIC Wandler mit MT3608 nutzen.
Damit ist Buck und Boost möglich!
reiner Step−Down nicht verwendbar −− >Spannungsreserve zu gering!
stattdessen SEPIC Anordnung nutzen!
Stepdown LM2596 variable
U2
LM2596_mini
Output Voltage vor Stecken
des ESP32 mit
Multimeter auf 3,3V
ausmessen
Charger−/Protectionboard
M1
LiPoChargerwithProtection
J6
Conn_01x02_Male
BAT+
BAT−
B+
B−
+BATT
−BATT
J6 Connector Switch
Connector Battery
J1
Conn_01x02_Male
F1
Polyfuse
Verpolschutz Battery
D2
SB560
Sheet: /PowerPart/
File: OpenBikeSensor03_PowerPart.sch
Title:
Size: A4
Date:
Rev:
KiCad E.D.A. kicad (5.1.4)−1
Id: 2/2

Anhang C

C.1 Validierung Sensor

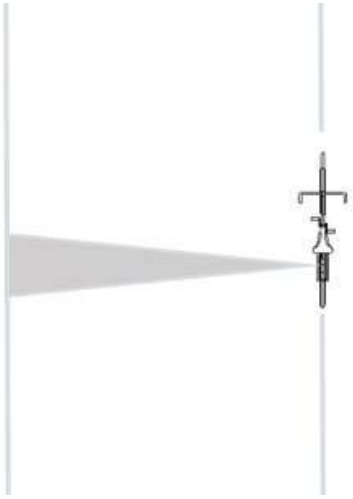
Versuchsaufbau:

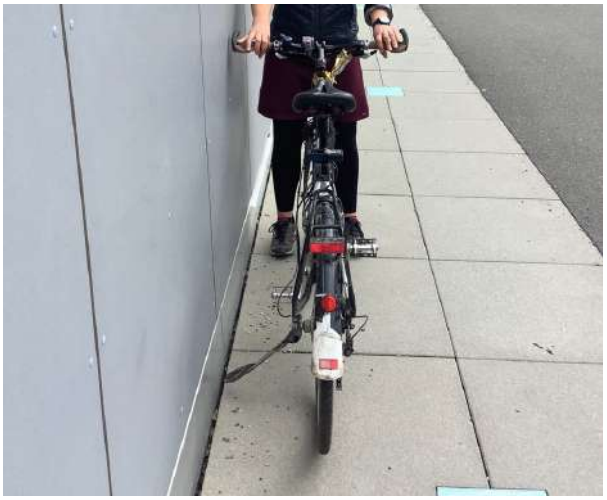
Der OBS wird wie für die Messfahrten an Sattelstütze montiert und befindet sich 79 Zentimeter über Boden. Das Lasermessgerät als Referenz für die Abstandsmessung des OBS wird mittig auf dem Sensorgehäuse befestigt. Dabei misst das Lasermessgerät den Abstand zur Wand ab der Mitte des Geräts und damit ab der Fahrradmittelachse. Der OBS misst ab der Außenkante des Sensors. Von Außenkante Sensor bis Außenkante Sensor ist der OBS 5 Zentimeter breit, daraus folgt ein Offset von 2,5 Zentimetern zur Fahrradmittelachse. Dieser Offset ist bei der Auswertung berücksichtigt.

Versuch 1 – Messgenauigkeit Sensor

Versuchsaufbau:

Der Lagesensor des Lasermessgeräts wird zur Ausrichtung des OBS und damit des Fahrrads +/- 1,0° senkrecht zum Boden verwendet.





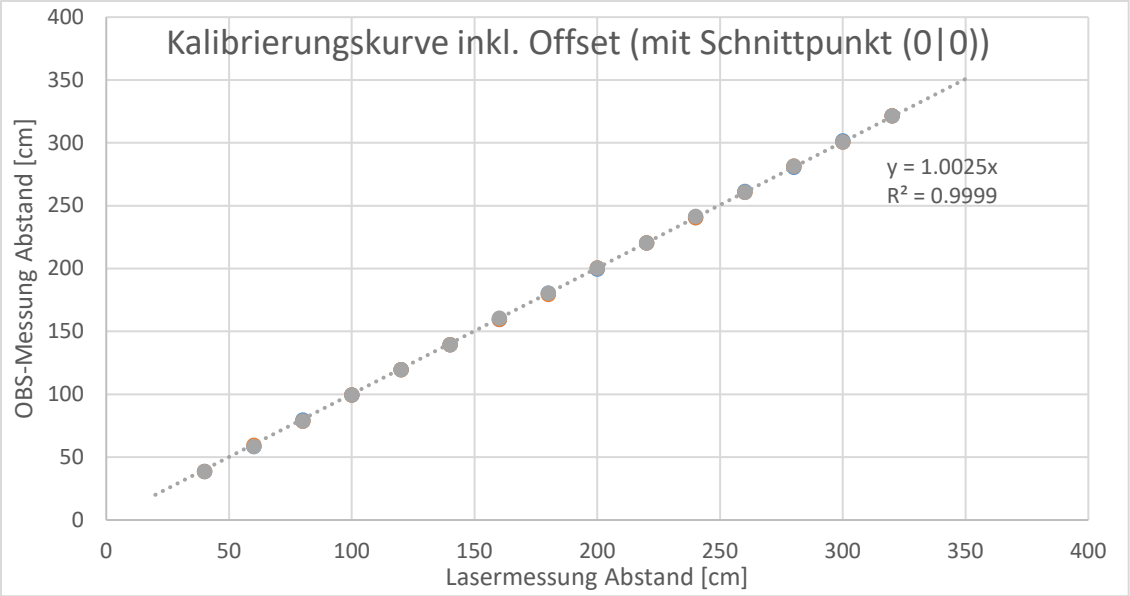
Messungen

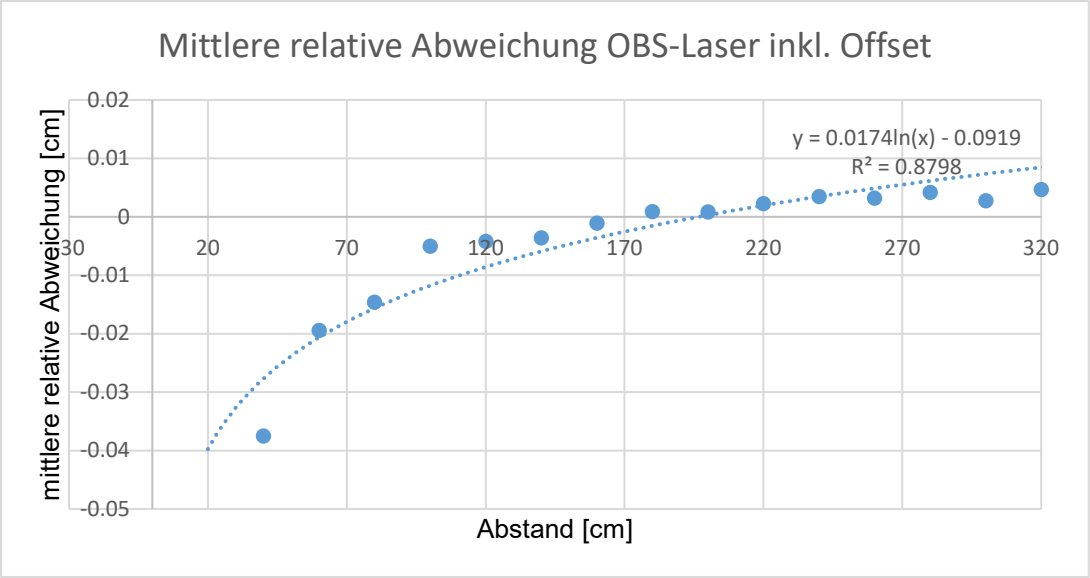
Die Messungen zur Sensorgenauigkeit erfolgen in 20 Zentimeter-Schritten senkrecht gegen eine Wand und in 40 Zentimeter-Schritten gegen einen Pkw (VW-Bus).

