**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

RadVerS - Mit Smartphones generierte Verhaltensdaten im Verkehr – Differenzierung des Nutzerverhaltens unterschiedlicher RadfahrerInnengruppen

Teil II - Feldstudie zum Radverkehrsverhalten

Sven Lißner, Paul Lindemann, Udo Becker

TU Dresden

Professur für Verkehrsökologie

Die vorliegende Studie ist ein Gemeinschaftsprojekt der Professuren für Verkehrsökologie und Verkehrspsychologie der Technischen Universität Dresden. Die Verwendung der Texte und Bilder, eine Vervielfältigung und Weitergabe – auch auszugsweise – ist nur mit detaillierter Quellenangabe gestattet.

Der vorliegende Forschungsbericht fasst die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung einer Feldstudie zum Thema Radverhaltensforschung mittels GPS Daten zusammen. Ziel des Teil-Projektes war es zu prüfen, welche Parameter auf Personenebene Einfluss auf das Radverkehrsverhalten haben.

Die Autoren danken allen Proband*innen, die das Projekt durch Ihre Teilnahme erst möglich gemacht haben.

Technische Universität Dresden, Professur für Verkehrsökologie;
Sven Lißner, Paul Lindemann, Udo Becker

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

Zitierhinweis:

Lißner, S.; (2021) „RadVerS – Mit Smartphones generierte Verhaltensdaten im Verkehr - Differenzierung des Nutzerverhaltens unterschiedlicher RadfahrerInnengruppen, Teil 2 des Abschlussberichts“, Dresden

Dresden, im August 2021

Stand 12.08.2021

Autor:

Dipl.-Ing. Sven Lißner

Inhalt

1.	Einleitung.....	1
1.1	Ziel der Untersuchung.....	2
2.	Literaturrecherche	3
2.1	Übersicht deutschsprachiger Studien zu GPS-Datennutzung im Radverkehr	3
2.2	Internationale Literatur zu GPS-Datennutzung im Radverkehr	5
2.3	Fazit Literaturrecherche	7
3.	Methodik der Feldstudie	11
3.1	Erhebungsrahmen	11
3.2	Stichprobenziehung	15
3.3	Stichprobenzusammensetzung	18
3.4	Kommunikation	20
3.5	Untersuchungsdurchführung.....	21
3.6	Datenverarbeitung	24
3.6.1	Datenimport	26
3.6.2	Filtern und Glätten der Daten	26
3.6.3	Erkennung von Wegen.....	29
3.6.4	Verkehrsmittelerkennung.....	32
3.6.5	Fahrtzustandserkennung	36
3.6.6	Map-Matching	37
3.7	Validierung der Datenverarbeitung.....	43
3.7.1	Systematische Fehlerprüfung	43
3.7.2	Prüfung auf zufällige Fehler	48
4.	Ergebnisse	52
4.1	Allgemeine deskriptive Statistik	52
4.2	Statistik der Hauptstichprobe.....	57

4.3	Statistik der Vergleichsstichprobe	76
4.4	Vergleich mit Strava-Daten	82
5.	Diskussion	87
5.1	Stichprobenzusammensetzung und Durchführung	87
5.2	Datenverarbeitung	87
5.3	Datenauswertung	88
5.4	Implikation für die Radverkehrsplanung	89
5.5	Grenzen der Methodik	90
A.	Anhang	95
A.I	Mitglieder des Expertenbeirats	95
A.II	Datenschutzerklärung	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Projektablauf	2
Abbildung 2:	Radverkehrsanteil in Dresden nach SrV 2013	12
Abbildung 3:	Modal Split in Dresden nach Ortsamtsbereichen nach SrV 2013	13
Abbildung 4:	Modal Split in Dresden nach Ortsamtsbereichen nach SrV 2013	13
Abbildung 5:	Schema Stichprobenziehung	16
Abbildung 6:	Geschlechterverteilung bei der Stichprobenziehung zur Feldstudie	19
Abbildung 7:	Altersverteilung der Stichprobe (N=	19
Abbildung 8:	Screenedesigns und Grundfunktionalitäten der App	22
Abbildung 9:	Ablaufschema Datenverarbeitung RadVerS	25
Abbildung 10:	Mittlere Geschwindigkeiten unterschiedlicher Verkehrsmittel	33
Abbildung 11:	Entscheidungsbaum der Verkehrsmittelerkennung	35
Abbildung 12	Puffer des ESKN-Netzes (violett) mit den OSM-Kanten, die die Bedingungen erfüllen (rosa)	40
Abbildung 13	Füllen der Lücken mit den restlichen OSM-Kanten (rot), um die topologischen Verknüpfungen zu bewahren.	40

Abbildung 14 In den meisten anderen Situationen erhält m. gute Ergebnisse	41
Abbildung 15: Verteilung der Smartphonehersteller unter den Proband*Innen mit Fahrten < 5 min.....	47
Abbildung 16: Absolute und relative Anzahl an Fahrten unter 5 Minuten nach Gerät.....	48
Abbildung 17: Altersverteilung der Proband*Innen während der Feldstudie	52
Abbildung 18: Altersverteilung der Radfahrenden nach SrV2013 am Stichtag der Erhebung	53
Abbildung 19: Verteilung der Proband*innen auf Radfahrtypen während der Feldphase	54
Abbildung 20: Verteilung der während der Feldphase genutzten Smartphones und deren Betriebssysteme (N=187)	55
Abbildung 21: Zusagen und erfolgte Teilnahmen nach Erhebungswelle.....	55
Abbildung 22: Witterungsverhältnisse während der Feldphase im Untersuchungsgebiet (2018).....	56
Abbildung 23: Häufigkeit der Fahrradnutzung während der Felderhebung je Radfahrtyp über alle Wegezwecke.....	57
Abbildung 24: Häufigkeit der Fahrradnutzung je Typ und Wegezweck	58
Abbildung 25: Mittlere tägliche Wegelänge über alle Wegezwecke.....	60
Abbildung 26: Mittlere Tageskilometer nach Wegezweck und Typ.....	61
Abbildung 27: Mittlere Geschwindigkeiten der unterschiedlichen Radfahrtypen	62
Abbildung 28: Mittlere Geschwindigkeit je Geschlecht, Hauptstichprobe	63
Abbildung 29: Geschwindigkeiten nach Geschlecht und Typ	64
Abbildung 30: Mittlere Geschwindigkeiten nach Altersklasse, Hauptstichprobe	65
Abbildung 31: Mittlere V50 nach Typ je Altersgruppe, Hauptstichprobe.....	66
Abbildung 32: Mediangeschwindigkeiten je Typ nach Wegezweck	67
Abbildung 33: Mittleres 0,95-Perzentil der Beschleunigung je Typ, Hauptstichprobe.....	68
Abbildung 34: Mittlere Beschleunigungsperzentile je Geschlecht, Hauptstichprobe	69
Abbildung 35: Beschleunigungsperzentile nach Altersgruppen, Hauptstichprobe.....	70
Abbildung 36: 95%-Perzentil der Beschleunigung je Typ nach Alter, Hauptstichprobe ...	71
Abbildung 37: 95%-Perzentil der Beschleunigung je Typ und Wegezweck, Hauptstichprobe	71

Abbildung 38: Mittlerer Anteil der genutzten Radverkehrsinfrastruktur an der Gesamtweglänge	73
Abbildung 39: Mittlerer Anteil genutzter Infrastruktur nach Wegezweck.....	74
Abbildung 40: Mittlerer Anteil genutzter Infrastruktur nach Alter, Hauptstichprobe	75
Abbildung 41: Verteilung der Proband*innen der Vergleichsstichprobe auf das Bundesgebiet	76
Abbildung 42: Verteilung der Radfahrenden nach Alter und Geschlecht, Vergleichsstichprobe (N=120).....	77
Abbildung 43: Verteilung der Radfahrenden nach Typ und Geschlecht, Vergleichsstichprobe (N=120).....	78
Abbildung 44: Anteil Fahrradnutzung im Untersuchungszeitraum nach Typ und Wegezweck: Vergleichsstichprobe (N=120)	79
Abbildung 45: Mittlere Tageskilometer je Typ und Wegezweck, Vergleichsstichprobe (N=120).....	80
Abbildung 46: Mittleres 0.85-Perzentil der Geschwindigkeit nach Alter und Typ, Vergleichsstichprobe (N=120).....	81
Abbildung 47: Mittleres 0.95-Perzentil der pos. Beschleunigung, Vergleichsstichprobe (N=120).....	81
Abbildung 48: Heat-Map der Fahrten im Dresdner Stadtgebiet, Hauptstichprobe.....	82
Abbildung 49: Heat-Map der Strava - Fahrten im Dresdner Stadtgebiet, abgerufen am 07.08.2019	83
Abbildung 50: Altersverteilung der Strava-Nutzer, Stadt Dresden 2016.....	84
Abbildung 51: Vergleich der Weglängenverteilungen, Stadt Dresden.....	85
Abbildung 52: Geschwindigkeitsverteilung Elberadweg (linkselbig) am Querschnitt Waldschlößchenbrücke (Strava Daten und Messungen aus 2016, RadVerS Daten 2018)	85
Abbildung 53: Aggregierte Geschwindigkeitsverteilung Elberadweg (linkselbig) am Querschnitt Waldschlösschenbrücke (Strava Daten und Messungen aus 2016, RadVerS Daten 2018)	86

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Ergebnisse Literaturrecherche Feldstudie/GPS-Daten im Radverkehr	8
Tabelle 2: Aufgezeichnete Sensordaten Smartphone-App RadVerS.....	23
Tabelle 3: Grenzwerte für die Moduserkennung	36
Tabelle 4: Bezeichnung der jeweiligen Radverkehrselemente	38
Tabelle 5: OSM - Attributwerte für das Map-Matching	42
Tabelle 6: Merkmalskombinationen für die Datenvorverarbeitung	45
Tabelle 7: Datenvalidierungsschema für einzelne aufgezeichnete Fahrten (bearbeitete Rohdaten)	45

1. Einleitung

Im Zuge der Bearbeitung des im Dezember 2017 beendeten Projektes „Mit Smartphones generierte Verhaltensdaten im Radverkehr (NRVP 06/2014)“ wurde bereits das große Potenzial von Bewegungsdaten für die planerische Praxis deutlich – es konnte eine valide Netzabdeckung und ein kalibrierbares Geschwindigkeitsniveau der GPS-Daten konstatiert werden.

Allerdings wurde in Zusammenarbeit mit dem Umweltbundesamt (UBA) und dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) auch festgestellt, dass bei der Nutzung von GPS-Daten von Radfahrenden detaillierte Informationen zum Radverkehrsverhalten unterschiedlicher sozio-ökonomischer Gruppen weiterhin fehlen. Es liegen zwar einerseits GPS-Massendaten vor oder sind vergleichsweise einfach zu erzeugen, diese bilden jedoch nur die Summe aller beteiligten Nutzer*innen ab. Informationen zum Radverkehrsverhalten beteiligter Einzelnutzer fehlen dagegen zumeist. Da bei der Analyse von GPS-Daten aus Datenschutzgründen häufig nur aggregiertes Nutzerverhalten abgebildet wird, liegen zu den Nutzer*innen beziehungsweise der zugrundeliegenden Nutzergruppe keine weiteren personenbezogenen Informationen vor. Somit fehlt an dieser Stelle das Bindeglied für eine umfassende Analyse der GPS-Daten. Vorliegende GPS-Datensätze, zum Beispiel des aktuell verwendeten Anbieters der Fitness-App „Strava“, können daher unter diesem Aspekt nur eingeschränkt auf Repräsentativität geprüft und in einem nächsten Schritt kalibriert werden.

Das vorliegende Projekt beinhaltet zur Minderung dieser Wissenslücke eine umfangreiche Feldstudie zum Radverkehrsverhalten verschiedener sozio-ökonomischer Nutzergruppen. Diese wird durch Befragungen (Revealed-Preference- sowie Stated-Preference-Erhebungen) wissenschaftlich vorbereitet und begleitet.

Zum einen wird durch eine Befragung eine empirisch belegte und wissenschaftlich hergeleitete multidimensionale Typologisierung von Radfahrenden erstellt. Zum anderen wird eine umfangreiche heterogene Probandengruppe mit unterschiedlichen sozio-

ökonomischen Ausprägungen mit Geräten für die Aufzeichnung ihrer Radrouten ausgestattet. Das auf diesem Weg erhobene Radverkehrsverhalten wird, gestützt durch kontinuierliche begleitende Befragungen, ausgewertet und anhand unterschiedlicher Indikatoren beschrieben. Damit werden Präferenzen einzelner Gruppen, z. B. im Hinblick auf Geschwindigkeit, Streckenlänge, Typ der Radverkehrsinfrastruktur, Fahrtzweck oder Routenwahl identifiziert.

Der Inhalt des vorliegenden Berichtes ist die an die Typologisierung (Bericht Teil 1) angeschlossene Feldstudie.

1.1 Ziel der Untersuchung

Durch das Forschungsvorhaben soll eine belegbare Typologisierung von Radfahrenden durch die Auswertung bestehender Ansätze und einer eigenen Online-Befragung erarbeitet werden. Diese behandelt Teil 1 des vorliegenden Abschlussberichts. Zudem soll die Typologisierung mit reellem Fahrverhalten verknüpft werden, um zu prüfen, welche Präferenzen den einzelnen Gruppen zugeordnet werden können. Die zugrundeliegende Feldstudie und deren Ergebnisse werden in diesem Dokument beschrieben. Die Untersuchungsmethodik Für das Forschungsvorhaben leiten sich aus der unter oben genannten Zielstellung folgende Arbeitsschritte ab:

Abbildung 1: Schematischer Projektablauf

2. Literaturrecherche

Neben einer Vielzahl von Veröffentlichungen im Rahmen von Stated Preference Studien zum Radverkehrsverhalten, welche in Teil I des Ergebnisberichts beschrieben werden, gibt es auch eine ganze Reihe von Revealed Preference Studien. Diese bilden tatsächlich realisiertes Verkehrsverhalten ab. Im Folgenden werden vor allem diejenigen Studien, welche sich der Methodik der GPS-Aufzeichnung bedienen, näher beschrieben.

2.1 Übersicht deutschsprachiger Studien zu GPS-Datennutzung im Radverkehr

Falkenberg, G et al. untersuchten schon im Jahr 2003, mit Hilfe von GPS verorteten Kameradaten in Verfolgungsfahrten, den Zusammenhang von Fahrgeschwindigkeit und Rahmenbedingungen auf mehr als 20 Radverkehrsanlagen. Diese Form der Nutzung hatte noch nicht den Anspruch große Datenmengen zu analysieren. Diese waren zu diesem Zeitpunkt wohl auch nicht verfügbar. Die Studie kann allerdings wohl als eine der ersten ihrer Art im Bundesgebiet gelten.

Schelewsky et al. fassten 2014 in „Smartphones unterstützen die Mobilitätsforschung“ erstmals Potenziale und Chancen einer smartphone-gestützten Datenerhebung zusammen. Hervorgehoben wird die Bedeutung alternativer Formen der Mobilitätsforschung vor dem Hintergrund zunehmend differenzierterer Nutzungsmuster mit unterschiedlichen Mobilitätsangeboten und der daraus folgenden Intermodalität. Hier können klassische Erhebungsmethoden, die vorwiegend auf erinnertem Verhalten basieren, nur selten die erforderlichen Details für die Abbildung einer Änderung der Mobilitätsgewohnheiten liefern.

Vor allem die gute Abdeckung im Bevölkerungsquerschnitt und das tägliche mit sich führen in Verbindung mit einer vielfältigen Sensorik macht das Smartphone zu einem idealen Erhebungsinstrument für Mobilitätsverhalten. Schelewsky macht allerdings auch deutlich, dass dies nur für die Prämisse gilt, dass Position von Smartphone und Besitzer identisch sind. [1]

Weiterhin weist er darauf hin, dass eine Verkehrsmittelerkennung anhand heuristischer Daten wie Geoinformationen und der internen Sensorik der Geräte möglich ist.

Weiter verweist er auf die Genauigkeit der GPS Sensorik. Unter ungünstigen Bedingungen beträgt diese 100m, im besten Fall jedoch zwischen 3 und 10m. Vor allem in Städten kann es aufgrund der Reflektion von Signalen an Häuserwänden in dicht bebautem Gebiet zu sogenannten Multi-Path-Errors kommen. [1].