Laser	***OBS gegen Wand***			***OBS gegen Pkw***		
	Messreihe 1	*Messreihe 2*	*Messreihe 3*	*Messreihe 4*	*Messreihe 5*	*Messreihe 6*
alle Werte in [cm]						
350	-	-	-			
340	-	-	-			
320	319	319	319			
300	299	298	298			
280	278	279	279			
260	259	258	258			
240	238	238	239			
220	218	218	218			
200	197	198	198	199	198	198
180	178	177	178			
160	157	157	158	157	157	157
140	137	137	137			
120	117	117	117	116	117	116
100	97	97	97			
80	77	76	76	77	77	76
60	56	57	56			
40	36	36	36			
20	-	-	-			

Auswertung

Die Reichweite vom OBS beträgt 20 Zentimeter bis 320 Zentimeter.





Messunsicherheiten

Die Ausrichtung des Fahrrads parallel zur Wand erfolgt nach Augenmaß, was eine Fehlerquelle bedeutet. Die Auswirkung auf die Messgenauigkeit wird mit einer Größenordnung von < 1 Zentimeter angenommen.

Die Abweichung von der senkrechten Position des Fahrrads beträgt ± 1° und damit im betrachteten Entfernungsbereich bei ± 0,5-1,5 Zentimeter.

Die Messung erfolgte bei circa 18° C und trockenem Wetter. Die Umrechnung der Abstände mittels der Schallgeschwindigkeit basiert auf der Annahme von Normbedingungen (20° C, 1013,25 Hektopascal und trockener Luft). Der Einfluss auf die Messungen bei abweichenden Wetterbedingungen kann mit der Faustformel $c \approx (331 + 0{,}61 * T)\, {}^{m}/_{s}, T\ in\ [°C]$[225] überschlägig berechnet werden (vgl. nachfolgende Tabelle). Der Einfluss liegt in einer Größenordnung von < 1 Zentimeter und wird als vernachlässigbar klein eingeschätzt.

Temperatur	***Überschlägig berechnete Schallgeschwindigkeit c***	***Abstand bei Zeit t = 5,83*10-3 s = konstant***
10 °C	337 m/s	1,97 m
15 °C	340 m/s	1,98 m
20 °C	343 m/s	2,00 m
25 °C	346 m/s	2,02 m
30 °C	349 m/s	2,04 m

[225] Giancoli 2010.

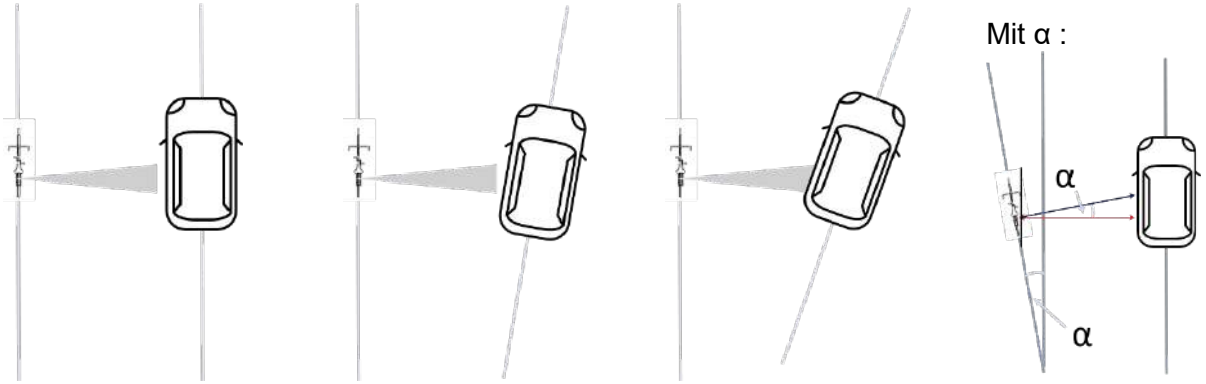
Schlussfolgerung

Der Mittelwert der Abweichung beträgt 0 cm mit einer Standardabweichung von ± 0,9 cm. Im Nahbereich bis circa 1,00 Meter werden die ÜHA vom OBS dabei tendenziell unterschätzt, das heißt ein kleinerer Wert als mit dem Lasermessgerät gemessen. Im Mittel liegt die Ungenauigkeit in diesem Bereich bei -1,1 Zentimeter, maximal bei -1,5 Zentimeter. Im Fernbereich ab circa 2,00 Meter werden die Abstände dagegen tendenziell überschätzt, das heißt größere Abstände gemessen, als mit dem Lasermessgerät. Im Mittel liegt die Ungenauigkeit hier bei 0,9 Zentimeter und maximal bei 1,5 Zentimetern. Die Ungenauigkeit im Bereich zwischen 1,00 und 2,00 Metern beträgt im Mittel -0,25 Zentimeter.

Versuch 2.2 Winkelabhängigkeit der Messung

Versuchsaufbau:

Für die Messung des Einflusses des Winkels auf die Abstandsmessung wird der OBS in 10 °-Schritten ausgehend von einer parallelen Ausrichtung zum Fahrzeug bewegt und die jeweilig gemessenen Abstände erfasst.



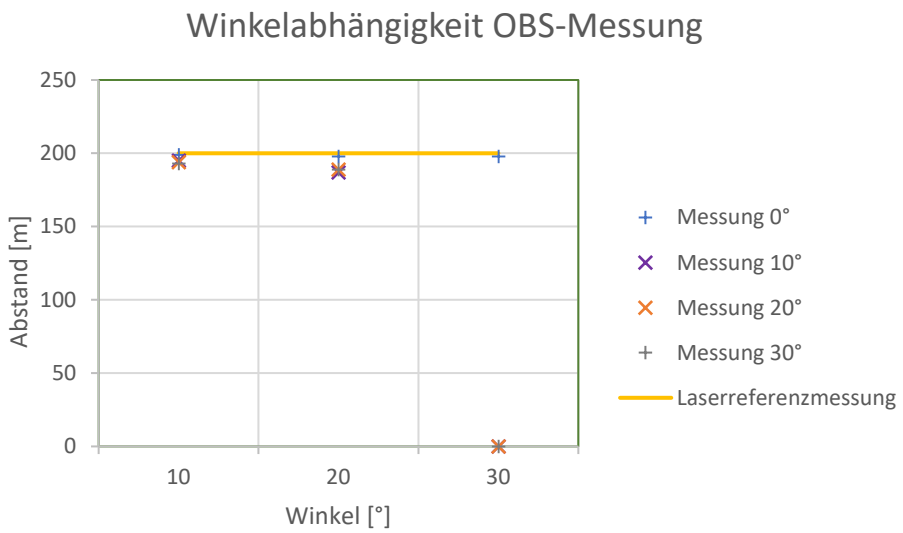
OBS parallel zum Pkw α = 10 ° α = 20 °

Messungen

Entfernung zum Pkw (blaue Strecke): 200 Zentimeter

Winkel	*Lasermessung (rote Strecke)*	*Messung 1*	*Messung 2*	*Messung 3*	*Mittelwert*	*Standard-abweichung*	*Absolute Abweichung*
0°	200 cm	199 cm	198 cm	198 cm	198,3 cm	0,6 cm	1,7 cm
10°	195 cm	195 cm	194 cm	193 cm	194,0 cm	1,0 cm	3,5 cm
20°	186 cm	187 cm	189 cm	189 cm	188,3 cm	1,2 cm	2,5 cm
30°	-	-	-				