Auch Groß et. al untersuchten Methoden zur Analyse von Radwegen mittels Humansensorik, dafür wurden die Probanden unter anderem mit Wearables¹ ausgestattet. Die aufgezeichneten Daten ließen Rückschlüsse auf das psychophysiologische Verhalten (Stress) zu. Mittels Videoaufnahmen konnten die Trigger für negative emotionale Einflüsse identifiziert und anschließend mittels GPS lokalisiert werden. Sie verweisen dabei auch auf den wachsenden Trend zum Self-Monitoring (Moma, 2014). Beim genutzten EmoMapping werden Räume durch die Emotionen der Raumnutzer kartiert.

Die Methodik basiert dabei auf der simultanen Verwendung von Helmkameras, Smartbands und GPS-Loggern. Aufgezeichnet durch das Smartband werden die Bewegungsrichtung entlang der Raumachsen (triaxiale Beschleunigung) sowie Außentemperatur und Hauttemperatur und der Hautleitfähigkeit. Im Zuge einer Teilstudie wurde ein Rundkurs von zwei Probanden befahren. An dieser Stelle zeigt sich aber, dass das Projekt bezüglich der Verwendung von Crowdsourcing eher Pilotcharakter besitzt und Aussagen zu Massendaten im Radverkehr nicht möglich sind. Der qualitative Nachweis, dass GPS Daten auch in der inländischen Forschung mittlerweile eine gewisse Relevanz besitzen, wird jedoch erbracht.

¹ Tragbare Endgeräte mit GPS-Sensorik, beispielsweise Pulsuhren.

2.2 Internationale Literatur zu GPS-Datennutzung im Radverkehr

Deutlich breiter aufgestellt als die nationale ist die internationale Literatur, was die Verwendung von GPS- Daten in Radverkehrsstudien betrifft. Krizek und Harvey begannen bereits im Jahr 2007 in Minneapolis mit der Untersuchung der Routenwahl in 938 Arbeitswegen von 51 unterschiedlichen Probanden. [2].

Broach et. al untersuchten fünf Jahre später schon 1449 Alltagsfahrten von 164 Personen, die mit Datenloggern erhoben wurden. Auch hier wurde im Nachgang ein Routenwahlmodell geschätzt. [3]. Wie auch in einer Studie aus dem Jahr 2011 von Carlton et al, welche 5000 Fahrten von 1083 Nutzern beinhaltete, wurde auch hier die Stichprobenziehung über eine Eigenselektion durch die Teilnehmer bestimmt. Es konnten folglich alle Nutzer teilnehmen, die Interesse hatten und die technischen Voraussetzungen (bspw. Besitz eines Smartphones) erfüllten. [4]

Dieser Umstand führte zu einer relativ homogenen Stichprobenzusammensetzung, mit einem stark erhöhten Anteil männlicher Nutzer. Ebenso konnten für die Parameter Einkommen und Bildungsgrad Werte oberhalb des Durchschnitts verzeichnet werden.[4].

Auch in weiteren umfangreichen Studien zum Beispiel im Jahr 2017 zu Reisezeiten, Wartezeit an Knotenpunkten und Straßensegmenten in Montreal, wurde auf App Daten zurückgegriffen. Auch hier wurde innerhalb der Stichprobe nicht nach unterschiedlichen Radfahrtypen unterschieden. Die Ergebnisse erfüllen also per Definition nicht zwangsläufig die Kriterien der Repräsentativität für Radfahrende im Allgemeinen oder die der potenziell Rad fahrenden Bevölkerung [5]. Jedoch ist anzunehmen, dass Wartezeiten und vor allem Reisezeiten als eine Funktion der Geschwindigkeit maßgeblich von Erfahrung und den physischen Voraussetzungen der Radfahrenden abhängen.

In einer weiteren Arbeit aus Victoria, Kanada wird dieser Zusammenhang besonders deutlich: Jestico et al untersuchten Daten des Sport-App-Providers Strava. Auch hier wurde in Verbindung mit den Strava Daten ein einfaches Routenwahlmodell geschätzt. Im Ergebnis war aber der Einfluss der Variable Steigung beispielsweise um den Faktor 10

geringer als der Einfluss einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 40km/h für Pkw-Fahrer. Beide Faktoren waren dabei negativ [6]. Für eine breite, nicht sportlich orientierte Nutzergruppe dürfte hingegen die vorhandene Steigung, außer an Zwangspunkten, einen deutlich höheren negativen Einfluss haben.

Auch Flügel et al. beschränken sich in ihrer Untersuchung der Einflussgrößen auf die Geschwindigkeit der Radfahrenden darauf, alle ca. 750 zur Verfügung stehenden Radfahrenden deskriptiv zu betrachten. So werden die Parameter „Geschlecht“, „Arbeit“, „Zugang zu einem Auto/Fahrrad“ zwar erhoben aber die mutmaßlich unterschiedlichen Fahrverhalten nicht betrachtet [7].

Verglichen mit den großen Haushaltsbefragungen System Repräsentativer Verkehrsbefragungen (SrV) und Mobilität in Deutschland (MiD) fehlen also in den aufgeführten Beispielen entweder die repräsentativ gezogenen Stichproben, was bei den heutigen Verbreitungswegen der Apps, der Zugangsvoraussetzung „Smartphonebesitz“ und der üblichen Bewerbung der Studien über Onlinekanäle oder Radverkehrsverbände nicht trivial lösbar scheint, oder eine sinnvolle Gewichtung der bestehenden Teilnehmer. Ersteres konnte zumindest durch Axhausen et al. im Jahr 2008 im Zuge der Zensuserhebung mit 4882 Teilnehmern in drei Schweizer Städten teilweise erreicht werden. Jedoch wurde auch im Zuge dieser Untersuchung nicht auf das potenziell stark differierende Radverkehrsverhalten verschiedener Gruppen von Radfahrer*innen eingegangen. Da es sich um eine generelle Erhebung zum Mobilitätsverhalten handelt, ist die Anzahl der Fahrten mit dem Fahrrad zudem vergleichsweise gering und räumlich stark verteilt. Es ist also nicht zwingend möglich für alle Altersgruppen oder Typen von Radfahrenden einen ausreichenden Stichprobenumfang zu finden [8].

Weitere Ergebnisse der Literaturrecherche sind in Tabelle 1 ersichtlich.

2.3 Fazit Literaturrecherche

Zusammengefasst lässt sich konstatieren, dass die Stichprobenzusammensetzungen in den unterschiedlichen GPS-Studien trotz z.T. gleichem Ziel, bspw. der Aufbereitung eines Routenwahlmodells, erheblich differieren. Dies verhindert zum einen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, zum anderen wird die Gesamtaussagekraft dieser Studien erheblich eingeschränkt. So ist die Schätzung eines Routenwahlmodells für den Radverkehr auf Basis einer sehr homogenen, männlich dominierten Stichprobe in seiner Aussagekraft eingeschränkt.

Aus der Literaturrecherche lassen sich damit für die folgende Feldstudie zwei hauptsächliche Forschungsziele ableiten:

- *Wie sieht eine repräsentative Stichprobenauswahl für das Untersuchungsgebiet und den Untersuchungsgegenstand aus?*
- *Ist eine Ableitung, beziehungsweise ein Nachweis von unterschiedlichen Typen des Radfahrverhaltens möglich?*

Tabelle 1: Ergebnisse Literaturrecherche Feldstudie/GPS-Daten im Radverkehr

Autoren	Ort	Jahr	Studienart	Studieninhalt	Anzahl Probanden	Anzahl Fahrten	Probandenziehung	Potenzieller bias	Fahrverhalten betrachtet?
Krizek, Harvey	Minneapolis	2007	RP	Route-Choice-Model für Pendler	51	938	Ja, Alter, Geschlecht, Wohnort	Kleine Stichprobe, nur Pendler	Nein
El Geneidy, Krizek	Portland	2007	RP	Predicting travel speeds along different facilities using GPS-Data	8	315 Segmente	Nein, Wissenschaftler fuhren selbst	Hoch, zu kleines N, keine Information zu Geschlechterverteilung, oder Einkommen	Zum Teil, aber bezogen auf unterschiedliche Infrastrukturtypen
Axhausen&Schüsler	Zürich, Genf, Winterthur	2008	RP	Identifying Trips and activities	4.882	Ca. 90.000	Ja, Zensus	Kleiner Bias, aber wohl weniger Radfahrten im Sample, da alle Modi vertreten	Nein
Menghini G., Axhausen, KW.	Zürich	2009	RP	Route Choice of Cyclists in Zürich	2435	2657	Ja, Zensus, aber nicht explizit für Radfahrende v	Möglich, da alle Verkehrsarten vertreten. Radfahrende können nicht explizit ausgewertet werden	Wegezähl je Woche, Geschwindigkeit, Wegelänge (Durchschn.)
Sener, Eluru, Bhat	Texas	2009	SP	Routenwahlverhalten in Texas, US	1612	6484	Nein, Coverage Bias	Nur bekannte Alternativen werden verwendet, die sind nicht gelabelt	Nein

Reddy, S.; Shilton, K.	Los Angeles	2010	RP/Fokus	Biketastic: Mapping and Sensing for better Biking	12	208	Nein, freiwillige Teilnahme	Hoch, Rekrutierung aus "Bike-Advocacies"	Nein
Charlton, Sall	San Francisco	2011	RP	Route Choice	338	2.777	Nein, demographische Daten optional	Eher regelmäßige Radfahrer und männlich (79%), Durchschnittsalter 34	Nein
Broach, Gliebe	Portland	2012	RP	Route Choice	164	1.449	Nein, keine Sportfahrten	Höheres Einkommen, höhere Bildung, Über dem Altersdurchschnitt	Nein
Segadilha, A.; Sanches	Sao Carlos (Brasilien)	2014	RP+SP	Analysis of bicycle commuter routes using GPS and GIS	49	?	Nein, freiwillige Teilnahme	Hoch, 80% Männer, nur 20% Frauen, 66% in der Altersgruppe zwischen 18 und 34 Jahren	Zum Teil, Infrastrukturpräferenzen
Casello, .; Usyukov, V.	Waterloo, Kanada	2014	RP	Modelling cyclists route choice based on GPS	400	724	Nein, freiwillige Teilnahme	Hoch sehr viele Experten, Geschlechterverteilung unbekannt	Nein
Jestico, Winters	Victoria	2016	RP	Mapping Ridership, Hochrechnungsverfahren anhand von Strava-Daten	3650	75.679	Nein	Hoch, Strava Daten, 79% Männer, stark sportlich eingefärbt, keine Tracks	Nein
Behrendt, F.		2016	RP	Why cycling matters for Smart Cities	80	?	Nein	Hoch, kleines N, keine Stichprobenauswahl	Nein
Flügel, Hulleberg, Fyri	Oslo	2017	RP	Empirical speed models for cycling in Oslo	721	50.000	Ja, Alter, Geschlecht,	Gering, Altersschnitt und Geschlecht sind nah	Nein

							Arbeitsplatz, Fahrzeugbesitz	am Bevölkerungsschnitt , Relation zwischen Alter und Geschwindigkeit ist non-linear	
Plazier, Weitkamp	Niederlande	2017	RP+SP	Anlyse von Motiven mit dem E-Bike zu pendeln	24	1.090	Ja, Geschlecht, Alter	12/12, 25-64 Jahre, Daten wurden von November bis April aufgezeichnet	zum Teil
Berardi, Rupi	Bologna	2017	RP	Analysis of bicycle travel speed and distances	1-5	300	Nein, nur Wissenschaftl er die selbst fahren	Hoch, N=1-3, starker Einfluss eines einzelnen oder mehrerer Fahrer	Nein
Strauß, Miranda- Moreno	Montreal	2017	RP	Speed and travel time at intersections	1.000	10.000	nein	Nicht abzuschätzen, Nutzerdaten und Wege sind nicht verknüpft.	Nein
Ghanayim, M.; Bekhor, S.	Tel Aviv	2018	RP	Modelling bicycle route choice using data from GPS- assisted household survey	221	545	Ja, Haushalts- befragung, aber nicht explizit für Radfahrer	Möglich, wenig Radfahrende, hoher Männeranteil (73%) und geringes Durchschnittsalter (33J.) bei den Radfahrenden	Nein

3. Methodik der Feldstudie

3.1 Erhebungsrahmen

Die Feldphase fand in den Monaten Mai und Juni des Jahres 2018 statt. In den konkreten Erhebungszeiträumen (23.5.-6.6. und 13.6.-26.6.) befanden sich zudem weder Feiertage noch Schulferien. Es ist also von Normalwochen nach den Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE) auszugehen [9]. Die Probanden waren nach einer freiwilligen Schulung zur Nutzung der Smartphones dazu angehalten, während ihrer zweiwöchigen Aufzeichnungszeit möglichst jede mit dem Fahrrad zurückgelegte Strecke aufzuzeichnen. Für Probanden, die keine Zeit hatten an den Schulungsterminen teilzunehmen, wurde ein Erhebungsleitfaden in pdf-Form verschickt. Der Untersuchungsraum war das Gebiet der Stadt Dresden mit den zugehörigen Umlandgemeinden. Teilnahmevoraussetzung war, dass die Probanden im Stadtgebiet wohnen und sich während der Erhebungsphase auch überwiegend in diesem aufhalten.

DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

Die Stadt Dresden ist die Landeshauptstadt des Bundeslandes Sachsen und mit ca. 550.000 Einwohnern auch die zweitgrößte Stadt des Bundeslandes². Der Ballungsraum Dresden umfasst ca. 770.000 Einwohner. Die Stadt erstreckt sich über eine Fläche von 32,48km². Die Topographie wird nach SrV insgesamt als flach eingeschätzt [10]. Dennoch birgt die Lage im Tal des Flusses Elbe Anstiege in Nord-Süd und Gegenrichtung von bis zu 100hm zwischen Talsohle und Höhenzug. Der Höhenzug im Norden und Nordosten der Stadt gehört zum Westlausitzer Hügel- und Bergland, der Süden wird dem Östlichen Erzgebirgsvorland zugeordnet. Naturräumlich wird die Stadt in die Großlandschaft „Sächsisches Hügelland und Erzgebirgsvorland“ eingeordnet³.

² https://www.statistik.sachsen.de/download/010_GB-Bev/Bev_Z_Gemeinde_akt.pdf

³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Dresden>

Klimatisch ist in den gewählten Erhebungsmonaten Mai und Juni mit 18,7°C bzw. 21,3°C durchschnittlicher Tageshöchsttemperatur zu rechnen. Es sind mit 6,5 und 6,7 Stunden Sonnendauer nach dem Juli zudem die sonnenreichsten Monate des Jahres. Dies ist vor dem Hintergrund der Wetterabhängigkeit des Radfahrens wichtig.

RADVERKEHR IN DRESDEN

Von den mobilen Einwohnern der Stadt Dresden werden im Mittel täglich 3,55 Wege zurückgelegt. Der Anteil der Radwege daran beträgt 12% (Abbildung 2). Im Binnenverkehr und für kurze Wege unter 3 Kilometern steigt dieser Anteil auf bis zu 19%.

Modal Split nach SrV 2013

Abbildung 2: Radverkehrsanteil in Dresden nach SrV 2013

In unterschiedlichen Altersgruppen wird das Fahrrad als Verkehrsmittel unterschiedlich häufig verwendet. Dies gilt auch für unterschiedliche Stadtteile bzw. Ortsamtsbereiche (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4).

Modal Split in Dresden nach Ortsamtsbereichen

Abbildung 3: Modal Split in Dresden nach Ortsamtsbereichen nach SrV 2013

Modal Split in Dresden nach Altersgruppen

Abbildung 4: Modal Split in Dresden nach Altersgruppen nach SrV 2013

Es zeigen sich sowohl lokale als auch lebensphasenbedingte Unterschiede bei der Nutzung des Fahrrades als Verkehrsmittel. Nachdem im Schulalter das Fahrrad noch vergleichsweise häufig genutzt wird, geht die Nutzungshäufigkeit mit zunehmendem Alter

tendenziell zurück. Das kann zum einen an steigenden Wegelängen und anderen Wegezwecken, aber auch an sich verändernden Lebensumständen liegen. Lokale Unterschiede in der Fahrradnutzung lassen sich durch die Einwohnerstruktur und die Art der Bebauung erklären. So beherrschen im Neubaugebiet Dresden-Prohlis vorwiegend Hochbauten aus den 1970er und 1980er Jahren das Stadtbild, die zwar nach 1990 renoviert und teilweise zurückgebaut bzw. abgerissen wurden, aber teilweise weiterhin wenig radverkehrsgeeignete Strukturen aufweisen. Die Bewohner des Stadtteils kommen aus unterschiedlichen eher niedrigeren sozialen Schichten und der Anteil an 1-Personen-Haushalten liegt bei fast 50%.⁴ Dementsprechend ist der Radverkehrsanteil eher niedrig. Im Szeneviertel Äußere Neustadt hingegen herrscht eine Blockbebauung mit großen Innenhöfen und geeigneten Stellplätzen für Fahrräder vor. Das Viertel wird durch größere Verkehrsachsen eingerahmt und nicht durchschnitten. Flächendeckende Tempo-30 Regelungen sorgen zudem für einen eher gemächlichen Verkehrsfluss. Die Einwohner des Stadtviertels sind in der Tendenz etwas jünger als der Durchschnitt und besser gebildet. Diese Faktoren können insgesamt als Indiz für den höheren Radverkehrsanteil angesehen werden.

Die Stadt Dresden verfügt über ein Radwegenetz von etwa 411 km Länge [11]. Im Jahr 2017 wurde zudem ein Radverkehrskonzept vorgestellt, welches einen deutlichen Netzausbau hinsichtlich Qualität und Quantität vorsieht.

RADVERKEHRSNETZ IN DRESDEN

Im Zuge der Umgestaltung von Straßen in den vergangenen Jahren ist in Dresden ein sehr umfangreicher, jedoch heterogener Bestand von straßenbegleitenden Radverkehrsanlagen entstanden. Darüber hinaus existieren im Straßennebennetz fast flächendeckend Tempo-30-Zonen. Auch die Freigabe von Einbahnstraßen in Gegenrichtung für den Radverkehr ist als nahezu flächendeckend zu bezeichnen. Der Datenbestand wies im Jahr 2014 etwa 43km Radfahrstreifen, ca. 26km Schutzstreifen, ca. 87km gemeinsame Geh- und Radwege sowie ca. 120km Radwege auf [11].

⁴ http://www.dresden.de/de/rathaus/ortsaemter/prohlis/c_02.php

3.2 Stichprobenziehung

Mögliche Teilnehmer an der Feldphase wurden über die vorangegangene Onlinebefragung akquiriert. In der initialen Befragungsphase gab es ca. 4000 positive Rückmeldungen aus dem gesamten Bundesgebiet auf eine Teilnahme. Ein abermaliges Anschreiben dieser 4000 Probanden zur Rückversicherung eines konkreten Interesses ergab 1400 Rückmeldungen, davon 500 aus dem Postleitzahlenbereich des Untersuchungsgebietes.

Ein Workshop mit Experten aus der Wissenschaft und Verkehrsplanung sprach sich für eine geschichtete Stichprobenziehung aus (Teilnehmerliste Anhang A.I). Um dem Forschungsgedanken einer Verknüpfung von Radfahrer*innen-Typ und Radverkehrsverhalten zu genügen, sind zunächst die im Berichtsteil „Typologisierung“ mittels Clusteranalyse gefundenen Typen zu gleichen Teilen in der Stichprobe zu verorten. Eine Aufteilung anhand der Häufigkeitsverteilung wurde durch die Experten verneint. Es wurde weiterhin empfohlen, dass sich unterscheidende Merkmalsausprägungen am besten in vergleichbar großen Gruppen untersucht werden sollten, da dies auch für einige statistische Verfahren bedeutsam sei.

Neben den vier Radfahrer*innen-Typen, die also je 25% der Stichprobe ausmachen, wird noch auf ein möglichst ausgeglichenes Geschlechterverhältnis im Gesamtpool sowie eine Besetzung aller definierten Altersklassen geachtet. Die Stichprobenziehung aus dem Pool der zur Verfügung stehenden Probanden stellt sich damit theoretisch wie in Abbildung 5 dar.

Abbildung 5: Schema Stichprobenziehung

Angestrebt werden jeweils gleich große Klassen, also 50 Personen von jedem Typ, 100 Frauen und 100 Männer, sowie je 40 Personen aus den fünf ausgewählten Altersklassen. Dies ist vor dem Hintergrund einer Onlineerhebung als Grundgesamtheit natürlich kaum realistisch zu schaffen. Es kam folglich zu einer Nach-Akquise in einzelnen Personengruppen.

Die verwendeten Altersgruppen sind in Anlehnung an die Lebensphasen [12]–[14] folgende:

- 16-29Jahre Auszubildende und Studierende
- 30-44Jahre Berufstätige 1, Kinderbegleitung
- 45-54Jahre Berufstätige 2
- 55-65Jahre Berufstätige 3
- 65+ Ruheständler

Die untere Altersgrenze für die Nutzung von Smartphone-Applikationen für die Erforschung von Verkehrsverhalten wird durch die Geschäftsfähigkeit der Proband*innen mit 14 Jahren markiert. Ab diesem Alter kann die jugendliche Probandin allein der Teilnahme an einer derartigen Studie zustimmen. Da die Erfassung von Bewegungsdaten bei Schülern besonderes Fingerspitzengefühl und einen auf starke Kommunikation ausgelegten Umgang mit dem Datenschutz benötigt, wurde im Zuge dieses Projektes aber aus Kapazitätsgründen auf eine explizite Einbindung dieser Zielgruppe verzichtet. Dies hat zur Folge, dass durch die genutzten Verbreitungsoptionen auch weniger Personen dieser Zielgruppe angesprochen wurden. Zur Teilnahme an der Feldphase erklärten sich nur vier Probanden zwischen 14 und 18 Jahren bereit. Die benötigte Gruppengröße wurde folglich nicht erreicht. Demzufolge wurde das Radverkehrsverhalten von Schülern im zukünftigen Forschungsbedarf verortet.

Die übrigen Klassen wurden in Anlehnung an die Lebensphasen „Ausbildung/Studium“, drei Phasen des Berufslebens und den „Ruheständlern“ gebildet. Die drei Phasen des Berufslebens sollen dabei die der Berufseinsteiger/Familiengründer, die der Etablierten und jene der älteren Radfahrer abbilden. Die Berufseinsteiger bzw. Familiengründer haben nach ihrer Ausbildung eventuell noch kein Auto, oder beginnen nach Jahren des Studiums und damit verbundenen kostenlosem ÖPNV-Zugang wieder mit dem Radfahren. Eine weitere Teilgruppe in diesem Altersbereich hat schon Kinder, die mit dem Fahrrad transportiert werden, oder selbstfahrend begleitet werden⁵. Die zweite Gruppe der Berufstätigen sind in ihrem Radverkehrsverhalten mutmaßlich entweder stark gefestigt oder verschieben ihr generelles Mobilitätsverhalten wieder mehr in Richtung aktive Mobilität, da Kinder in den meisten Fällen keiner Begleitung/Bringefahrten mehr bedürfen. Aus der Literatur steht zudem zu vermuten, dass diese Gruppe auch besonders aktive/sportive männliche Nutzer umfasst [3], [15]. Die dritte Gruppe der Berufstätigen markiert theoretisch den Wendepunkt der physischen Leistungsfähigkeit der Probanden.

⁵ Durchschnittsalter der Mutter beim ersten Kind beträgt in Sachsen 30,1 Jahre (Destatis) <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Geburten/Tabellen/GeburtenMutterAlterBundeslaender.html> ; aufgerufen am 16.04.2018

Ab dem 55. Lebensjahr treten die ersten signifikanten Veränderungen der physischen Leistungsfähigkeit auch bei sportlich aktiven Menschen auf (Leyk u. a., 2010). Von Interesse ist hierbei, ob sich dies auch im Radverkehrsverhalten widerspiegelt.

In der abschließenden Gruppe der Senioren tritt zusätzlich zum weiter sinkenden Leistungsvermögen eine gravierende Änderung der vergleichbaren Wegezwecke auf. Werden in den vorherigen Gruppen vor allem die Arbeits- beziehungsweise Ausbildungswege miteinander verglichen, entfallen diese in der betrachteten Personengruppe. Mutmaßlich steigen dafür die übrigen Wegezwecke, wie „Einkaufen“ oder „Freizeit“ bzw. „Sonstiges“ an.

Auf eine weitere Differenzierung hinsichtlich Bildungsgrad oder Berufsstand wurde vorerst verzichtet, um entstehende Klassen nicht zu klein werden zu lassen und eine statistische Vergleichbarkeit zu gewährleisten, ohne den Stichprobenumfang deutlich erhöhen zu müssen.

3.3 Stichprobenzusammensetzung

HAUPTSTICHPROBE

Die Stichprobenziehung erfolgte mehrstufig und ergab im Rücklauf das in den Abbildung 6 und Abbildung 9 ersichtliche Bild. Vorausgegangen war der schriftliche Kontakt mit den interessierten Probanden in Dresden mit der Bitte um kurze Antwort durch diese.

Abbildung 6: Geschlechterverteilung bei der Stichprobenziehung zur Feldstudie

Die Altersverteilung der gezogenen Stichprobe inklusive der Nacherhebung ist in Abbildung 7 zu sehen. Der höhere Anteil jüngerer Probanden vom Typ „passionierter Radfahrer“ ist durch den geringen Rücklauf innerhalb dieser Zielgruppe zu erklären.

Abbildung 7: Altersverteilung der Stichprobe (N=)

Da der Anteil der Ambitionierten Radfahrenden auch in der vorangegangenen Befragung am geringstem war, war es für diesen Typ nicht möglich die unterschiedlichen Altersklassen vollständig aufzufüllen. Daher wurde auf Kohärenz zwischen den Altersklassen geachtet.

VERGLEICHSSTICHPROBE

Um einen Vergleich zwischen der Stichprobe im Untersuchungsgebiet Dresden und möglicherweise unterschiedlichen Verhaltensweisen im übrigen Bundesgebiet zu ermöglichen wurde neben der geschlossenen Hauptstichprobe noch eine offene Teilnahme an der Erhebung ermöglicht. Hierbei wurden für die zweite Erhebungswelle auch alle Proband*innen angeschrieben, die sich aus dem übrigen Bundesgebiet bereit dazu erklärt hatten ihre Radfahrten aufzuzeichnen. Von den angeschriebenen Proband*innen nahmen 120 an der Vergleichsstichprobe teil.

3.4 Kommunikation

Die Kandidaten für die einzelnen Untergruppen wurden maßgeblich über die Teilnahme an der Onlinebefragung rekrutiert. Als Kommunikationskanäle dienten Facebook, Twitter, der Beschäftigtenverteiler der TU-Dresden, Verteiler des ADFC und diverse Annoncen in Tageszeitungen sowie Newsportale (Beispielsweise des MDR). Im Zuge der Onlinebefragung erklärten sich ca. 500 Personen aus dem Postleitzahlenbereich des Untersuchungsgebietes bereit an der Feldstudie teilzunehmen. Für eine gleiche Verteilung auf alle Altersgruppen waren jedoch vor allem die Senioren zu wenig vertreten, so dass eine Nachakquise nötig war. Diese fand im Zuge der Abschöpfung bekannter Probandenlisten des Forschungsbereichs und nochmaliger Zeitungsannoncen statt.

Vor der Feldphase fand ein einstündiger Einleitungsworkshop für die Probanden statt. Dabei wurde die Funktionsweise der Smartphone-App erklärt, der Hintergrund der Studie erläutert und Fragen zur Erhebungsdurchführung beantwortet. Weiterhin wurden Leihgeräte an diejenigen Probanden ausgegeben (Samsung Galaxy A5), die kein eigenes Smartphone zur Verfügung hatten.

Während der Feldphase sollten die Probanden zusätzlich zur elektronischen Datenaufzeichnung auch ein rudimentäres Fahrtenbuch führen, welches vor allem Besonderheiten, wie gefährliche Situationen oder ähnliches enthielt. Die Kommunikation bei Fragen oder Problemen erfolgte telefonisch oder via Email.

3.5 Untersuchungsdurchführung

Die genutzte Applikation

Die genutzte Applikation musste zwei grundlegende Funktionen erfüllen. Zum einen mussten Bewegungsdaten aufgezeichnet werden, zum anderen diese gespeichert und sobald Verbindung mit einem Drahtlosnetzwerk bestand auf Server der TU-Dresden übertragen werden. Diese eigentlich recht einfachen Anforderungen konnten nicht durch Apps aus dem Playstore bedient werden, da diese die Daten meist zunächst auf eigenen Servern zwischenspeichern. Dies sollte im Sinne des Datenschutzes vermieden werden. Folglich wurde eine bestehende App der Firma Cyface GmbH⁶ verwendet, diese wurde an ein Serverbackend des ZIH der TU Dresden angebunden und für den Zeitraum der Versuchsdurchführung als iOS und Android-Version mit dem Namen RadVerS⁷ gebrandet.

Die App wurde so einfach wie möglich gehalten. Zentrales Element ist der Startbildschirm mit dem großen Playbutton (Abbildung 8/2). Hier kann die Aufzeichnung gestartet und beendet werden. Vor Beginn der Aufzeichnung waren die Nutzer dazu angehalten den Wegezweck anzugeben. Dieser wurde möglichst einfach gehalten und nur in drei Kategorien untergliedert:

1. Einkaufen (Abgebildet durch einen Einkaufswagen)
2. Freizeit (abgebildet durch eine Eiswaffel)
3. Arbeit/Bildung (abgebildet durch eine stilisierte Fabrik)

Die Auswahl eines Wegezwecks stellte anschließend den neuen Standardwert dar, da vor allem beim Arbeiten der Weg ja immer bipolar als Hin-und Rückweg erfolgte. In Schulung und Erhebungshandbuch wurde zudem darauf hingewiesen bei etwaigen Wegeketten den Hauptwegezweck anzugeben und im Zweifelsfall die Aufzeichnung zu stoppen und eine neue zu beginnen.

⁶ Ausgründung der TU Dresden, Geschäftsführer Dr. Klemens Muthmann

⁷ Kurz für Radverkehrsverhaltens-Studie

Abbildung 8: Screendesigns und Grundfunktionalitäten der App

Nach Beendigung des Weges sollte die Aufzeichnung wieder über die Multifunktionstaste, die dann ein Stopp-Zeichen zeigt, beendet werden. Anschließend besteht bei bestehender Netzwerkverbindung die Möglichkeit, einen manuellen Upload der Daten zu starten.

Vor dem Aufzeichnen der ersten Fahrt ist ein Login notwendig (Abbildung 8/1). Dieser muss nur bei der ersten Nutzung nach der App-Installation durchgeführt werden. Die Proband*Innen bekamen dafür einen zufällig ausgewählten Login-Code sowie das dazugehörige Passwort zugesendet. Im weiteren Verlauf der Arbeiten wird der Login für die Identifikation der Nutzerdaten auf dem Server verwendet.

Nach dem Beenden der Aufzeichnung können diese im Menüpunkt „Messungen“ (vgl. Abbildung 8/3) eingesehen werden. Es bestand jedoch nicht die Möglichkeit eine Messung bzw. die gefahrene Strecke zu betrachten. Eine Löschung unbeabsichtigter Messungen ist jedoch möglich.

Die aufgezeichneten Daten

Im Zuge der Datenaufzeichnung werden von der Applikation die in Tabelle 2 aufgeführten Daten aufgenommen und gespeichert. Die hohe Aufzeichnungsfrequenz führt zu großen Datensätzen von mehreren 100 Megabyte, daher wird die Datenübertragung nur im

Drahtlosnetzwerk zugelassen. Die anschließende Datenübertragung auf den Server findet über Port 443 verschlüsselt statt.

Tabelle 2: Aufgezeichnete Sensordaten Smartphone-App RadVerS

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

DATENERFASSUNG/DATENSCHUTZ

Die Daten werden über herkömmliche Smartphonesensoren erfasst. Dies betrifft den GPS-Sensor, sowie das Accelerometer und das Gyroskop der verwendeten Geräte (vgl. Tabelle 2).

Folgende persönliche Daten wurden außerdem vor der Feldphase erfasst:

- Alter
- Geschlecht
- Beruf, Bildung
- Radfahrendentyp
- Wohnort

Bei allen Daten handelt es sich um Daten mit Personenbezug. Das sächsische Datenschutzgesetz kommt also ebenso zur Anwendung wie die europäische Datenschutzgrundverordnung (DSGVO). Die Probanden müssen demnach ihr Einverständnis mit der Erhebung und Verarbeitung der oben genannten Daten durch die

TU-Dresden zu Forschungszwecken erklären. Die Datenschutzerklärung findet sich im Anhang (A.II).