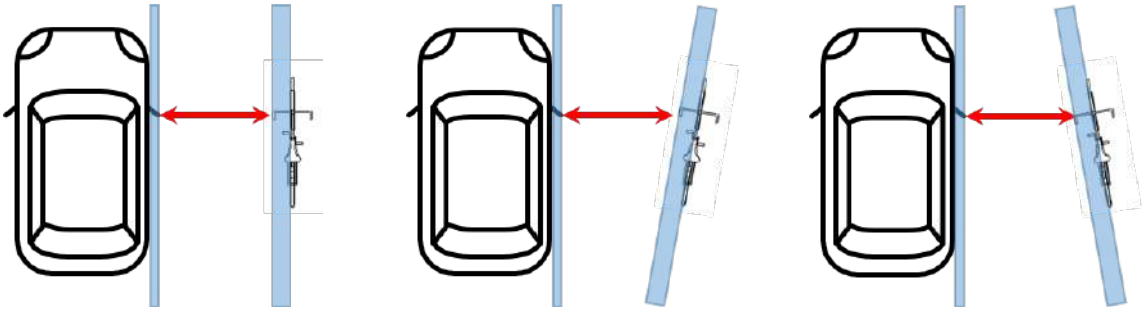
Auswertung



Messunsicherheiten

Das Erhebnungsverfahren mit der Markierung von verschiedenen Winkeln auf dem Boden wird mit einer Genauigkeit von ± 3 ° angenommen. Zusätzlich wir das Fahrrad aus der parallelen Ausrichtung zum Fahrzeug um die vertikale Achse über der Aufstandssetelle des Hinterrads gedreht. Da der OBS nicht genau auf dieser Achse liegt, ändert sich damit auch leicht der Abstand vom OBS zum Fahrzeug.

Es ist zu beachten, dass der pauschal angenommene Wert von 0,45 Meter für die halbe Lenkerbreite plus dem Außenspiegel (blau markierte Flächen) zu Ungenauigkeiten führen kann. Andererseits erfolgt das Ausscheren der Fahrzeuge normalerweise vor dem Passieren der Radfahrenden.



Schlussfolgerung

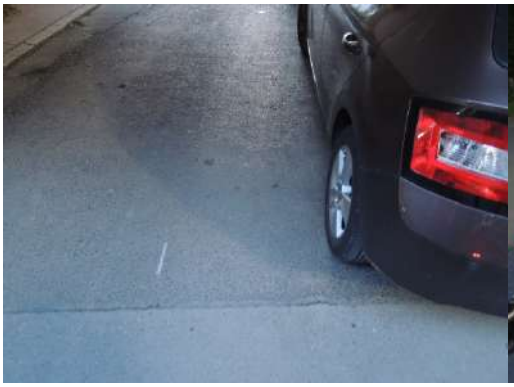
Der Winkel von OBS zu gemessenem Objekt hat Einfluss auf den gemessenen Abstand. Messmethodik zu ungenau für konkrete Aussagen. Zudem stellt sich die Frage der Definition des „äußerstens Punkts“ des Fahrzeugs. Nimmt man generell die Lenkeraußenseite als äußersten Punkt, ergeben sich keine neuen Ungenauigkeiten. Definiert man den äußersten

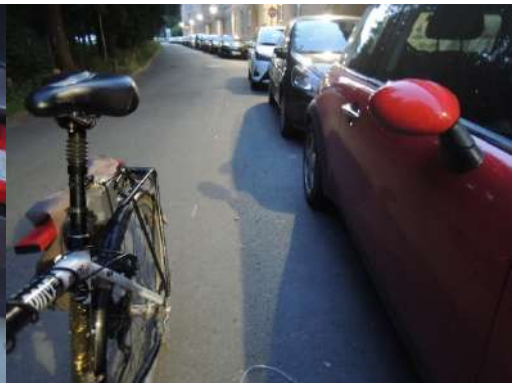
Punkt als jeweils dem Kfz nächsten Punkt, wird die Messungenauigkeit auf eine Größenordnung von ±15 Zentimeter geschätzt und hat so den größten Einfluss auf die Messgenauigkeit des Sensors.

Versuch 2.2 Einfluss Außenspiegel

Versuchsaufbau:

In 0,80 Meter Abstand von der Mittelachse der Reifen parkender Pkws aus werden Kreidestrichmarkierungen aufgebracht. Diese dienen dazu, dass das Fahrrad parallel zur Pkw-Flanke vorbeigeschoben werden kann. Mit einer Wasserwaage wird das Fahrrad senkrecht gehalten. Die Displayanzeige wird beobachtet und auf Veränderungen geprüft. Es wird jeweils 3x mal an insgesamt acht verschiedenen Fahrzeugmarken vorbei geschoben. Die Fahrzeugauswahl basiert auf den im Straßenraum parkenden Fahrzeugen, wobei versucht wurde, eine breite Bandbreite an Außenspiegelgrößen und Höhen über dem Boden abzudecken.





Messungen

Außenspiegel-Einfluss

		Skoda Fabia	***VW Polo***	***Toyota Yaris***	***Mini***	***Opel Zafira***	***Chev-rolet Matiz***	***Ci-troen C1***	***Volvo V40***
Höhe Außenspiegel-unterkante über Boden		0,94 m	0,92 m	0,96 m	0,86 m	1,02 m	0,96 m	0,93 m	0,89 m
Abstand *OBS* zum Fzg am Hinterrad	*Messung 1*	0,74	0,74	0,75	0,73	0,74	0,74	0,75	0,74
	Messung 2	0,75	0,73	0,75	0,75	0,74	0,73	0,74	0,73
	Messung 3	0,74	0,73	0,74	0,75	0,74	0,73	0,75	0,75
	Mittelwert	0,74	0,73	0,75	0,74	0,74	0,73	0,75	0,74
	Standard-abweichung	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
Abstand OBS zum Fzg am Außen-spiegel	*Messung 1*	0,73	0,74	0,73	0,74	0,74	0,72	0,73	0,72
	Messung 2	0,74	0,74	0,75	0,72	0,75	0,73	0,73	0,72
	Messung 3	0,72	0,72	0,74	0,75	0,73	0,73	0,74	0,73
	Mittelwert	0,73	0,73	0,74	0,74	0,74	0,73	0,73	0,72
	Standard-abweichung	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01

Auswertung

Nullhypothese H_0: Gleichheit der Mittelwerte

Alternative Hypothese H_1: Die Mittelwerte unterscheiden sich.