Die erfassten Daten können auf drei Arten auf einen Server der TU-Dresden übertragen werden:

1. Direkte, automatische Synchronisation über WLAN, via https//
2. Direkte Synchronisation über das Mobilfunknetz, via https//
3. Manuell über Auslesen auf dem Smartphone und anschließendes Einlesen in die Datenbank

Auf dem Server werden die Daten anschließend in einer PostgreSQL-Datenbank gespeichert.

3.6 Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung findet im Anschluss an die Datenerhebung via Querys und unter Nutzung eines Python-Plug-Ins in der verwendeten PostgreSQL Datenbank statt. Zur Plausibilisierung und Aufarbeitung der gewonnenen Daten sind dabei eine Reihe von Schritten notwendig. Der im Folgenden kurz beschriebene Ablauf wurde im Zuge des Projektes MOVEBIS und einer laufenden Dissertation entwickelt und in leicht angepasster Form für die Datenverarbeitung im aktuellen Projekt genutzt.

Abbildung 9: Ablaufschema Datenverarbeitung RadVerS

Die oben aufgeführten Schritte sind in dieser Form notwendig, da 200 Nutzer in zwei Wochen Erhebungsdauer im günstigsten Fall nach Gleichung 1 etwa 8400 Wege erbringen könnten.

$$\text{Anzahl Wege} = \sum_{t=1}^N S_{Nt} * t$$

mit S_{Nt} = Wege je Tag und Person

und t = Anzahl der Erhebungstage

(1)

Dies ist nur als etwaige obere Grenze zu verstehen, aber selbst bei einer deutlich konservativeren Schätzung von durchschnittlich einem Weg pro Tag und Proband, entstehen 2800 Einzelwege. Damit ist eine manuelle Datenaufbereitung ausgeschlossen. Die in Abbildung 9 illustrierten Schritte sind vor allem nötig, um die Ergebnisgüte des

Datensatzes auf einem hohen Niveau zu gewährleisten. Im Folgenden werden die Einzelschritte nochmals kurz beschrieben.

3.6.1 Datenimport

Der Datenimport erfolgt regulär automatisiert via sicherer Verbindung auf einen zertifizierten Server der TU-Dresden. Die Standardeinstellung der verwendeten Erhebungss Applikation lässt dabei eine automatisierte Synchronisation nur aus einem WLAN zu, damit das Datenvolumen der Nutzer nicht zu stark beeinträchtigt wird. Alternativ, kann die Synchronisation auch aus dem Mobilfunknetz heraus aktiviert werden. Die dritte Alternative betrifft vor allem ältere Nutzer mit Leihgeräten. Hier werden die Daten auf dem Gerät zwischengespeichert und anschließend manuell exportiert und als SQL-Dump in die bestehende Datenbank importiert. Alle verwendeten Methoden sind datenschutzkonform und den Teilnehmern der Feldstudie bekannt. Zur Identifikation der Probanden wurden zu Erhebungsbeginn eindeutige Login-Schlüssel verteilt und an die Probanden ausgegeben. Diese werden bei der Installation der App benötigt und im Verlauf der Datenerhebung an die Datensätze angehängt.

In einer weiteren lokalen Datenbank werden die persönlichen Daten der Probanden, wie Name, Geschlecht und Bildungsgrad, gemeinsam mit dem ausgegebenen Schlüssel gespeichert. Der Schlüssel liefert also die Verknüpfung zwischen Proband und zurückgelegtem Weg.

3.6.2 Filtern und Glätten der Daten

GPS-Daten haben im günstigsten Fall eine Genauigkeit von 3-10m. Auftretende Fehler sind normalverteilt um den eigentlichen Signalstandort. Es gibt dabei unterschiedliche Arten von Fehlern, die sowohl aufgrund der Sichtbarkeit der Satelliten am Horizont, als auch auf Basis von Fehlern in der Signallaufzeit sowie durch Reflektionen oder Signalbrechungen (Multipath-Effekte) entstehen. Diese führen dazu, dass einzelne Punkte als Ausreißer zu einer Verzerrung der weiteren Berechnungen wie bspw. Geschwindigkeiten und Beschleunigungen beitragen [16].

Gefiltert und geglättet werden dabei nicht die GPS-Daten (Lat, Lon), sondern die daraus resultierenden Geschwindigkeiten. Eine reine Glättung/Filterung über GPS-Daten führt zwangsläufig zu einer Veränderung des Routenverlaufs. Vor allem Richtungsänderungen werden deutlich „abgerundet“. Im Zweifelsfall führen die Trajektorien anschließend durch Häuserkanten oder ähnliches.

Als Grundlage für den Filter werden initial die Geschwindigkeiten zwischen zwei GPS-Punkten berechnet, da die GPS-Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Smartphones bereits unterschiedlich verarbeitet wird.

Die Berechnung erfolgt dabei nachfolgenden Formeln:

$$Lat_{RAD} = Lat_{GRAD} * \frac{\pi}{180} \quad (2)$$

$$Hav = 2 * R_{Erde} * \sin^{-1} \sqrt{\sin\left(\frac{Lat_2 - Lat_1}{2}\right)^2 + \cos Lat_1 * \cos Lat_2 * \sin\left(\frac{Lon_2 - Lon_1}{2}\right)^2} \quad (3)$$

$$V = \left(\frac{S}{t_2 - t_1} \right) \quad \text{mit} \quad S = \sum_{p1}^{pn} Hav_{1;n} \quad (4)$$

Wobei Formel (2) exemplarisch für den Breitengrad die Umrechnung der Koordinate von Grad in Bogenmaß beschreibt und Formel (3) die anschließende Berechnung der Großkreisentfernung (Haversine) zwischen zwei aufeinanderfolgenden Koordinaten. Die verwendete Methodik zur Entfernungsberechnung hat gegenüber der einfachen Euklidischen Distanz Genauigkeitsvorteile, die jedoch auf den geringen Abständen zwischen zwei Punkten beim Radverkehr nur einen sehr kleinen Mehrwert haben. Vielmehr ist diese Art der Berechnung für spätere Verwendungen der Methode für andere Verkehrsmodi entscheidend. Formel (4) beschreibt anschließend die Berechnung der Geschwindigkeit als Verhältnis von Weg zu Zeit. Wichtig ist hier die tatsächliche Berechnung und Implementierung der Zeitdifferenz, da die GPS-Punkte zwar nominell in

einer 1Hz Frequenz aufgezeichnet werden, sich aber reell deutlich größere Sprünge ergeben können.

Anschließend beginnt der eigentliche Filterprozess. Hierfür wird ein weiterer Parameter genutzt. Dieser heißt Accuracy, wird vom Smartphone zusammen mit den GPS-Daten ausgegeben und beschreibt den Radius des 68% Konfidenzintervalls um einen Punkt⁸, in Zentimetern. Das bedeutet bei einem Wert von 5000 liegen 68% der Punkte in einem Radius von 50m um den eigentlichen Standort der aufzeichnenden Person.

Für das Filtern wird ein gleitendes Zeitfenster verwendet. Bei diesem Vorgang wird für jeden einzelnen Punkt über den Verbleib im Datensatz oder dessen Substitution entschieden. Wenn der zu prüfende Wert von Geschwindigkeit und Genauigkeit („Accuracy“) einen Grenzwert (in diesem Fall ACC=5000 und v=25m/s) und zeitgleich die Differenz zum Mittelwert der Geschwindigkeit in einem Zeitfenster von ± 4 Punkten kleiner als die doppelte Standardabweichung ist, dann verbleibt der Punkt im Datensatz. Treffen diese Bedingungen (oder eine davon) nicht zu, dann wird für den geprüften Punkt die Geschwindigkeit durch den Mittelwert der Geschwindigkeit im Zeitfenster ersetzt. Mittelwert und Standardabweichung werden nach den folgenden Rechenvorschriften gebildet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k \quad (5)$$

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

Die Auswahl der Grenzwerte für Genauigkeit und Geschwindigkeit erfolgte nach empirischen Beobachtungen. Für die Geschwindigkeit wurden 25m/s gewählt, da diese eine Art Obergrenze für den städtischen Verkehr bilden. Lediglich auf Stadtautobahnen dürfte der motorisierte Individualverkehr höhere Geschwindigkeiten erreichen, setzt man regelkonformes Verhalten voraus. Gleichzeitig ist es als absolute obere Grenze für

⁸ <https://stackoverflow.com/questions/7441768/location-getaccuracy-what-this-function-do>

Geschwindigkeiten im Radverkehr zu verstehen. Selbst bei einer Bergabfahrt mit starkem Gefälle ist bei einem geübten Fahrer nicht davon auszugehen, dass dieser eine derart hohe Geschwindigkeit erreicht. Für den Parameter Accuracy wurde ein Wert von 5000 festgelegt. Der Umkreis von 50m um den Standpunkt der Datenerzeugung in mindestens 68% der Fälle erscheint nach Stichprobentests als sinnvoller Grenzwert.

Anschließend werden die Werte mittels einer Gauß'schen Funktion geglättet. Diese geht von einer Normalverteilung der Wertegewichte ausgehend vom Berechnungspunkt aus und wurde schon in früheren Studien verwendet [8].

$$\tilde{c}(t) = \frac{\sum_j (w(t_j) \cdot c(t_j))}{\sum_j w(t_j)} \quad (7)$$

$$w(t_j) = \exp - \frac{(t - t_j)^2}{2\sigma^2} \quad (8)$$

Gleichung (7) stellt dabei die Gewichtungsfunktion dar, Gleichung (8) die zugrundeliegende Gauß'sche Kernfunktion als Bewertungsfunktion.

3.6.3 Erkennung von Wegen

Aufgezeichnete Fahrten werden schon auf dem Nutzergerät anhand des Attributes „measurement_fk“ voneinander getrennt. Jedoch besteht die Möglichkeit, dass durch Fehlverhalten auf Nutzerseite eine Fahrt mehrere Wege im Sinne der Wegedefinition beinhaltet. Dies ist immer dann der Fall, wenn Nutzer die Aufzeichnung nicht nach einem abgeschlossenen Weg beendet haben, sondern diese beispielsweise über einen ganzen Tag lief. Dann beinhaltet ein „measurement“ mehrere Wege und gegebenenfalls auch Aktivitäten. Diese gilt es im Zuge einer Wegeerkennung zu trennen. Im Zuge der Wegeerkennung wird für jeden GPS-Punkt bestimmt, ob dieser Teil einer Aktivität (weil in Ruhe) oder eines Weges (weil in Bewegung) ist. Dabei trennen Aktivitäten Wege voneinander.

Für die Trennung der potenziell unterschiedlichen Wege innerhalb einer aufgezeichneten Fahrt können verschiedene Parameter genutzt werden. Dies sind beispielsweise Geschwindigkeits- und Zeitgrenzwerte, Richtungsänderungen oder Punktdichten. Eine Übersicht der Methoden bietet die Literatur [17]. Weitere Parameter und Verfahren finden sich in [8], [18], [19]. Dabei ist allen Verfahren eigen, einen Grenzwert in Form eines Zeitfensters zu verwenden. Dieses ist als fortwährend gleitendes Zeitfenster zu verstehen, indem weitere Parameter, beispielsweise Geschwindigkeiten oder zurückgelegte Entfernungen geprüft werden. Da Geschwindigkeit, Distanz und Punktdichte zumeist stark voneinander abhängig sind, hat eine Nutzung aller drei Parameter nur einen geringen Mehrwert, bei gleichzeitig steigendem Rechenaufwand. In der vorliegenden Arbeit wurde daher in Ansatz mit den Parametern Geschwindigkeit, Distanz und der Änderung der Richtungsvektoren verwendet.

Grundlegend für die Arbeit mit gleitenden Zeitfenstern ist zunächst die Definition der Fensterbreite. Die Literatur zeigt auf, dass verschiedene Fensterbreiten genutzt werden können. In vielen Fällen wurden 120 Sekunden als Zeit Grenzwert genutzt [20]–[23]. In weiteren Studien wurden allerdings auch höhere Grenzwerte von 180s bis 300s verwendet [24]. Für das gleitende Zeitfenster in der vorliegenden Arbeit wurden 180 Sekunden gewählt, da aufgrund separater Lichtsignalanlagen für Radfahrende und ggf. einer ÖPNV Bevorrechtigung zwei Minuten als zu geringes Maß für eine ausreichende Differenzierung zu Wartezeiten an Lichtsignalanlagen erscheint.

Da die verwendeten Eingangsgrößen jedoch sowohl während der Fahrt als auch während einer Aktivität streuen, erschweren sie die eindeutige Identifikation von Wegen. Aus diesem Grund wurde für die Wege-Segmentierung der Parameter τ , als eine Kombination der Eingangsgrößen, berechnet. Die Berechnung von τ erfolgt nach:

$$\tau_i = v_glatt_i * d_glatt_i * \frac{1}{\Delta head_glatt_i} \quad (9)$$

mit: v_glatt_i (geglättete) Geschwindigkeit am Punkt i
 d_glatt_i (geglättete) Distanz am Punkt i
 $\Delta head_glatt_i$ (geglättete) Änderung der Richtungsvektoren

$$d_glatt_i = \frac{1}{n} \sum_{k=-7}^n d_hav_i \quad (10)$$

$$\Delta head_glatt_i = \frac{1}{n} \sum_{k=-7}^n \Delta head_i \quad (11)$$

Die Parameter v_glatt_i (geglättete Geschwindigkeit) und d_hav_i (Haversinen-Distanz) sind Ergebnisse vorheriger Berechnungsschritte. Die Änderung der Richtungsvektoren ($\Delta head_i$) berechnet sich nach:

$$\Delta head_i = \begin{cases} |\dot{\alpha}_i - \dot{\alpha}_j| & \text{für } \Delta \dot{\alpha}_{ij} \leq 180 \\ ||\dot{\alpha}_i - \dot{\alpha}_j| - 360| & \text{für } \Delta \dot{\alpha}_{ij} > 180 \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 90 - \alpha & , \text{für } \alpha > 0 \cap \alpha \leq 90 \\ 360 - (\alpha - 90) & , \text{für } \alpha > 90 \cap \alpha \leq 180 \\ \sqrt{(\alpha - 90)^2} & , \text{für } \alpha \leq 0 \cap \alpha \geq -90 \cup \alpha < -90 \cap \alpha \geq -180 \end{cases} \quad (13)$$

Mit:

$$\alpha = ARCTAN2(x, y) * \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (14)$$

Und:

$$x = \cos\left(lat_j * \frac{\pi}{180}\right) * \sin\left(lon_j * \frac{\pi}{180}\right) - lon_i * \frac{\pi}{180} \quad (15)$$

Und:

$$\begin{aligned}
 y = & \cos\left(lat_i * \frac{\pi}{180}\right) \\
 & * \sin\left(lat_j * \frac{\pi}{180}\right) - \sin\left(lat_i * \frac{\pi}{180}\right) * \cos\left(lat_j * \frac{\pi}{180}\right) \\
 & * \cos\left(\left(lon_j * \frac{\pi}{180}\right) - \left(lon_i * \frac{\pi}{180}\right)\right)
 \end{aligned} \tag{16}$$

Nach der Berechnung des Parameters τ überprüft der Algorithmus dessen mittleren Wert im zuvor auf 180 Sekunden festgesetzten Zeitfenster. Liegt dieser unter einem bestimmten Grenzwert, so ist der GPS-Punkt Teil eines Weges. Liegt der durchschnittliche Parameterwert über einem bestimmten Grenzwert, ist der Punkt Teil einer Aktivität. Derartig erzeugte Wege, beziehungsweise deren GPS-Punkte, werden anschließend durch eine eindeutige ID benannt. Bei der Segmentierung ist darauf zu achten, in welcher Höhe τ gewählt wird. Im Zuge der Datenaufbereitung hat sich ein Wert von 3-3,5 als geeignet erwiesen. Sehr kleine, oder sehr hohe Werte sorgen dafür, dass die aufgezeichnete Fahrt in sehr viele Wege aufgeteilt wird, also sehr viele Aktivitäten bzw. Wege erkannt werden. Ein niedriger Grenzwert für τ führt dazu, dass innerhalb von Aktivitäten Wege erkannt werden könnten, ein hoher Grenzwert für τ führt dazu, dass in Wegen, beispielsweise an Lichtsignalanlagen, Aktivitäten erkannt werden. Der verwendete Grenzwert für τ gilt dabei jedoch nur für den Radverkehr. Durch den Einfluss der Geschwindigkeit ist beispielsweise bei der Anwendung der Methodik auf Fahrten des MIV ein eigener Grenzwert zu kalibrieren.

3.6.4 Verkehrsmittelerkennung

Die Erkennung von Verkehrsmitteln ist auf unterschiedliche Arten möglich. Methoden des maschinellen Lernens wie neuronale Netze oder Support Vector Machines sind robuste Klassifikatoren, die auf Basis eines hochwertigen Testdatensatzes die verwendeten Verkehrsmittel richtig einordnen. Dabei wird eine Genauigkeit von mehr als 80% richtiger Zuordnungen erreicht [25]. Da die Erhebung und das Labeling des Testdatensatzes sowie das Training eines Machine Learning Verfahrens nicht als Teil dieser Arbeit vorgesehen waren, wurde auf die regelbasierte, empirische Methode des Entscheidungsbaumes zurückgegriffen. Sie basiert im Wesentlichen auf der Bestimmung eines Verkehrsmittels

über ihm eigene Grenzwerte spezifischer Parameter und dem logischen Ausschlussverfahren. Da das vorrangige Ziel des Verfahrens die Erkennung von Radfahrten ist, nicht die Differenzierung der übrigen Verkehrsmittel, wird die Methode als hinreichend genau erachtet.

Die benötigten Kennwerte wurden in Analysen von vorliegenden, zum Großteil selbst aufgezeichneten Fahrten mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln empirisch ermittelt. Die Analyse zeigt, dass sich einige Kennwerte sehr gut zur Beschreibung unterschiedlicher Verkehrsmittel eignen. Dies sind unter anderem unterschiedliche Quantile der Geschwindigkeit und Beschleunigung, die Maximalgeschwindigkeit sowie die Wegstrecke oder der Umwegfaktor während einer Fahrt. Um das Verfahren möglichst schlank im Sinne des benötigten Rechenaufwandes zu halten, wurden lediglich die Daten des GPS-Sensors der unterschiedlichen Smartphones genutzt und auf eine Fusion mit anderen Sensoren, wie beispielsweise dem Accelerometer oder dem Magnetometer, verzichtet.

Abbildung 10: Mittlere Geschwindigkeiten unterschiedlicher Verkehrsmittel

Abbildung 10 zeigt, dass sich unterschiedliche Quantile der Geschwindigkeit prinzipiell eignen, um Verkehrsmittel voneinander zu unterscheiden. Auch deutlich wird, dass Maximalwerte der Geschwindigkeit sich nur bedingt dazu eignen unterschiedliche Verkehrsmittel zu unterscheiden, da diese ggf. auch nach der Filterung und Glättung noch von systemimmanenten Fehlern des GPS beeinflusst werden können (siehe dazu auch Abschnitt 2). Aus diesem Grund wird die Verwendung des 90% Quantils als sinnvoller erachtet. Beschleunigungen sind als Resultat der Geschwindigkeitsänderung von diesem Effekt noch deutlich stärker betroffen. Zusätzlich können Fahrtweiten und Umwegfaktoren beispielsweise für die Erkennung von Sportradfahrten genutzt werden. Dies beruht auf der These, dass Sportradfahrten zumeist nicht auf dem kürzesten Weg stattfinden, sondern bestimmter Parameter der Umgebung, wie beispielsweise einer besonders schönen, weil mit hohem Anteil an Grünanlagen ausgestatteten, Routen folgen. In vielen Fällen ist zudem im Sinne einer Rundfahrt der Startpunkt (zumeist die Wohnung der Probanden) auch der Zielort. In diesem Sonderfall strebt der Umwegfaktor, als Quotient aus zurückgelegter Strecke und kürzestem Weg zwischen Start und Ziel, gegen Unendlich.

Der verwendete Entscheidungsbaum basiert auf folgenden Kenngrößen der im vorangegangenen Schritt identifizierten Wege:

- 20%-Quantil der Geschwindigkeit des Weges
- 80%-Quantil der Geschwindigkeit des Weges
- 90%-Quantil der Geschwindigkeit des Weges
- Trip-Distanz
- Umweg-Faktor des Weges

Für die Erkennung der Verkehrsmittel wurden aufgrund einer möglichst einfachen Identifizierbarkeit folgende einbezogen:

- Modus 1 → Fuß
- Modus 2 → Rad-Sport
- Modus 3 → Rad
- Modus 4 → Rest (Kategorie für alle restlichen Verkehrsmittel)

In Abhängigkeit der Abfragen und den Ergebnissen der Einzelabfragen kann die Abfolge dieser schließlich zu einem „Ergebnisblatt“ des Entscheidungsbaumes führen. Hierbei ist

es sinnvoll möglichst leicht zu identifizierende Modi als erstes auszuschließen und anschließend in nach Schwierigkeit aufsteigender Reihung fortzufahren. Grafisch lässt sich dies wie folgt darstellen:

Abbildung 11: Entscheidungsbaum der Verkehrsmittelerkennung

Der Modus M ist also eine Funktion der Einzelargumente bzw. Ergebnisse der einzelnen Abfragen A, B, C, D und E, F also:

$$M = f(A, B, C, D, E, F)$$

Die Abfragen an den Knoten lauten wie folgt:

1. wenn $A = \text{wahr}$, dann $M = 1$, sonst 2.
2. wenn $B \cap (C \cup D) \cap F = \text{wahr}$, dann $M = 2$, sonst 3.
3. wenn $E \cap F = \text{wahr}$, dann $M = 3$, sonst $M = 4$

Mit:

$$\begin{aligned}
 A &= v_{80_{trip}} \leq \alpha_{M1} \\
 B &= v_{20_{trip}} \geq \alpha_{M2.1} \\
 C &= D_{trip} > \delta_{M2} \\
 D &= UF_{trip} > \gamma_{M2} \\
 E &= v_{90_{trip}} \leq \alpha_{M3} \\
 F &= v_{80_{trip}} < \alpha_{M2.2}
 \end{aligned}$$

Und:

$$\begin{aligned}
 v_{80_{trip}} &\text{ -- 80\%-Quantil der Geschwindigkeit des Trips} \\
 \alpha_{M1} &\text{ -- Grenzwert des 80\%-Quantils für Modus 1} \\
 v_{20_{trip}} &\text{ -- 20\% Quantil der Geschwindigkeit des Trips} \\
 \alpha_{M2.1} &\text{ -- Grenzwert des 20\%-Quantils für Modus 2} \\
 \alpha_{M2.2} &\text{ -- Grenzwert des 80\%-Quantils für Modus 2} \\
 D_{trip} &\text{ -- Distanz des Trips} \\
 \delta_{M2} &\text{ -- Grenzwert der Distanz für Modus 2} \\
 UF_{trip} &\text{ -- Umweg-Faktor des Trips} \\
 \gamma_{M2} &\text{ -- Grenzwert des Umweg-Faktors für Modus 2} \\
 v_{90_{trip}} &\text{ -- 90\%-Quantil der Geschwindigkeit des Trips} \\
 \alpha_{M3} &\text{ -- Grenzwert des 90\%-Quantils für Modus 3}
 \end{aligned}$$

Für die Grenzwerte zur Erkennung der unterschiedlichen Verkehrsmodi haben sich aus den Analysen von Beispielfahrten die Tabelle 3 stehenden Werte ergeben.

Tabelle 3: Grenzwerte für die Moduserkennung

Grenzwert	Wert	Einheit
α_{M1}	8,0	km/h
$\alpha_{M2.1}$	10,0	km/h
$\alpha_{M2.2}$	50,0	km/h
δ_{M2}	30,0	km
γ_{M2}	3,0	-
α_{M3}	35,0	km/h

Das Verfahren wurde iterativ mit stichprobenartiger Prüfung der Ergebnisse durchgeführt. So zeigte sich beispielsweise, dass die Grenzgeschwindigkeit für Radsportfahrten mit eingangs $v_{90} = 30 \text{ km/h}$ zu niedrig gewählt wurde. Daraufhin wurde der Wert auf 50 km/h angehoben. Eine detailliertere Beschreibung findet sich unter 3.7 im Kapitel „Validierung der Datenaufbereitung“.

3.6.5 Fahrtzustandserkennung

Um in der statistischen Auswertung der Wegeinformationen beispielsweise Beschleunigungen auswerten zu können, ist eine Erkennung des Fahrtzustandes sinnvoll. Dabei unterscheiden wir zwischen positiver Beschleunigung (Zustand 1), negativer Beschleunigung (Zustand 3), gleichförmiger Bewegung (Zustand 2) und einem Halt (Zustand 100). Hierfür werden jeweils im gleitenden Zeitfenster die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen analysiert. Bei Geschwindigkeiten unter $0,2 \text{ m/s}$ in einem Zeitraum unter 180 Sekunden wird von einem Halt ausgegangen. Für positive Beschleunigungen muss ein Grenzwert von $0,2 \text{ m/s}^2$ überschritten werden, um eine Abgrenzung zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung zu erreichen. Gleiches gilt für Bremsbewegungen. Diese werden ab einer Beschleunigung von $-0,2 \text{ m/s}^2$ als solche markiert. Geringere Schwellwerte wurden im Zuge der iterativen Algorithmenentwicklung erprobt und

verworfen, da sie aufgrund der GPS-Ungenauigkeit zu einer scheinengenauen Zuordnung führten.

3.6.6 Map-Matching

Um den Wegen auch eine Infrastruktur zuordnen zu können, ist es essentiell, sie auf ein vorhandenes Verkehrsnetz zu projizieren. Für das Untersuchungsgebiet Dresden lagen zum einen die GIS-Kartierung aus dem städtischen Dienst Cardo und zum anderen die Open Source Daten von OpenStreetmap (OSM) vor. Beide Datensätze wurden für das Map-Matching der GPS-Trajektorien verwendet.

Dieses Vorgehen liegt im Fakt begründet, dass gängige Matching-Werkzeuge standardisiert auf OSM und deren Attribute vorkonfiguriert sind. Ein Matching auf das Netz der Stadt Dresden hätte nach einem deutlich einfacheren Verfahren erfolgen müssen, da es nicht problemadäquat erscheint, für die Nutzung der Kartenbasis einer Stadt alle Attributwerte in den Konfigurationsdateien der Matching Algorithmen zu verändern. Gleichwohl birgt dieses Vorgehen zwei Probleme. Zum einen ist das OSM-Netz deutlich detaillierter als das städtische Netz, die Anzahl paralleler Kanten beträgt teilweise Faktor 3. Zum anderen ist die Art der Radverkehrsführung in OSM nicht zweifelsfrei und nachvollziehbar dokumentiert. Es war also notwendig, beide Netze miteinander zu verschneiden. Durch die unterschiedliche Detailliertheit sind die Netzelemente allerdings nicht kongruent, was das Verfahren zusätzlich erschwert. Dynamisches Puffern der Netzelemente des weniger detaillierten städtischen Netzes in Verbindung mit einer auf Parallelität und Länge basierenden Verschneidung mit den OSM-Netzelementen liefert hier letztlich die Lösung.

STRABENNETZERZEUGUNG

Im städtischen Netz wurde das erweiterte Straßenknotennetz (ohne die Detailstufe 5, d.h. nicht das feinmaschigste Netz) mit dem Geh- und Radwegnetz verschnitten (über das über alle drei Kartengrundlagen einheitliche ID-Feld).

An das Netz wurde eine für das Projekt relevante Typisierung der Radverkehrsinfrastruktur der jeweiligen Kante angehängen. Dafür existieren, wie Tabelle 4 dargestellt, 11 Kategorien:

Tabelle 4: Bezeichnung der jeweiligen Radverkehrselemente

Kurzbezeichnung	Bezeichnung	Aggregation aus VS_Typ bzw. Straßenwidmung	Nummer in Datenbank	Beschreibung
GW	Gehweg	FA_GW, GB	6	
RW	Radweg	FA_RW, RB	5	
GW_RWf	Gehweg, Radweg frei	FA_GR, GBR	7	VZ 239 + ZZ1022-10
GemRW_GW	Gemeinsamer Geh- und Radweg	FA_KR, KR, RG, FA_KF	8	VZ 240+241
Beruh	Verkehrsberuhigter Bereich	FA_FF, FA_FR, FA_FN	9	Fußgängerzonen, Plätze
HN	Hauptnetz	K, S, B, H, A, AA	1	Hauptstraße ohne Radverkehrsanlage
NN	Nebennetz	U, W, P, E, X, FW, PW, FA_AF	2	Nebenstraße ohne Radverkehrsanlage
MV_HN	Mischverkehr Hauptnetz	RS und Widmung wie HN	3	Radschutzstreifen auf einer Hauptstraße (VZ 237)
MV_NN	Mischverkehr Nebennetz	RS und Widmung wie NN	4	Radschutzstreifen auf einer Nebenstraße
No_Go	nicht passierbar	SB, DB, BB, PB	11	Das sind idR Bahnlinien
Sonst	Sonstige		10	Parkbuchten, Fährstrecken usw.

Um das entstandene Straßennetz wurde für jede Kante ein Puffer gelegt. Die Größe des Puffers ist abhängig von der Straßenwidmung (für Hauptstraßen 10m).

Die Kategorisierungen der Radverkehrsanlagen werden nun auf das OSM-Netz übertragen.

Dazu wird anhand der folgenden drei Bedingungen die Übereinstimmung zwischen OSM-Kanten und ESKN-Kanten vorgenommen:

- Schneidet die OSM-Kante die ESKN-Pufferkante
- Sind die Richtungen der beiden Kanten ungefähr gleich (ist der Schnittwinkel $< 45^\circ$)
- Liegt mindestens die Hälfte der OSM-Kante in der ESKN-Pufferkante

Treffen all diese Bedingungen zu, wird die Kategorisierung übernommen. Dabei kann es vorkommen, dass durch die höhere räumliche Auflösung (mehr Kanten) von OSM einige Kanten eines Straßenabschnitts die gleiche Kategorie bekommen. D.h. OSM modelliert einen Teil einer Straße mit zwei Netzkanten für die Tram, einer Kante für die Fahrbahn des MIV und zwei Kanten für die Gehwege. Das ESKN-Netz bildet diesen Sachverhalt mit nur einer Kante ab, die aber die Informationen für Rad, Fuß und Tram enthält. Durch die Verwendung des Puffers bekommen alle fünf Kanten des OSM-Netzes die gleichen Attribute aus dem ESKN-Netz. Diese Form des „Overengineering“ wird jedoch später durch die Routenwahl wieder ausgeglichen.

Im nächsten Schritt werden die Kategorien in OSM-typische Tags überführt und an die Kanten gehängt. Dabei wurde sich an den Leitfaden von OSM für die Kartierung von Radverkehrsanlagen gehalten.⁹

Das erzeugte Netz enthält vor allem in komplexen Kreuzungsbereichen Lücken. Deswegen wurde es mit dem Ausgangsnetz von OSM verschnitten, um die Lücken zu schließen und ein vollständiges Routing zu ermöglichen. Aus dem angehängten Ausgangsnetz wurden alle Tags entfernt, um den Informationsgehalt des städtischen Netzes darzustellen. Die ergänzten Netzelemente besitzen jedoch keine Informationen über die Führungsform des Radverkehrs und gehen daher als „nicht bekannt“ in die Auswertung ein, da eine manuelle Plausibilisierung auf Ebene eines städtischen Netzes deutlich zu aufwändig wäre.

⁹ https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Bicycle/Radverkehrsanlagen_kartieren

Abbildung 12: Puffer des ESKN-Netzes (violett) mit den OSM-Kanten, die die Bedingungen erfüllen (rosa)

Abbildung 13: Füllen der Lücken mit den restlichen OSM-Kanten (rot), um die topologischen Verknüpfungen zu bewahren.

Abbildung 14: Übrige Netzkanten, ohne notwendige Korrekturen

Das so entstandene Netz wird nun als Verkehrsgraph in Graphhopper importiert und über eine Map-Matching-Schnittstelle verarbeitet.

MATCHING

Aus der Datenbank werden alle nach der Datenaufbereitung validen Wege extrahiert. Aus der Datenbank werden nun alle Wegpunkte für die extrahierten Wege-IDs gefiltert und in GPX-Dateien umgewandelt. Dieser Schritt ist nötig, da Graphhopper dies als Eingabe der Punkte erwartet.