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances, α = 0,05

	Variable 1	*Variable 2*
Mean	0,74125	0,73291667
Variance	6,9643E-05	3,631E-05
Observations	8	8
Pooled Variance	5,2976E-05	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	14	
t Stat	2,28985713	
P(T<=t) one-tail	0,01903757	
t Critical one-tail	1,76131014	
P(T<=t) two-tail	0,03807515	
t Critical two-tail	2,14478669	

→ T-Test auf Gleichheit der Mittelwerte wird verworfen, da P(T≤t) einseitig < 0,05, beziehungsweise $t_{kritisch,\ einseitig} < t_{stat}$

Messunsicherheiten

Die abgelesenen Messwerte schwankten um ±3 Zentimeter, was auf Ungenauigkeiten bei der senkrechten Ausrichtung des Fahrrads, der Kreidemarkierung sowie das parallele Schieben entlang der Fahrzeugflanke auf der Kreidemarkierung zurückzuführen ist. Der Einfluss eines Autospiegels hätte mit 15-20 Zentimetern Breite einen deutlichen größeren Einfluss.

Schlussfolgerung

Obwohl die Gleichheit der Mittelwerte nicht gegeben ist, ist davon auszugehen, dass Außenspiegel in dieser Arbeit nicht vom OBS erfasst werden, was auf die Messungenauigkeiten zurückzuführen ist. Ist der Sensor auf einer anderen Höhe am Fahrrad montiert, ist dies erneut zu überprüfen.

Versuch 3 Erfassungsquote

Versuchsaufbau

Zu Messung der Erfassungsquote der ÜHV durch Bestätigen mit dem Druckknopf am Sensor, wird das Fahrrad auf dem Gehweg parallel zur Straße ausgerichtet und senkrecht und stabil gehalten wie in den vorherigen Versuchen.

Eine zweite Person fährt parallel zum Bordstein am Fahrrad mit einem Pkw (Renault Megane) an dem Fahrrad vorbei. Es wird parallel mit Lasermessgerät und OBS gemessen. Dabei werden die ÜHV durch den Pkw jeweils mit dem Knopf zu unterschiedlichen Zeitpunkten bestätigt: Zuerst, wenn das Vorderrad, dann das Hinterrad des Kfz auf Höhe des Fahrradlenkers ist und zuletzt direkt nachdem das Kfz das Fahrrad auf Lenkerhöhe passiert hat.

Messungen

Laser [cm]	***OBS [cm]***		
Vorderrad		Bestätigt	V_{Pkw} [km/h]
95	93	FALSE	10 bis 15
76	73	TRUE	10 bis 15
-	81	FALSE	10 bis 15
110	106	FALSE	10 bis 15
Hinterrad			
115	111	TRUE	10 bis 15
114	111	FALSE	10 bis 15
-	112	TRUE	10 bis 15
Zeitlich versetzt			
138	-	FALSE	10 bis 15
-	113	TRUE	10 bis 15
-	123	TRUE	10 bis 15
136	132	TRUE	25 bis 30
157	153	TRUE	25 bis 30
180	177	TRUE	25 bis 30

Auswertung

	Erfassungsquote
Vorderrad	25 %
Hinterrad	67 %
Zeitlich versetzt	80 %

Messunsicherheiten

Der Stichprobenumfang gerade beim Drücken an Vorderrad und Hinterrad ist klein und erlaubt nur die Abschätzung einer Tendenz. Die Auswirkungen von mehreren dicht hintereinanderfahrenden Fahrzeugen konnte mit diesem Versuchsaufbau nicht überprüft werden. Das gleiche gilt für verschiedene Relativgeschwindigkeiten zwischen Pkw und Fahrrad.

Schlussfolgerung

Die Erfassungsquote beim Drücken, wenn der Pkw mit dem Vorderrad auf Höhe des Fahrradlenkers ist, liegt bei circa 25 Prozent. Dagegen liegt die Erfassungsquote, beim Bestätigen der ÜHV unmittelbar nach dem das Fahrzeug das Fahrrad komplett passiert hat, bei circa 80 Prozent. Für eine detailliertere Auswertung wären mehr Messungen erforderlich. Auch im Slack wird diese Beobachtung geteilt. Vermutet wird hier, dass es Probleme bei der Erfassung von ÜHV gibt, wenn nach dem Bestätigen weitere Abstände gemessen werden.[226]

Bei den Messfahrten wird darauf geachtet, erst nach Passieren der Fahrzeuge den ÜHV zu bestätigen.

[226] (4.6.2021, #support_obs_software)Slack.

Versuch 4 Fahrlinie und Abstand zum rechten Bord/ parkenden Fahrzeugen

Versuchsaufbau

Neben technischen Aspekten des Sensors wird die Fahrlinie und insbesondere der Abstand, der zum rechten Fahrbahnrand eingehalten werden kann, untersucht. Dazu werden zunächst Fixpunkte am Lenker definiert, die einen Abstand von 30 bis 50, 80 bis 100 sowie 130 bis 150 Zentimetern vom Bord oder parkenden Fzg bedeuten. Diese dienen während der Fahrt zur Orientierung. Auf die Verwendung eines Laserpointers, der den Abstand markiert, wie bei Walker (2007) wird verzichtet, da dieser Tagsüber auf Asphalt kaum zu erkennen ist.

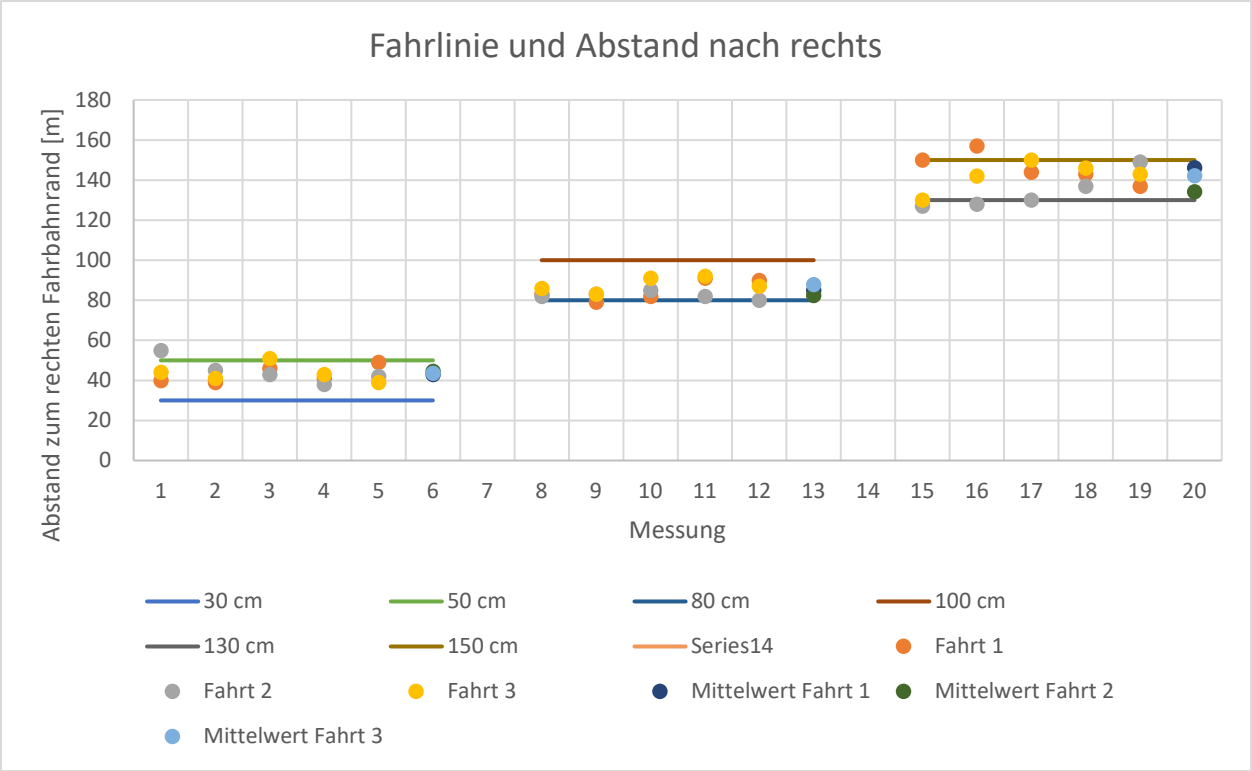
Nach Definition der Fixpunkte wird mit den drei Abstandsbereichen entlang eines Bordsteins gefahren. Das erfolgt in einer Einbahnstraße unbeeinflusst von fließendem Verkehr. Vor jeder Fahrt auf einer Messstrecke von circa 30 Metern werden die Fahrradreifen nass gemacht, sodass sie Spuren auf der Straße hinterlassen. Diese werden dann stichprobenartig vermessen. Dabei werden sowohl Schwankungen nach rechts als auch nach links erfasst. Gemessen wird erst nach circa 7-10 Metern „Anlaufzeit“, die es braucht, damit das Fahrrad schnell genug (circa 12-17 km/h) ist und spurstabil fährt.