Jede GPX-Datei (jeder Trip in Dresden) wird mit einem angepassten Graphhopperprofil gematcht. Das Ergebnis wird anschließend in die Datenbanktabelle zurückgeschrieben. Dabei wird für jede Kante zwischen den einzelnen Knoten des OSM-Weges ein Eintrag erzeugt. Das heißt der Weg ist nicht so grob, wie es die standardmäßigen Way-IDs von OSM-Auszügen manchmal sind, sondern knotenfein. Dadurch kann die Wegelänge der zugrundeliegenden Fahrt nahezu fehlerfrei abgebildet werden, da die einzelnen befahrenen Straßenabschnitte viel kleinteiliger sind. Die Attribute sind in Tabelle 5 dargestellt

Tabelle 5: OSM - Attributwerte für das Map-Matching

Name	Typ	Erklärung
trip_id	text	Primärschlüssel der Fahrt
way_id	bigint	die befahrene OSM-Kante
node_from_id	bigint	OSM-Startknoten des Teilabschnitts
node_to_id	bigint	OSM-Endknoten des Teilabschnitts
n_id	bigint	eine eindeutige ID, über die die Belastung auf diesem Teilabschnitt aggregiert werden kann. Ähnlich der Way-ID, nur eben knotenfein
length	double precision	Länge der Kante von node_from_id zu node_to_id. Mittels HAV ¹⁰ gerechnet
type_category	smallint	Die Kategorisierung (siehe obere Tabelle)
trip_progress	smallint	ist im Grunde eine durchlaufende Nummer für den jeweiligen Trip in chronologischer Reihenfolge. Wird für die Primärschlüsselbildung benötigt.

Für den Parameter „type_category“ existiert zusätzlich der Wert 0. Dieser wird für alle knotenfeinen Kanten vergeben, für die keine Kategorisierung aus dem ESKN-Netz existiert.

¹⁰ Haversinenentfernung als Funktion in PostgreSQL

3.7 Validierung der Datenverarbeitung

Die Validierung der Datenaufzeichnung dient dazu, systematische Fehler zu erkennen. Dabei sind drei Fehlertypen zu unterscheiden:

- Gerätefehler
- Aufbereitungsfehler
- Und Nutzerfehler.

Diesen Fehlertypen können systematische oder zufällige Fehler zugrunde liegen. Ein systematischer Fehler ist dabei durch die Datenaufbereitung oder durch einen wiederkehrenden Fehler bei einem bestimmten Smartphonetyp gekennzeichnet. Zufällige Fehler betreffen zumeist das Nutzerverhalten. So kann beispielsweise der Wegezweck falsch angegeben werden, oder Wege können vom Nutzer falsch als solche klassifiziert werden.

3.7.1 Systematische Fehlerprüfung

Um einen ersten Eindruck der Aufbereitungsqualität zu gewinnen wurden zunächst quantitative Parameter für den Gesamtdatensatz betrachtet. Diese wurde anschließend stichpunktartig an mehr als 100 Fahrten visuell überprüft. In den weiteren Iterationsschritten wurden auch durch die verwendete Hard- bzw. Software erzeugte Fehler überprüft, sowie solche, die durch Nutzerfehler entstanden.

SEGMENTIERUNG/AKTIVITÄTENERKENNUNG

Um die Güte der Datenaufbereitung zu evaluieren wurde für unterschiedliche Kombinationen aus den in Tabelle 3 ersichtlichen Parametern für die Moduserkennung sowie den Spezifikationen von τ_i , und maximal möglichem Zeitsprung für die Trip-Segmentation der Datensatz initial berechnet. Das Verfahren wurde mehrstufig durchgeführt. Zunächst wurde der Datensatz für eine Parameterkonstellation getestet. Anschließend wurden die Merkmale „Tripinfos“ als Anzahl der entstandenen Trips im

Sinne der Wegedefinition, sowie die valide Zahl der Trips und die Anzahl anderer Verkehrsmittel aufgenommen und bewertet.

Die Merkmalskombination der unterschiedlichen Durchgänge der Datenaufbereitung sind in Tabelle 6 aufgeführt. Ziel war es zunächst, über die Anzahl der erzeugten Wege (Trips) und den Anteil als valide eingestufte Wege (Zeit größer als 30 Sekunden, mindestens 30 Trackpoints mit einer Genauigkeit von Mindestens 5000 und einer Mindestgeschwindigkeit von 0,2 m/s sowie einem τ_{GW} entsprechend der Merkmalskombination) diejenige Kombination zu finden, bei der die Prozentzahl valider Trips am höchsten ist. Das Maximum hierfür findet sich in Version v6 aus Tabelle 6.

MODUSERKENNUNG

Anschließend wurden aus der Datenbank diejenigen Datensätze gefiltert, die in der entsprechenden Version nicht dem Modus Rad zugewiesen wurden. Für diese Datensätze wurde die Moduswahl visuell und anhand des Studiums der Geschwindigkeits-Zeit-Diagramme überprüft. Daraufhin wurden beispielsweise die Grenzggeschwindigkeiten $\alpha_{M2.1}$ und $\alpha_{M2.2}$ angepasst, da viele Sportradfahrten vorher im Modus „sonstige Verkehrsmittel“ verortet wurden.

TIEFENPRÜFUNG

Nachdem sich in der ersten Iteration die Parameterkombination nach v6 als vielversprechend herausstellte wurden 100 Fahrten stichprobenartig mit der benannten Parameterkombination auf folgende Sachverhalte hin in QGIS manuell überprüft:

- Wird der aufgezeichnete Track sinnvoll in Trips segmentiert?
- Werden Aktivitäten korrekt erkannt?
- Wird das verwendete Verkehrsmittel korrekt erkannt?
- Ist der Track vollständig?
- Ist die Messung Teil eines Tracks?

Verwendet wurde dazu ein Python-Plug-In, mit dem einzelne Fahrten direkt aus der Datenbank ausgelesen und anschließend mit der gewünschten Parameterkombination in QGIS visualisiert wurden.

Tabelle 6: Merkmalskombinationen für die Datenvorverarbeitung

		Segmentation																			
Tabellen- prefix	Erstellungs- datum	Filtern und Glätten					Segmentation					Moduswahl					Tripinfos				
		Accuracy	Sigma	Speed [m/s]	Untere Grenz- geschwindigkeit [m/s]	Min. Track- points	Min. Tracklänge [s]	tau	Halt v- Grenz- wert [km/h]	Max. Zeit- sprung [s]	Beschl.- Grenzwert [m/s²]	v20- Quantil (Alpha2.1) [km/h]	v80- Quantil (Alpha2.2) [km/h]	v80- Quantil (Alpha1) [km/h]	v90- Quantil (Alpha3) [km/h]	Distanz (Delta2) [km]	Umwege- faktor (Gamma2)	Tripinfos	valide	valide [%]	davon andere VM
processed_v3		5000	10	25	0.2	30	30	3	0.5	60	0.1	10	-	8	30	30	3	19330	10599	54.83	2100
processed_v4	06.12.2018	5000	10	25	0.2	30	30	3	0.5	60	0.1	10	-	8	35	30	3	19330	10559	54.62	1453
processed_v5	06.12.2018	5000	10	25	0.2	30	30	3	0.5	60	0.1	10	-	8	40	30	3	16600	9808	59.08	1300
processed_v6	07.02.2019	5000	10	25	0.2	30	30	1	0.5	180	0.1	10	-	8	40	30	3	16330	9671	59.22	
processed_v7	07.02.2019	5000	10	25	0.2	30	30	3.5	0.5	180	0.1	10	-	8	40	30	3	19838	10783	54.36	
processed_v8	07.02.2019	5000	10	25	0.2	30	30	3	0.5	180	0.1	10	-	8	40	30	3	19001	10484	55.18	
processed_v9	19.03.2019	5000	10	25	0.2	30	30	3	0.5	180	0.1	10	50	8	40	30	3				

Tabelle 7: Beispielhaftes Datenvalidierungsschema für einzelne aufgezeichnete Fahrten (bearbeitete Rohdaten)

Measurement Device ID	Measurement ID	Trip Segment.	Mode Recogn.	Act. Recogn.	Anm.	Fazit	Tau 1,5
1766394C-8370-4658-92D1-1A017B6267F8	6	Jain 180 Sekunden und 220 Sekunden Pause führen zu Tripsplit	Ja, Rad	Ja, Schule, nein kurze Pause		Ja	ja
1766394C-8370-4658-92D1-1A017B6267F8	8	Ja, nicht segmentiert	Ja, Rad	Ja, nicht vorhanden		Ja	ja
1766394C-8370-4658-92D1-1A017B6267F8	10	Nein, Wegekette Kind zur Schule + Arbeit. Es kommt noch ein 3. Wegeteil ganz zu Beginn dazu.	Ja, Rad	Ja, Schule Kind		Nein	ja
1ce37edb-2840-472f-a772-7e4363282d87	2	Ja, nicht segmentiert	Ja, Rad	Ja, nicht vorhanden		Ja	ja
1ce37edb-2840-472f-a772-7e4363282d87	4	Nein, zu viele Segmente, da langsam und hohe Wartezeiten bei Straßenquerungen	Ja, Rad	Ja, Nicht vorhanden	Wartezeiten an LSA und langsame Geschw. führen zu Segmentierung	Nein	ja
1ce37edb-2840-472f-a772-7e4363282d87	10	Nein, zu viele Segmente, da langsam und hohe Wartezeiten bei Straßenquerungen	Ja, Rad	Ja, nicht vorhanden	mit tau = 1,5 funktioniert es	Nein	Ja
1d44686f-372d-467b-9bbf-4c4e6fe610e7	4	Nein, segmentiert an Straßenquerung	Ja, Rad	Ja am Anhang ein paar	mit tau = 1,5 funktioniert es	Nein	Ja
1d44686f-372d-467b-9bbf-4c4e6fe610e7	9	Ja, nicht segmentiert	Ja, Rad	Ja, Garten		Ja	Ja

Dabei wird der Parameter τ_{GW} zwischen 3,5 und 1,5 variiert um, etwaige Probleme segmentierter oder nicht segmentierter Wege deutlich machen zu können. Hierbei gilt: Je niedriger der Parameter τ_{GW} , desto weniger gut werden Aktivitäten erkannt. Stattdessen werden möglicherweise sogar Teile von Aktivitäten als Wege erkannt. Je höher der Parameter, desto eher wird ein Teil eines Weges oder einer Wegekette als Aktivität erkannt. Somit besteht die Gefahr, dass Wege durch Wartezeiten bspw. an Lichtsignalanlagen in zwei Trips zerschnitten werden, obwohl sie eine Sinneinheit bilden. Hierbei stellte sich heraus, dass gerade für den innerstädtischen Bereich mit eher langsamer Bewegung und vielen Halten ein Wert von 1,5 für den Parameter τ_{GW} ein Optimum darstellt. Für $\tau_{1,0}$ hingegen steigt wie in Tabelle 6 ersichtlich die Anzahl der erkannten nicht validen Trips stärker an.

Aus den initialen 100 überprüften Fahrten ergaben sich zwei weitere Kriterien für die Überprüfung:

- Technische Vollständigkeit
- Zusammenhang (Adjazenz)

Ein weiteres Kriterium für die Validität von Fahrten ist die Vollständigkeit im technischen Sinne. Während ersteres durch die Segmentierung im Zuge der Datenverarbeitung beeinflussbar ist, ist letzteres schon durch die Datenaufnahme determiniert wurden. Bei einigen Smartphonetypen sind werksseitige Abschalteneinrichtungen für die Sensoren verbaut, um den Akkuverbrauch zu minimieren. Den gleichen Effekt erzielen unter Umständen auch softwareseitige Energiespareinstellungen oder Apps, die den Akkuverbrauch minimieren. All diese Komponenten sorgen dafür, dass der aufgezeichnete Track nach einer bestimmten Anzahl von Sekunden nach dem Start einfach abreißt. Hierfür wurde ein Filter genutzt, der die Prozentzahl von Fahrten unter einem Grenzwert von fünf Minuten zurückgab. Der Schwellwert wurde dabei empirisch im Zuge des Validierungsprozesses ermittelt.

Abbildung 15: Verteilung der Smartphonehersteller unter den Proband*Innen mit Fahrten < 5 min

Die Dominanz des Herstellers Samsung ist einerseits mit dessen hoher Marktdurchdringung, andererseits damit zu erklären, dass die 25 an die Probanden ausgegebenen Leihtelefone aus zwei Modellen dieses Herstellers bestanden. Eine generelle Tendenz zu aufgrund von Akkusparverhalten abgebrochenen Aufzeichnungen lässt sich aus dem Filterprozess nicht ableiten. Das lässt die Hypothese zu, dass im Wesentlichen Softwarelösungen für den Aufzeichnungsabbruch verantwortlich sind. Auch einige Smartphones eher unbekannter Hersteller, wie Haier, Xiaomi und Cubot weisen eine erhöhte Anzahl an kurzen Fahrten auf (vgl. Abbildung 16). Dies ist möglicherweise aber auch auf Inkompatibilitätsprobleme mit gerätespezifischen Varianten des Betriebssystems zurückzuführen. Die Daten derjenigen Geräte mit auffällig hoher absoluter oder relativer Anzahl an Fahrten unter fünf Minuten wurden manuell überprüft. Geräte bzw. Fahrten unter dem Einfluss von Akkusparprogrammen wurden aus dem aufbereiteten Datensatz gelöscht, da Sie Parameter wie Fahrtweite oder Fahrtdauer stark beeinflussen und somit zu einer systematischen Verzerrung führen.

Device_Name	Telefontyp	Anzahl Trips unter 5min	Tripzahl Gesamt	Anteil
G55	Haier G55	142	239	59%
m0	Xiaomi M0	117	147	80%
j1xlte	Samsung Galaxy J1LTE	76	127	60%
grandprimelte	Samsung Galaxy GrandprimeLTE	67	105	64%
grandprimelte	Samsung Galaxy GrandprimeLTE	44	65	68%
E5823	Sony Xperia z5	32	67	48%
dream2lte	Samsung Galaxy S8+	30	51	59%
a3y17lte	Samsung Galaxy A3 2017	30	75	40%
p1	HomTom P1	27	65	42%
a5xelte	Samsung Galaxy A5 2017	26	61	43%
iPhone7,2	iPhone7	26	63	41%
a3xelte	Samsung Galaxy A3 2016	25	27	93%
klte	Samsung Galaxy S5	25	33	76%
a3lte	Samsung Galaxy A3 2016	25	50	50%
a3xelte	Samsung Galaxy A3 2016	23	32	72%
hwALE-H	Huawei P8 Lite	23	65	35%
CUBOT_MANITO	Cubot Manito	22	35	63%
a3y17lte	Samsung Galaxy A3 2017	22	56	39%
a3y17lte	Samsung Galaxy A3 2017	21	21	100%
a3y17lte	Samsung Galaxy A3 2017	19	23	83%
dream2lte	Samsung Galaxy S8+	19	24	79%

Abbildung 16: Absolute und relative Anzahl an Fahrten unter 5 Minuten nach Gerät

3.7.2 Prüfung auf zufällige Fehler

Neben den Fehlern, die durch die Datenaufbereitung entstehen können, sind weitere Nutzer oder Gerätefehler wahrscheinlich. Eine Reihe von Unplausibilitäten wurde durch Filterbedingungen abgefangen:

- Sportfahrten mit unter 10km Gesamtlänge wurden manuell geprüft (Verkehrsmittelfehler)
- Der Wegezweck Arbeit wurde an Wochenenden und zu ungewöhnlichen Zeiten (zwischen 22:00 und 04:00) separat überprüft (Wegezweckfehler)
- Der Wegezweck Arbeit wurde für Nutzer über 65 Jahren geprüft (Wegezweckfehler)
- Nutzer mit besonders vielen aufgezeichneten Fahrten wurden separat geprüft (Nutzerstreckenfehler)

WEGEZWECKFEHLER

Um in der Auswertung und Ergebnisdarstellung zwischen Wegezwecken unterscheiden zu können, ist es essentiell, dass diese ein hohes Vertrauensniveau aufweisen. Hierbei muss grundsätzlich auf die Sorgfalt der Nutzer vertraut werden. Jedoch kann Unachtsamkeit dazu führen, dass Wegezwecke nicht korrekt angegeben werden, wenn der Nutzer den Wegezweck vor dem Aufzeichnen eines neuen Weges nicht ändert. Für eine Validierung von Arbeitswegen sind zwei Vorgehensweisen denkbar. Zum einen kann der Wegezweck zeitabhängig überprüft werden. So ist der Wegezweck Arbeit an Wochenenden und nachts mit geringerer Wahrscheinlichkeit plausibel als an Wochentagen zwischen 5 Uhr und 22 Uhr. Weiterhin ist der Wegezweck Arbeit bei Proband*Innen über 65 Jahren unwahrscheinlich. Diese Wege wurden anhand der zeitlichen Kriterien gefiltert und manuell überprüft. Dabei wurden etwa zehn Prozent der Wege die dem Filterkriterium unterlagen manuell korrigiert.

Eine weitere Möglichkeit bietet sich wiederholendes Verhalten als Kriterium für einen Filter zu verwenden. Theoretisch sollte die Randsumme aller Arbeitswege über den Tag hinweg in etwa gleich sein. Da Arbeitswege jedoch partiell zu Wegeketten mit weiteren Wegezwecken wie Holen und Bringen von Kindern oder Einkaufen erweitert wurden oder beispielsweise nur der Hinweg aufgezeichnet wurde, ergibt sich nur in wenigen Fällen ein eindeutiges Muster. Das Filterkriterium Wiederholung wurde daher verworfen.

NUTZERSTRECKENFEHLER

Die Adjazenz beschreibt den Zusammenhang von Fahrten und kann durch Nutzerfehler negativ beeinflusst werden. Zwar wurden die Nutzer hinsichtlich der Aufnahme von Fahrten und Aktivitäten geschult und über unterschiedliche Wegezwecke aufgeklärt (via Erhebungsanleitung und mündlicher Schulung), aber ein Fehlverhalten kann dadurch nicht gänzlich ausgeschlossen werden. So hat beispielsweise eine Nutzerin bei jeder Wartezeit ihre Aufzeichnung beendet und beim Anfahren wieder neu gestartet. Dies stellt eine extreme Ausprägung eines Nutzerfehlers dar. Wahrscheinlicher sind gestoppte Aufzeichnungen durch eine missverstandene Wegedefinition. Eine streckenbezogene Stichpunktprüfung ist an dieser Stelle nicht unbedingt sinnvoll, da Zusammenhänge nicht

zwingend deutlich werden, daher muss ein alternativer Filter verwendet werden. Derartiges Fehlverhalten lässt sich am ehesten über die Anzahl an aufgezeichneten Messungen je Proband erkennen.

Dabei wurde als obere Filtergrenze die nach Gleichung 17 folgende ermittelt:

$$\vartheta = \sum_{i=1}^{14} w_i \quad (17)$$

Mit w_i = Wegezähl je Erhebungstag.

Für w_i wurde gerundet von drei Wegen je Tag ausgegangen. Bei 14 Tagen Erhebungsdauer ergibt sich demnach eine Prüfgrenze von 42 aufgezeichneten Messungen. Alle Probanden, bzw. deren Geräte, die mehr als 42 Messungen aufgezeichnet haben wurden demnach manuell auf Adjazenz der Fahrten getestet.

Adjazente Fahrten über mehrere Messungen konnten anschließend in einer weiteren Stufe nicht automatisiert umcodiert werden, da sowohl Parameter der zeitlichen als auch der räumlichen Distanz im Umkehrschluss auch zum Zusammenfügen korrekt getrennter Fahrten geführt hätten. Daher wurden die Fahrten aus dem Datensatz entfernt.

VERKEHRSMITTELFehler

Bedingt durch die Entscheidungskriterien für die Erkennung von Radsport-Fahrten ist eine Kombination aus systematischem Fehler und Zufallsfehler möglich. Da Radsportfahrten mithilfe der Bedingungen $v_{20} > 10$ Km/h und entweder einer Entfernung von 30 km oder einem Umwegfaktor von 3 erkannt werden, ist es möglich, dass Nutzer auf kurzen Strecken, die Halte vermeiden können und zügig anfahren aufgrund von Zwangsbedingungen im Straßennetz wie Brücken oder Über- bzw. Unterführungen über natürliche oder gebaute Barrieren hohe Umwegfaktoren aufweisen. Dies führt zu einer Einordnung in den Modus Sportfahrt, obwohl diese eigentlich nicht vorliegt.

Eine Möglichkeit, dies zu umgehen, ist ein Schwellwert für eine Mindestgeschwindigkeit (v_{85}). Diese würde aber Sportfahrten mit einem vergleichsweise geringen Geschwindigkeitsniveau, wie beispielsweise Mountainbiking, exkludieren. Daher ist auch

hier eine manuelle Überprüfung notwendig. Als Filterbedingung wurde zunächst eine Wegelänge von weniger als 10km angesetzt, da diese für Sportfahrten als zu kurz erscheint. Zum anderen wurde der Wegezweck zurande gezogen. Sportfahrten sollten in der Regel den Wegezweck Freizeit aufweisen. Tun sie dies nicht, wurde als nächstes auf die Geschwindigkeit (Durchschnitt und v_{85}) geachtet. War die Fahrt in Summe zu langsam, zu kurz und hatte einen anderen Wegezweck, wurde sie in den Modus Radfahrt umcodiert.

4. Ergebnisse

4.1 Allgemeine deskriptive Statistik

TEILNAHMESTATISTIK DER HAUPTSTICHPROBE

Von insgesamt 223 angeschriebenen Probanden in der Versuchsregion Dresden und innerhalb der beiden Versuchszeiträume haben 187 Probanden Daten nach Ende der Feldphase auf den Server hochgeladen. Dies entspricht einer Response Rate von 85%. Die hohe Response Rate ist zum einen bedingt durch das hohe Interesse der Probanden am Thema, zum anderen durch tägliche Erinnerungen per Email.

Abbildung 17: Altersverteilung der Proband*Innen während der Feldstudie

Die Altersverteilung der Proband*innen ist in Abbildung 17 dargestellt. Generell ist der Rücklauf bei männlichen Probanden etwas höher als der der weiblichen Probanden. Insgesamt zeigt sich auch, dass die Gruppe der Menschen über 65 im Vergleich zum demographischen Aufkommen unterrepräsentiert ist. Vergleicht man die Verteilung aber mit jener nach SrV 2013 (Abbildung 18), dann zeigt sich, dass die betreffende Kohorte auch in der Haushaltsbefragung deutlich seltener angibt das Fahrrad zu benutzen als jüngere Umfrageteilnehmer.

Abbildung 18: Altersverteilung der Radfahrenden nach SrV 2013 am Stichtag der Erhebung

Die Kohorten bis 16 Jahre sind innerhalb der Haushaltsbefragung durch das Prinzip der Klumpenstichprobe bedingt. So soll der gezogene Teilnehmer auch die Wege aller anderen Haushaltsmitglieder protokollieren. Das erklärt die vergleichsweise hohe Anzahl der Teilnehmer in den jüngeren Altersbereichen. Die genannten Altersklassen können bei einer Erhebung per Smartphone-App nur mit expliziter Zustimmung bzw. Einwilligung der Eltern in die Datenschutzerklärung angesprochen werden, dies gestaltet sich in der Praxis für Versuchsanordnungen zumeist schwierig. Weiterhin hätte der in diesem Alter wohl sehr geringe Smartphonebesitz eine deutlich höhere Anzahl an Leihgeräten nötig gemacht.

Diesen Hindernissen gegenüber steht die Tatsache, dass ein Großteil der Fahrten der bis Zehnjährigen durch die Begleitfahrten ihrer Eltern abgebildet werden, also nur die Zielgruppe zwischen 10 und 16 Jahren in der Stichprobe tatsächlich nicht repräsentiert ist.

Diese Zielgruppe der Schulmobilität stellt jedoch ein eigenes Themenfeld dar und sollte getrennt untersucht werden.

Abbildung 19: Verteilung der Proband*innen auf Radfahrtypen während der Feldphase

Der Rücklauf zwischen den unterschiedlichen Radfahrtypen ist ungleich verteilt. Wobei besonders die Gruppe der passionierten Radfahrer*Innen sogar einen höheren Rücklauf ausweisen, als anhand der geschichteten Stichprobenziehung eingangs vorgesehen. Additiv zur eigentlich vorgesehenen Ziehung wurden aufgrund des anfangs geringeren Rücklaufs noch zusätzliche Proband*Innen (n=23) um die Teilnahme an der Feldphase gebeten. Die Kriterien hinsichtlich Geschlecht, Alter und Radfahrtyp konnten jedoch nicht bei allen späteren Teilnehmern zu 100% auf die zum Auffüllen der einzelnen Schichten noch fehlenden Proband*innen abgestimmt werden. Da auch in der Nachziehung der Rücklauf der passionierten Radfahrer*Innen überdurchschnittlich hoch war, steigerte sich der absolute Rücklauf von vorgesehenen 50 Proband*Innen auf 60. Den geringsten Rücklauf verzeichnete die Gruppe der ambitionierten Radfahrer*Innen mit 74%. Grundsätzlich war zudem der Rücklauf bei männlichen Probanden etwas besser als bei weiblichen.

Abbildung 20: Verteilung der während der Feldphase genutzten Smartphones und deren Betriebssysteme (N=187)

Wie in Abbildung 20 ersichtlich, besaß die überwiegende Mehrheit der Proband*Innen ein eigenes Smartphone. Leihgeräte wurden überwiegend an ältere Teilnehmer*Innen sowie an Nutzer*Innen die ein Windowsphone besaßen ausgegeben. Auch auf iPhones mit einem Betriebssystem welches älter als iOS 5 war, war die Erhebungssapplikation nicht lauffähig. Auch bedingt durch den Fakt das alle Leihgeräte Samsung Smartphones mit einem Android Betriebssystem waren, ist Android das dominierende Betriebssystem.

Abbildung 21: Zusagen und erfolgte Teilnahmen nach Erhebungswelle

Die Teilnehmer*Innen mit einem iOS Endgerät konnten aufgrund eines Verzuges bei der Bereitstellung der Erhebungss Applikation im Apple-Store erst in der zweiten Erhebungswelle starten. Diese ist daher und durch die Nachrücker, die aufgrund von Nichtteilnehmern im ersten Erhebungsdurchgang nötig waren, auch systematisch bedingt umfangreicher als Welle 1 (vgl. Abbildung 21).

Nach der Datenaufbereitung der aufgezeichneten Fahrten wurden für die Hauptstichprobe gültige Datensätze von 180 Personen verwendet.

WITTERUNGSBEDINGUNGEN

Beide Phasen der Felderhebung waren durch warme Temperaturen gekennzeichnet, die in der ersten Feldphase den Mittelwert des Vorjahres leicht übertrafen, in der zweiten Feldphase jedoch unterliefen. Die wenigen vorhandenen Niederschläge fielen zudem zumeist in den Nachtstunden.

Abbildung 22: Witterungsverhältnisse während der Feldphase im Untersuchungsgebiet (2018)

Die Witterungsbedingungen wiesen in Summe somit keine Extrema gegenüber dem jahreszeitlichen Durchschnitt auf und können als fahrradfreundlich bezeichnet werden.

4.2 Statistik der Hauptstichprobe

Die Fahrtparameter werden hinsichtlich ihrer Charakteristik auf drei Ebenen ausgewertet. Als oberste Ebene dienen dabei die Radfahrer*innen-Typen und deren Wegezwecke. Danach erfolgt eine Auswertung nach Geschlecht und Altersgruppe. Dieses Vorgehen liegt in den Eingangshypothesen begründet, nach denen sich Fahrtparameter vor allem zwischen den unterschiedlichen Typen unterscheiden. Als weitere Auswertungsebenen werden daraufhin die nächst wahrscheinlicheren Unterscheidungsparameter verwendet.

WEGEHÄUFIGKEITEN

Die Wegehäufigkeiten wurden als mittlere Nutzungshäufigkeit einer Nutzergruppe ermittelt. Zusätzlich zum Mittelwert sind jeweils in den Diagrammen noch die Perzentile 0,1 und 0,9 sowie die Maximal- und Minimalwerte dargestellt.

Abbildung 23: Häufigkeit der Fahrradnutzung während der Felderhebung je Radfahrertyp über alle Wegezwecke

In Abbildung 23 wird ersichtlich, dass die Typen „Ambitioniert“ und „Funktionell“ sich zwar hinsichtlich der Häufigkeit der Nutzung von den Typen „Passioniert“ und „Pragmatisch“ unterscheiden, aber nicht in dem Maße, wie nach der initialen Onlinebefragung erwartet werden konnte. Über alle Typen ist die Spannweite der Nutzungshäufigkeit zudem in etwa gleich hoch. Einzig der Typ des Pragmatikers unterscheidet sich von den übrigen Typen durch eine etwas geringere Bandbreite.

Abbildung 24: Häufigkeit der Fahrradnutzung je Typ und Wegezweck

Eine Unterteilung der Nutzungshäufigkeiten auf Wegezwecke offenbart eine etwas deutlichere Abgrenzung der Nutzergruppen. So hat beispielsweise die Funktionelle Radfahrerin im Mittel einen geringeren Anteil an Arbeitswegen aufgezeichnet als die übrigen Typen. Auch der im Vergleich höchste Anteil von Freizeitwegen durch die „Passionierten“ Radfahrer*innen, war zu erwarten. Diese Erkenntnisse stehen in einer

Linie mit den Ergebnissen der Onlineumfrage zur Typologisierung. Eine weitere Diversifizierung ist allerdings nicht zu erkennen. Das überrascht insofern, dass beispielsweise die „Ambitionierte“ Radfahrerin einen deutlich geringeren Anteil an Arbeitsfahrten geäußert hatte und mehr Freizeitfahrten zu erwarten gewesen wären. Für die Dateninterpretation ist an dieser Stelle wichtig, dass Arbeitsfahrten nur an maximal 85% der Erhebungstage stattfinden konnten, dies also das erreichbare Maximum darstellt.

VERTEILUNG DER TAGESKILOMETER

Die Verteilung der zurückgelegten Tageskilometer wird zunächst separat für die einzelnen Proband*innen berechnet und dann über alle Teilnehmer*innen innerhalb einer Gruppe gemittelt. Grund dafür sind zum einen unterschiedlich hohe Fallzahlen je Proband*in und zum anderen unterschiedlich hohe Wegeanzahlen je Tag. Dies liegt in der Methodik der Datenverarbeitung begründet. Die Trip-Erkennung trennt Wegekettens automatisch, sobald diese durch eine Aktivität – beispielsweise einen kurzen Einkauf – unterbrochen werden. Somit kann es sein, dass ein Proband an einem Tag zwei Arbeitswege mit je zehn Kilometer aufweist und am nächsten Tag vier Wege mit je fünf Kilometer. Während im Durchschnitt damit einmal fünf Kilometer und einmal zehn Kilometer stehen ist die Zahl der Tageskilometer nahezu gleich und damit als Messgröße stabiler als eine durchschnittliche Wegelänge.

Wie in Abbildung 25 ersichtlich, sticht der Typus der „Ambitionierten“ Radfahrer*innen sowohl hinsichtlich durchschnittlicher als auch hinsichtlich maximaler Wegelänge deutlich hervor. Etwas überraschend ist die kaum vorhandene Differenzierung der übrigen Gruppen. Hier wäre zumindest bei den „Funktionellen“ Radfahrer*innen eine niedrigere durchschnittliche Wegeweite zu erwarten gewesen

Abbildung 25: Mittlere tägliche Wegelänge über alle Wegezwecke

Die mittlere tägliche Wegelänge nach Wegezweck verdeutlicht das eingangs angesprochene Phänomen nochmals, wie in Abbildung 26 ersichtlich. Sie beschreibt dabei den Mittelwert der Summen aller Wege mit Wegezweck Einkaufen über alle Tage an denen Wege dieses Wegezwecks zurückgelegt wurden.

Abbildung 26: Mittlere Tageskilometer nach Wegezweck und Typ siehe Bemerkung Abb. 24

Ambitionierte Radfahrer*innen legen innerhalb jedes Wegezwecks im Durchschnitt die höchsten Fahrtweiten zurück. Etwas überraschend sind die vergleichsweise hohen Fahrtweiten der Funktionellen im Wegezweck Freizeit.

GESCHWINDIGKEITSVERTEILUNGEN

Geschwindigkeitsverteilungen können in der Planungspraxis Aufschluss über nötige bauliche Unterscheidungen für unterschiedliche Verhaltenstypen geben. Dargestellt ist jeweils das 0,5-Perzentil und das 0,85-Perzentil der mittleren Geschwindigkeiten aller Fahrten der Proband*innen. Wie auch bei der Berechnung der radfahrertypspezifischen Tageskilometer werden die Geschwindigkeiten zunächst separat für die einzelnen Proband*innen berechnet und dann über alle Teilnehmer*innen innerhalb einer Gruppe gemittelt.