Messungen

	Fahrt 1 [cm]	***Fahrt 2 [cm]***	***Fahrt 3 [cm]***
Abstand 30-50cm			
Messung 1	40	55	44
2	39	45	41
3	46	43	51
4	41	38	43
5	49	42	39
Abstand 80-100cm			
1	83	82	86
2	79	83	83
3	82	85	91
4	91	82	92
5	90	80	87
Abstand 130-150cm			
1	150	127	130
2	157	128	142
3	144	130	150
4	143	137	146
5	137	149	143

Auswertung

	Mittelwert [cm] (Standardabweichung [cm])			
	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Gesamt
Position 1	43,0 (4,3)	44,6 (6,3)	43,6 (4,6)	43,7 (4,8)
Position 2	85,0 (5,2)	82,4 (1,8)	87,8 (3,7)	85,1 (4,2)
Position 3	146,2 (7,6)	134,2 (9,1)	142,5 (7,5)	140,9 (8,8)



Messunsicherheiten

Die Messung der Fahrlinie erfolgte ohne Beeinflussung durch fließenden Verkehr auf einer kurzen Strecke. Durch das Vorhandensein von fließendem Verkehr kann die Fahrlinie beeinflusst werden, auch kann die Konzentration der Fahrerin über die Zeit nachlassen. Andererseits ist es leichter die Fahrlinie auf einer längeren Strecke zu halten als kurz nach dem Beschleunigen, wie es auf der kurzen Messstrecke der Fall war.

Bei der Teststrecke war eine 40 Zentimeter breite Rinne vorhanden, die eine gute Orientierung für die Abstände von 30 bis 50 Zentimetern bot, ein Befahren des Übergangs zwischen Rinne und Fahrbahn wurde versucht zu vermeiden wegen einer minimalen Höhendifferenz.

Schlussfolgerung

Die Orientierungspunkte am Lenker sind sinnvoll gewählt. Sie erlauben es, im Mittel in den vorgegebenen Korridoren zu fahren.

C.2 Prüfung Normalverteilung zur Ermittlung der Stichprobengröße

Shapiro-Wilk-Test[227]

Nullhypothese H_0: Die Daten sind normalverteilt.

Alternative H_1: Die Daten sind nicht normalverteilt.

ÜHA "Links"*[cm]	sortiert [cm]	$x_i - \bar{x}$ [cm]	$(x_i - \bar{x})^2$[cm²]
184	68	-92,4	8545,2
147	87	-73,4	5393,4
188	104	-56,4	3185,5
205	110	-50,4	2544,2
214	127	-33,4	1118,2
173	132	-28,4	808,8
87	136	-24,4	597,3
183	147	-13,4	180,6
148	148	-12,4	154,8
153	153	-7,4	55,4
136	161	0,6	0,3
127	168	7,6	57,2
168	170	9,6	91,4
212	171	10,6	111,5
183	173	12,6	157,8
200	183	22,6	509,0
68	183	22,6	509,0
104	184	23,6	555,1
132	186	25,6	653,3
170	188	27,6	759,6
110	200	39,6	1565,0
201	201	40,6	1645,1
171	205	44,6	1985,6
161	212	51,6	2658,4
186	214	53,6	2868,7

* Rohdaten ÜHA ohne Offset Lenker, Seitenspiegel

[227] Shapiro und Wilk 1965; Hedderich und Sachs 2016.

n= 25 und $\bar{x}$ =160,44

$$W = \frac{b^2}{SS}$$

Mit

$$SS = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$$

$$b = \sum_{i=1}^{m} a_i (x_{n+1-i} - x_i)$$

Koeffizienten a_i		***x_{n+1-i}-x_i***		***a_i*(x_{n+1-i}-x_i)***
a_1=	0,4450	x_{25}-x_1=	146	64,9700
a_2=	0,3098	x_{24}-x_2=	125	38,7250
a_3=	0,2543	x_{23}-x_3=	101	25,6843
a_4=	0,2148	x_{22}-x_4=	91	19,5468
a_5=	0,1822	x_{21}-x_5=	73	13,3006
a_6=	0,1539	x_{20}-x_6=	56	8,6184
a_7=	0,1283	x_{19}-x_7=	50	6,4150
a_8=	0,1046	x_{18}-x_8=	37	3,8702
a_9=	0,0823	x_{17}-x_9=	35	2,8805
a_{10}=	0,0610	x_{16}-x_{10}=	30	1,8300
a_{11}=	0,0403	x_{15}-x_{11}=	12	0,4836
a_{12}=	0,0200	x_{14}-x_{12}=	3	0,0600
a_{13}=	0,0000			0

Daraus folgt

SS =		36710,1600
b^2		34739,1446
W= b^2/SS		0,94630872
	0,1	0,9310
	0,5	0,9640
p-Wert		0,28556026
α		0,05

Mit p=0,2856 > 0,05 wird die Hypothese H_0 nicht verworfen und eine Normalverteilung angenommen.

Anhang D

D.1 Deskriptive Statistik Ergebnisse

Deskriptive Statistik markierte Radverkehrsführungen

	MmS+1	***MmS+2***	***MmS+3***	***RFS+1***	***RFS+2***	***RFS+3***
Mittelwert $\bar{x}$ [m]	1,19	1,06	0,95	1,68	1,34	1,10
Median [m]	1,15	1,04	0,94	1,69	1,34	1,05
Standardfehler [m]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Standardabweichung [m]	0,31	0,36	0,33	0,32	0,27	0,32
Stichprobenvarianz [m^2]	0,10	0,13	0,11	0,10	0,07	0,10
Wertebereich [m]	1,55	1,98	1,47	1,98	1,26	1,55
Minimum [m]	0,45	0,42	0,27	0,40	0,73	0,41
Maximum [m]	2,00	2,40	1,74	2,38	1,99	1,96
Anteil ÜHV ≤1,50 m	0,86	0,89	0,94	0,23	0,72	0,86
Anzahl n	97	140	110	118	98	122

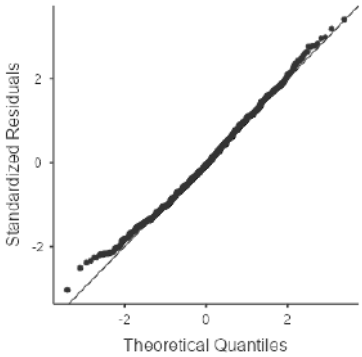
Deskriptive Statistik unmarkierte Radverkehrsführungen

	MoS+1	***MoS+2***	***MoS+3***	***MoS-1***	***MoS-2***	***MoS-3***
Mittelwert $\bar{x}$ [m]	1,27	1,26	1,25	1,42	1,34	1,34
Median [m]	1,20	1,27	1,25	1,44	1,29	1,33
Standardfehler [m]	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04
Standardabweichung [m]	0,42	0,36	0,32	0,41	0,40	0,37
Stichprobenvarianz [m^2]	0,18	0,13	0,10	0,17	0,16	0,14
Wertebereich [m]	1,90	2,17	1,54	2,22	2,00	2,31
Minimum [m]	0,42	0,37	0,57	0,41	0,46	0,06
Maximum [m]	2,32	2,54	2,11	2,63	2,46	2,37
Anteil ÜHV ≤1,50 m	0,71	0,76	0,77	0,59	0,70	0,68
Anzahl n	133	163	97	135	137	109
Legende:	jeweils kleinster Wert aller Szenarien			jeweils größter Wert aller Szenarien		

Test auf Normalverteilung

Es wird sowohl formal mit dem Shapiro-Wilk-Test, der zum Beispiel nach Schlittgen als „anerkanntester Test auf Normalverteilung“[228] gilt als auch grafisch mit Histogrammen und Q-Q-Diagrammen (Quantil-Quantil-Diagramm) getestet, ob die Daten normalverteilt sind. Beim Shapiro-Wilk-Test ist die Nullhypothese, dass die Werte normalverteilt sind, die Alternativhypothese, dass keine Normalverteilung gegeben ist. Mit Jamovi wird der *p*-Wert ermittelt, der mit dem Signifikanzniveau *α* verglichen wird. Dabei wird α = 0,05 festgelegt.[229] Ist der *p*-Wert größer als das Signifikanzniveau *α*, wird die Nullhypothese angenommen, ist der *p*-Wert kleiner wird die Nullhypothese verworfen.[230]

Wenn in den Q-Q-Diagrammen, in denen die standardisierten Residuen mit errechneten theoretischen Quantilen in einem Diagramm dargestellt werden, die Werte annähernd auf der 45° Achse liegen, deutet das auf eine Normalverteilung hin.[231]



Hier erkennt man, dass die Werte im mittleren Bereich gut durch die Normalverteilung beschrieben werden, im unteren Bereich lässt sich dagegen über die Normalverteilung diskutieren.

Auswertung

Der formale Test auf Normalverteilung mit Jamovi ergibt, dass die Messwerte in den Szenarien MmS+2, MoS+1 RFS+1 sowie RFS+3 nicht normalverteilt sind (vgl. nachfolgende Tabelle).

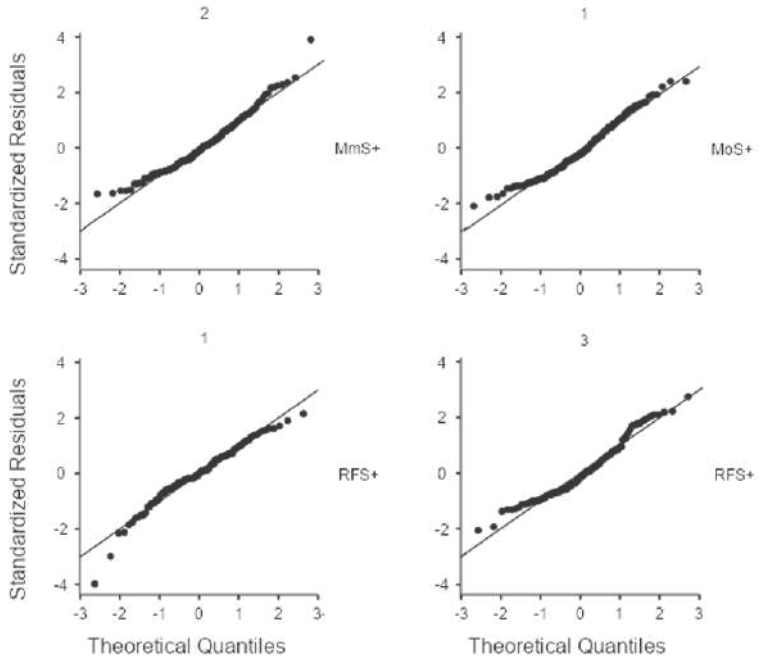
---

[228] Schlittgen 2009, S. 116.
[229] Papula 2016, S. 546.
[230] Jamovi 2021.
[231] Schlittgen 2009, S. 117.

	Radverkehrsführung	*Position*	*ÜHA*
Shapiro-Wilk p-Wert	MmS+	1	0,358
		2	0,002
		3	0,380
	MoS+	1	0,007
		2	0,715
		3	0,917
	MoS-	1	0,835
		2	0,162
		3	0,232
	RFS+	1	0,007
		2	0,596
		3	0,002

mit Normalverteilung, wenn p > 0,05 — blau hinterlegt: keine NV

Die grafische Überprüfung anhand der Q-Q-Diagramme und der Histogramme ergibt für das Szenario MmS+2, dass annähernd von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann, da die Werte überwiegend auf der 45°-Achse im Q-Q-Diagramm liegen und auch das Histogramm die typische Form aufweist. Für die Szenarien MoS+1, RFS+1 und RFS+3 sind die Abweichungen größer, sodass hier auch nach visueller Prüfung die Normalverteilung diskutierbar ist:



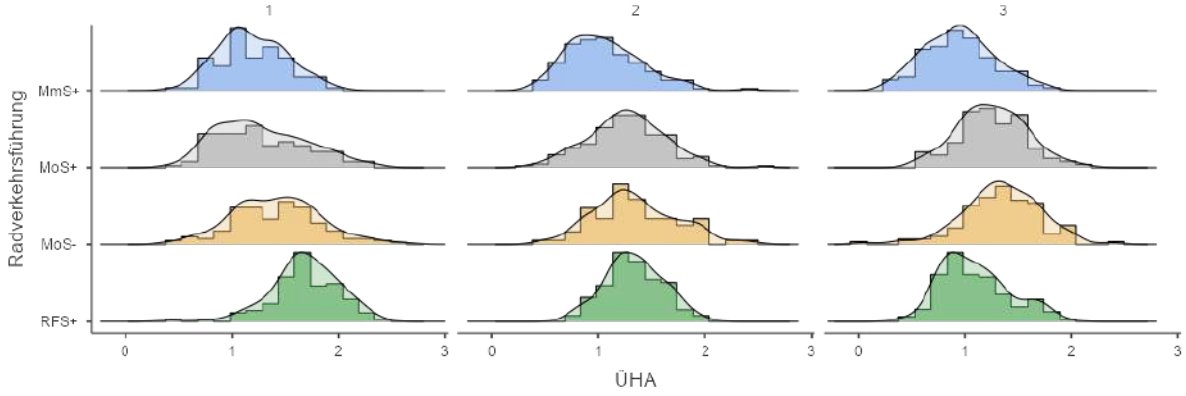
jamovi (2021)

Ausführliche Auswertung nach Jamovi

Statistische Kenngröße

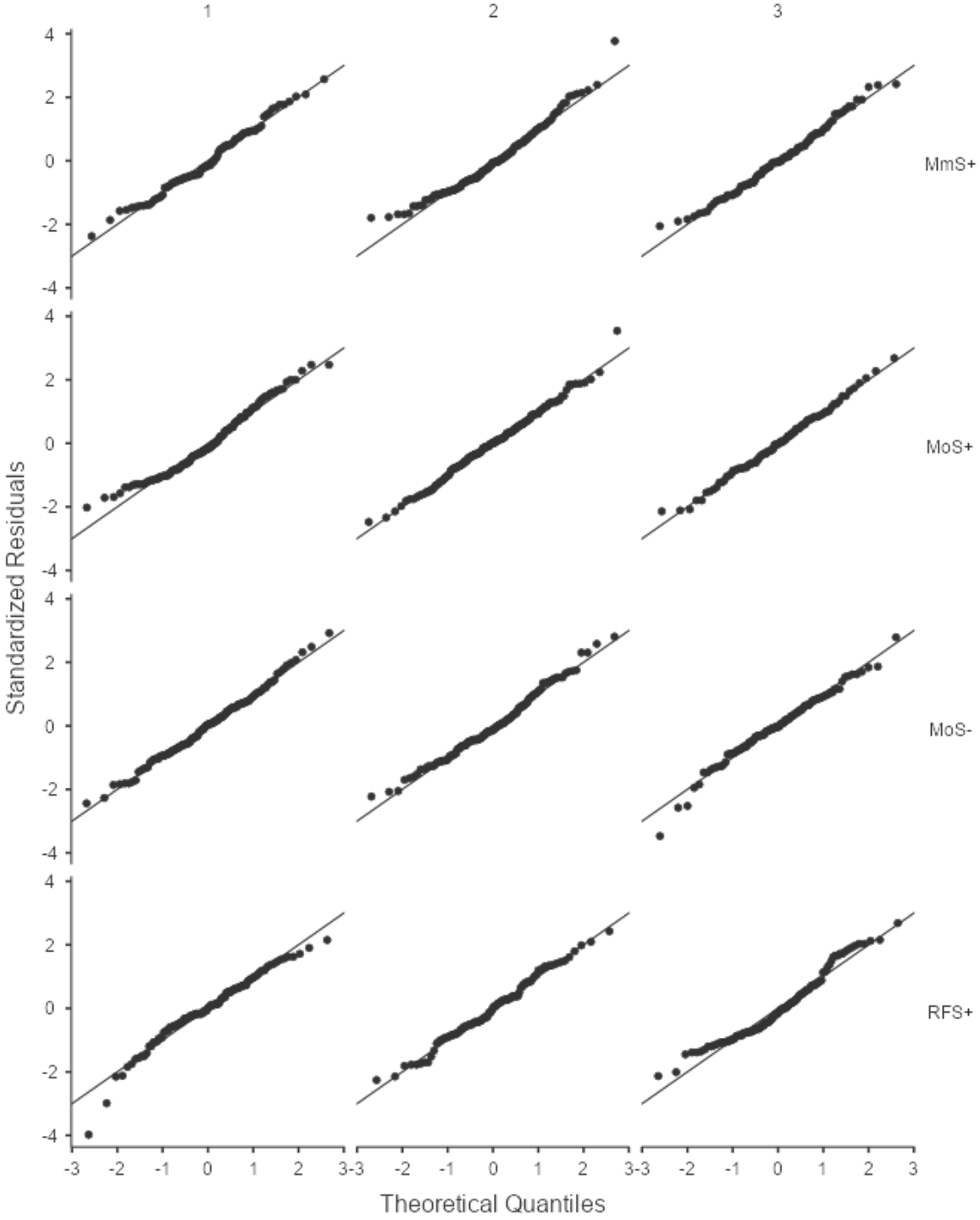
	Radverkehrsführung	Position	ÜHA
Shapiro-Wilk W	MmS+	1	0.985
		2	0.968
		3	0.987
	MoS+	1	0.972
		2	0.994
		3	0.993
	MoS-	1	0.994
		2	0.986
		3	0.984
	RFS+	1	0.968
		2	0.989
		3	0.962
Shapiro-Wilk p-Wert	MmS+	1	0.358
		2	0.002
		3	0.380
	MoS+	1	0.007
		2	0.715
		3	0.917
	MoS-	1	0.835
		2	0.162
		3	0.232
	RFS+	1	0.007
		2	0.596
		3	0.002

Histogramme[232]



[232] Jamovi 2021.

Q-Q-Diagamme[233]



[233] Jamovi 2021.

Karte Messstrecken - ÜHA bei Position 1[234]

Karte Messstrecken - ÜHA bei Position 3 [235]

[234] Kartengrundlage: OpenStreetMap 2021.
[235] Kartengrundlage: ebd.

D.2 ANOVA

Es wird die parametrische beziehungsweise zur Überprüfung die nicht-parametrische ANOVA durchgeführt, um zu testen, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Szenarien gibt.

Die ANOVAs bestätigen signifikante Unterschiede für das Signifikanzniveau von α = 0,05, wenn der *p*-Wert kleiner als α = 0,05 ist.

MmS+

One-Way ANOVA

		F	df1	df2	p
MmS+	Welch's	15.4	2	222	< .001
	Fisher's	14.1	2	344	< .001

Group Descriptives

	Position	N	Mean	SD	SE
MmS+	Position 1	97	1.195	0.314	0.0319
	Position 2	140	1.059	0.356	0.0301
	Position 3	110	0.946	0.329	0.0314

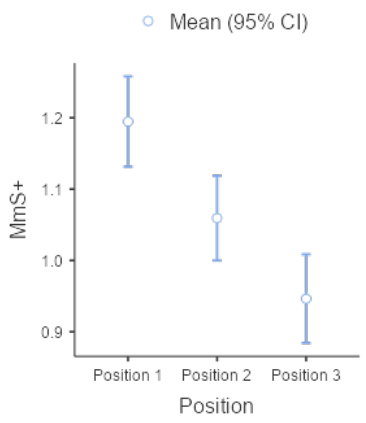
Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
MmS+	0.984	< .001

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
MmS+	0.522	2	344	0.594



jamovi (2021)

Tukey Post-Hoc Test – MmS+

		Position 1	Position 2	Position 3
Position 1	Mean difference	—	0.135 **	0.248 ***

	t-value	—	3.05	5.31
	df	—	344	344
	p-value	—	0.007	< .001
Position 2	Mean difference		—	0.113 *
	t-value		—	2.64
	df		—	344
	p-value		—	0.024
Position 3	Mean difference			—
	t-value			—
	df			—
	p-value			—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

One-Way ANOVA (Non-parametric)

Kruskal-Wallis

	χ^2	df	p	ε^2
MmS+	27.1	2	< .001	0.0784

Dwass-Steel-Critchlow-Fligner pairwise comparisons

Pairwise comparisons - MmS+

		W	p
Position 1	Position 2	-4.62	0.003
Position 1	Position 3	-7.34	< .001
Position 2	Position 3	-3.22	0.059

MoS+

One-Way ANOVA

		F	df1	df2	p
MoS+	Welch's	0.0902	2	241	0.914
	Fisher's	0.0904	2	390	0.914

Group Descriptives

	Position (2)	N	Mean	SD	SE
MoS+	Position 1	133	1.27	0.423	0.0367
	Position 2	163	1.26	0.361	0.0283
	Position 3	97	1.25	0.319	0.0324

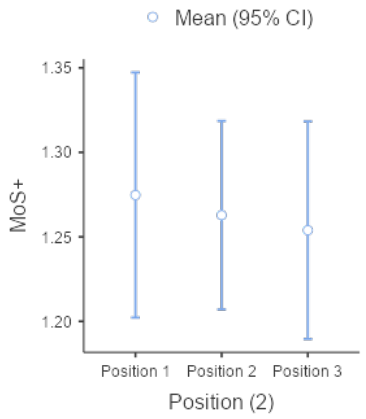
Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
MoS+	0.994	0.097

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
MoS+	5.87	2	390	0.003



jamovi (2021)

Games-Howell Post-Hoc Test – MoS+

		Position 1	Position 2	Position 3
Position 1	Mean difference	—	0.0119	0.02082
	t-value	—	0.257	0.425
	df	—	260	228
	p-value	—	0.964	0.905

Position 2	Mean difference	—	0.00890
	t-value	—	0.207
	df	—	221
	p-value	—	0.977
Position 3	Mean difference		—
	t-value		—
	df		—
	p-value		—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

One-Way ANOVA (Non-parametric)

Kruskal-Wallis

	χ^2	df	p	ε^2
MmS+	27.1	2	< .001	0.0784

Dwass-Steel-Critchlow-Fligner pairwise comparisons

Pairwise comparisons - MoS+

		W	p
Position 1	Position 2	0.400	0.957
Position 1	Position 3	0.200	0.989
Position 2	Position 3	-0.359	0.965

MoS-

One-Way ANOVA

		F	df1	df2	p
MoS-	Welch's	1.59	2	249	0.206
	Fisher's	1.66	2	378	0.192

Group Descriptives

	Position (3)	N	Mean	SD	SE
MoS-	Position 1	135	1.42	0.414	0.0357
	Position 2	137	1.34	0.397	0.0339
	Position 3	109	1.34	0.369	0.0354

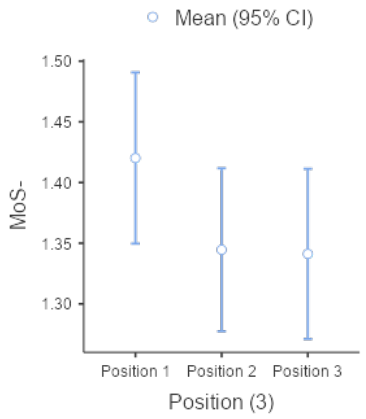
Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
MoS-	0.997	0.705

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
MoS-	1.23	2	378	0.293

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality



jamovi (2021)

Tukey Post-Hoc Test – MoS-

		Position 1	Position 2	Position 3
Position 1	Mean difference	—	0.0755	0.07896
	t-value	—	1.57	1.5495
	df	—	378	378
	p-value	—	0.258	0.269

Position 2	Mean difference	—	0.00341
	t-value	—	0.0671
	df	—	378
	p-value	—	0.998
Position 3	Mean difference		—
	t-value		—
	df		—
	p-value		—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

One-Way ANOVA (Non-parametric)

Kruskal-Wallis

	χ^2	df	p	ε^2
MoS-	2.99	2	0.224	0.00788

Dwass-Steel-Critchlow-Fligner pairwise comparisons

Pairwise comparisons - MoS-

		W	p
Position 1	Position 2	-2.273	0.243
Position 1	Position 3	-1.778	0.420
Position 2	Position 3	0.666	0.885

RFS+

One-Way ANOVA (Welch's)

	F	df1	df2	p
RFS+	101	2	223	< .001

Group Descriptives

	Position (4)	N	Mean	SD	SE
RFS+	Position 1	118	1.68	0.323	0.0297
	Position 2	98	1.34	0.269	0.0272
	Position 3	122	1.10	0.322	0.0291

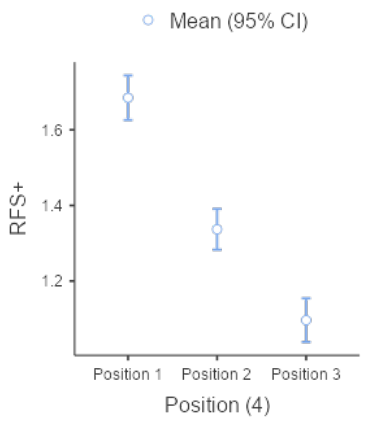
Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
RFS+	0.991	0.035

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
RFS+	1.45	2	335	0.237

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality



jamovi (2021)

Tukey Post-Hoc Test – RFS+

		Position 1	Position 2	Position 3
Position 1	Mean difference	—	0.348 ***	0.589 ***
	t-value	—	8.27	14.80

	df	—	335	335
	p-value	—	< .001	< .001
Position 2	Mean difference		—	0.240 ***
	t-value		—	5.76
	df		—	335
	p-value		—	< .001
Position 3	Mean difference			—
	t-value			—
	df			—
	p-value			—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

One-Way ANOVA (Non-parametric)

Kruskal-Wallis

	χ^2	df	p	ε^2
RFS+	136	2	< .001	0.403

Dwass-Steel-Critchlow-Fligner pairwise comparisons

Pairwise comparisons - RFS+

		W	p
Position 1	Position 2	-10.98	< .001
Position 1	Position 3	-14.86	< .001
Position 2	Position 3	-8.13	< .001

D.3 Anteile ÜHV nach Abstandsklassen für Mischverkehr ohne Schutzstreifen

	MoS+1	MoS+2	MoS+3	MoS-1	MoS-2	MoS-3
mehr als 2,00 m	4.5%	1.2%	1.0%	7.4%	5.1%	2.8%
mehr als 1,5-2,0	24.1%	22.7%	21.6%	33.3%	24.8%	29.4%
1,0-1,50 m	39.8%	53.4%	55.7%	45.2%	48.9%	55.0%
0,5-1,00 m	30.8%	20.9%	21.6%	12.6%	20.4%	10.1%
unter 0,50 m	0.8%	1.8%	0.0%	1.5%	0.7%	2.8%
n	133	163	97	135	137	109

D.4 Messdatensätze

Die Daten der FACE-Auswertung sowie die Berechung der Histogramme und Boxplots befinden sich im digitalen Anhang D.4.