Abbildung 27: Mittlere Geschwindigkeiten der unterschiedlichen Radfahrertypen

Wie in Abbildung 27 zu erkennen, ist die durchschnittliche Geschwindigkeit des Typs der ambitionierten Radfahrer*innen etwas höher als die der übrigen Gruppen. Jedoch sinkt der Grad der Differenzierung bei Betrachtung des 85%-Perzentils schon deutlich. Die übrigen Typen sind hinsichtlich ihrer Geschwindigkeiten als eher homogen zu betrachten. Die Maximalwerte der „Ambitionierten“ zeigen jedoch, dass sehr sportive Fahrer*innen vor allem dieser Gruppe zuzuordnen sind. Etwas überraschend kommen anschließend die Pragmatiker*innen, welche zudem eine vergleichsweise große Spannbreite an Werten aufweisen.

Bei der Auswertung nach dem Geschlecht der Proband*innen stellte sich erwartungsgemäß eine leicht höhere Durchschnittsgeschwindigkeit für v_{50} und v_{85} der männlichen Probanden heraus.

Abbildung 28: Mittlere Geschwindigkeit je Geschlecht, Hauptstichprobe

Ebenfalls in Abbildung 28 ersichtlich ist eine etwas größere Homogenität der Geschwindigkeit der Probandinnen – gleichwohl auch hier recht hohe Maximalwerte erreicht werden. Abbildung 29 zeigt, dass im Zuge der Auswertung nach Typ und Geschlecht die Unterschiede zwischen Ambitionierten und den übrigen Gruppen bei Frauen stärker zu Tage treten als bei Männern. Deutlich zeigt sich auch, außer für den Typus der funktionellen Radfahrerin, eine deutliche höhere Homogenität der Geschwindigkeit innerhalb der Typen. Der Typ des funktionellen Radfahrers jedoch zeigt die höchste Homogenität innerhalb der männlichen Nutzer.

Abbildung 29: Geschwindigkeiten nach Geschlecht und Typ

Noch deutlicher treten Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Altersgruppen zutage (vgl. Abbildung 30). Hier zeigt sich für den Durchschnitt ein degressiver Verlauf mit zunehmendem Lebensalter der Proband*innen. Gleichzeitig ist vor allem in der Altersgruppe der 16-29-Jährigen der Maximalwert stark ausgeprägt, während sich beim 90%-Perzentil der Verteilung kaum Unterschiede zu den anderen Altersklassen ausmachen lassen.

Abbildung 30: Mittlere Geschwindigkeiten nach Altersklasse, Hauptstichprobe

Der altersbedingte Geschwindigkeitsrückgang trifft allerdings nicht alle Typen gleichermaßen, wie Abbildung 31 zeigt. Während „Ambitionierte“ Radfahrer*innen auch im hohen Alter noch ein vergleichsweise hohes Geschwindigkeitsniveau aufweisen, sinkt dieses für die Pragmatiker*innen und die Funktionellen in der Altersklasse ab 65 rapide. Hierzu sei allerdings angemerkt, dass diese auch die ältesten Teilnehmer der Stichprobe mit bis zu 88 Jahren enthielten.

Während Pragmatiker, Funktionelle und Ambitionierte, abgesehen von den Radfahrenden über 65 Jahren, recht stabile Geschwindigkeitsplateaus bilden, ist bei den Passionierten Radfahrer*innen eine negative lineare Korrelation zwischen Alter und Geschwindigkeit erkennbar.

Für die Interpretation von Abbildung 31 ist zudem wichtig zu wissen, dass diejenigen Untergruppen ohne Darstellung der Perzentile 0,1 und 0,9 weniger als zehn Proband*innen enthielten und damit keine sinnvollen Perzentile gebildet werden

konnten. Eine weitere Aufteilung in Typ, Alter und Geschlecht erscheint vor diesem Hintergrund nicht sinnvoll.

Abbildung 31: Mittlere v50 nach Typ je Altersgruppe, Hauptstichprobe

Neben den persönlichen Parametern der Proband*innen ist zudem ein Einfluss der Wegezwecke auf die Fahrtgeschwindigkeit naheliegend und kann, wie in Abbildung 32 dargestellt, auch nachgewiesen werden. Die Arbeitswege weisen über alle Typen eine höhere Mediangeschwindigkeit auf, als die Wegezwecke Einkaufen und Freizeit.

Abbildung 32: Mediangeschwindigkeiten je Typ nach Wegezweck

BESCHLEUNIGungsverhalten

Im Laufe der Untersuchung zeigte sich, dass das Beschleunigungsverhalten als abhängige Größe von Zeit und Geschwindigkeit teilweise starken sensorbedingten Schwankungen unterliegt. Gerade bei schlechterem GPS-Empfang sind die Beschleunigungsdaten, trotz Glättung der Geschwindigkeiten, durch weiterhin vorhandene Ausreißer nur schwer interpretierbar. Dies schränkt die Belastbarkeit der maximalen Beschleunigungswerte deutlich ein. Immerhin die stärker aggregierten Mittelwerte geben einen soliden Überblick über sich veränderndes Beschleunigungsverhalten. Die verwendeten Perzentile der Beschleunigung sind dabei abhängig von der Wegelänge und der Anzahl der nötigen Anfahrvorgänge. Beispielsweise kann ein kurzer, innerstädtischer Weg aufgrund häufiger Halte- und Anfahrvorgänge einen recht hohen Wert für das 0,95-Perzentil (a_{95}) der Beschleunigung aufweisen, während ein längerer Weg außerhalb bebauten Gebiets

aufgrund langer unbehinderter Fahrtphasen einen vergleichsweise niedrigen Wert für die a_{95} aufweist, da die Anfahrvorgänge erst bei einem 0,99-Perzentil erfasst werden.

Nun ist es aber aufgrund möglicher Ungenauigkeiten durch GPS-Sprünge nicht möglich einfach das 0,99-Perzentil zu verwenden, da bereits wenige solcher Sprünge bei einer kurzen Fahrtstrecke ausreichen, um den Wert zu verfälschen. Abhilfe schafft hier die Identifikation von Fahrtzuständen.

Abbildung 33: Mittleres 0,95-Perzentil der Beschleunigung je Typ, Hauptstichprobe

Auch wenn nur die jeweils positiven oder negativen Beschleunigungszustände der Radfahrenden für die Berechnung der jeweiligen Perzentile herangezogen werden, ist das Ergebnis dennoch erstaunlich homogen. Das Beschleunigungsverhalten der Proband*innen liefert kaum Ansätze für eine sinnvolle Differenzierung der Typen.

Abbildung 34: Mittlere Beschleunigungspercentile je Geschlecht, Hauptstichprobe

Betrachtet man jedoch die Verteilung der Beschleunigungspercentile nach Geschlecht, wird vor allem für das 95%-Perzentil ein Unterschied deutlich (vgl. Abbildung 34). Der Ausreißer bezüglich des Maximalwertes bei den weiblichen Probanden deutet auf einen Erfassungsfehler, eine sehr sportive Fahrerin oder die Nutzung eines Pedelecs hin.

Bei der Unterscheidung nach Altersgruppen, wie in Abbildung 35 dargestellt, wird auch hier der Effekt sinkender Werte mit steigendem Alter – vergleichbar mit demjenigen der Geschwindigkeiten – deutlich.

Abbildung 35: Beschleunigungspercentile nach Altersgruppen, Hauptstichprobe

Der beschriebene Effekt schwindenden Beschleunigungsvermögens zieht sich dabei durch alle Radfahrer*innen-Typen gleichermaßen, wie in Abbildung 36 zu erkennen ist. Zudem wird auch der Effekt des Ausreißers bei den Maximalwerten des 95%-Beschleunigungspercentils zunehmend deutlich und lässt sich auf den Typ der Funktionellen Radfahrer*in im Alter von 30-44 Jahren eingrenzen. Der Stichprobenumfang beträgt in dieser Gruppe zehn Fahrer. Damit ist der Einfluss durch eine Probandin beim 90%-Perzentil natürlich sehr hoch.

Abbildung 36: 95%-Perzentil der Beschleunigung je Typ nach Alter, Hauptstichprobe

Abbildung 37: 95%-Perzentil der Beschleunigung je Typ und Wegezweck, Hauptstichprobe

Betrachtet man das Beschleunigungsverhalten spezifisch nach dem Wegezweck wird, wie in Abbildung 37 ersichtlich, deutlich, dass der Wegezweck „Arbeit“ zu einer erhöhten Beschleunigung führt. Offen ist jedoch, ob dies an zeitlichen Restriktionen liegt, die Nutzer*innen also möglichst schnell auf Arbeit kommen wollen, oder ob innerstädtisch aufgrund von Lichtsignalanlagen oder Vorfahrtsregelungen auf diesen Wegen grundsätzlich häufigeres Beschleunigen nötig ist.

FLÄCHENWAHL

Neben den dynamischen Fahrtparametern können die Proband*innen auch die Wahl der genutzten Verkehrsflächen über ihre Routenwahl beeinflussen. Auch hier war die Eingangsthese, dass die unterschiedlichen Typen sich hinsichtlich der Wahl der Radverkehrsinfrastruktur unterscheiden.

Wertet man die Daten nur typenfein aus, ist dies jedoch nicht der Fall. Vielmehr spricht das Ergebnis nach Abbildung 38 dafür, dass alle Typen gleichermaßen die beste zur Verfügung stehende Infrastruktur nutzen.

Die Kategorie Mischverkehr in den folgenden Abbildungen meint die Führung mit dem MIV als Schutz- oder Radfahrstreifen

Abbildung 38: Mittlerer Anteil der genutzten Radverkehrsinfrastruktur an der Gesamtweglänge

Diese Erkenntnis liegt in einer Linie mit den geäußerten Vorzügen der Proband*innen in der Onlinestichprobe. Hierbei wurden alle Anlagentypen außer dem freigegebenen Gehweg durch die Befragten ähnlich bewertet. In der Feldstudie wiederholte sich dieses Bild, einzig die unterschiedliche Auffassung zu den freigegebenen Gehwegen (Z239+ZZ) zeigt sich hier nicht. Auch eine Unterscheidung nach Wegezweck ist kaum zu erkennen.

Abbildung 39: Mittlerer Anteil genutzter Infrastruktur nach Wegezweck

Bedingt durch die Lage von Einkaufsmärkten kann hier ggf. der höhere Anteil an der Nutzung von Nebenstraßen erklärt werden.

Abbildung 40: Mittlerer Anteil genutzter Infrastruktur nach Alter, Hauptstichprobe

Wertet man die Nutzung der Infrastrukturelemente nach Alter aus, zeigt sich für die Gruppe der Schüler, Studenten und jungen Berufstätigen bis 29 Jahre ein deutlich höherer Anteil an Anlagennutzung in Verbindung mit der Meidung des Nebennetzes. Möglicherweise liegt das an den Zielen, wie der Universität, die am Hauptstraßennetz in Verbindung mit Radverkehrsanlagen liegt. Eine weitere Erklärung könnte eine höhere Affinität zur schnellsten Reisezeit liefern.

4.3 Statistik der Vergleichsstichprobe

Die Vergleichsstichprobe wurde auf freiwilliger Basis in der gesamten Bundesrepublik erhoben. Der Stichprobenzeitraum war ebenso der 11.6.-24.6.2018, wie auch die zweite Welle der Hauptstichprobe. Denjenigen Teilnehmern die in der Onlineumfrage ihre Bereitschaft für eine Teilnahme an der Feldstudie erklärt hatten, wurden die Teilnahmeunterlagen und Login-Codes per Mail zugesandt. Obgleich einige Teilnehmer freiwillig länger aufgezeichnet hatten, wurde nur Aufzeichnungen aus dem oben genannten Zeitraum verwendet.

Abbildung 41: Verteilung der Proband*innen der Vergleichsstichprobe auf das Bundesgebiet

Wie in Abbildung 41 ersichtlich verteilt sich die freiwillige Vergleichsstichprobe unterschiedlich auf 13 Bundesländer, mit einer starken Ballung im westlichen Teil der

Bundesrepublik. Letztlich wurden von 119 Proband*innen verwertbare Daten auf die Server hochgeladen und anschließend ausgewertet.

Abbildung 42: Verteilung der Radfahrenden nach Alter und Geschlecht, Vergleichsstichprobe (N=120)

Die Altersverteilung der Vergleichsstichprobe zeigt, dass vor allem ältere Radfahrer*innen dem Erhebungskonzept mit Smartphones skeptisch gegenüberstehen, oder durch dieses gar nicht erst angesprochen werden, so zusätzliche Anreize fehlen. Es zeigt sich die typische Ausprägung von GPS-Stichproben die einer Selbstauswahl unterliegen. Ein niedriger Frauenanteil (32%) und eine starke Fokussierung auf den Altersbereich zwischen 30 und 54 Jahren.

Abbildung 43: Verteilung der Radfahrenden nach Typ und Geschlecht, Vergleichsstichprobe (N=120)

Auch hinsichtlich der Verteilung der Radfahrer*innen-Typen ist eine Selektion hin zu „Passionierten“ und „Pragmatikern“ zu beobachten. Während die „Passionierten“ genau wie auch die „Ambitionierten“ durch ihre hohe, themenspezifische Motivation für vergleichsweise hohe Teilnehmerzahlen sorgten, überrascht die hohe Zahl an Pragmatikern die freiwillig an der Feldstudie teilnahmen eher.

WEGEHÄUFIGKEIT

Der Vergleich mit der Hauptstichprobe verdeutlicht den möglichen Einfluss der Studienbegleitung und der Incentivierung. Im Mittel liegen die prozentualen Anteile der Vergleichsstichprobe mehrere Punkte unter denen der Hauptstichprobe. Besonders deutlich wird dies für den Typen der „Funktionellen“ Radfahrer*in. Dieser weist jedoch auch die geringste Nutzerzahl auf. Die Nutzungshäufigkeit über die Typen spiegelt jedoch das Bild der Hauptstichprobe mit vergleichbaren Werten für die Typen „Passioniert“ und „Pragmatisch“. Der Typus der „Ambitionierten“ Radfahrer*in fällt gegenüber der Hauptstichprobe leicht zurück.

Abbildung 44: Anteil Fahrradnutzung im Untersuchungszeitraum nach Typ und Wegezweck:
Vergleichsstichprobe (N=120)

VERTEILUNG DER TAGESKILOMETER

Die Verteilung der Tageskilometer weißt, wie auch für die Hauptstichprobe, eine signifikant höhere Wegeweite für die „Ambitionierten“ Radfahrer*innen auf, gefolgt von „Funktionellen“ und „Passionierten“, wobei die Wegeweite für Einkaufswege deutlich abfällt. Insofern sind die Ergebnisse ebenfalls in einer Linie mit den Befragungsergebnissen (Siehe dazu Teil 1 des Ergebnisberichts).

Abbildung 45: Mittlere Tageskilometer je Typ und Wegezweck, Vergleichsstichprobe (N=120)

GESCHWINDIGKEITSVERTEILUNGEN

Die Ergebnisse der Analyse des 0.85-Perzentils der Mittleren Geschwindigkeiten der Nutzer*innen in der Vergleichsstichprobe zeigt zumindest für die Typen „Ambitioniert“ und „Passioniert“ einen absteigenden Trend mit zunehmendem Alter. Ausreißer sind Teile der „Pragmatiker“ und der „Funktionellen“. Als Erklärung denkbar ist beispielsweise die Nutzung von Pedelecs. Die Teilnehmer waren zwar auch im Bundesgebiet dazu angehalten keine elektrische Unterstützung zu nutzen, eine Kontrolle war allerdings nicht möglich. Auffällig ist auch das insgesamt höhere Geschwindigkeitsniveau als in der betreuten Hauptstichprobe. Hier kann ein Einfluss durch die erfolgte Selbstselektion vermutet werden.

Abbildung 46: Mittleres 0.85-Perzentil der Geschwindigkeit nach Alter und Typ, Vergleichsstichprobe (N=120)

BESCHLEUNIGUNGSVERHALTEN

Abbildung 47: Mittleres 0.95-Perzentil der pos. Beschleunigung, Vergleichsstichprobe (N=120)

Der bei der Geschwindigkeitsanalyse beobachtbare Trend setzt sich bei den Beschleunigungen fort. Mit zunehmendem Alter sinkt über alle Typen das 0.95-Perzentil der Beschleunigungen. Dies kann als Indikator für eine zunehmend ruhigere Fahrweise gesehen werden.

4.4 Vergleich mit Strava-Daten

Grundlegend erscheint ein Vergleich mit weiteren Datensätzen interessant. Da durch das Projekt *„Mit Smartphone generierte Verhaltensdaten im Radverkehr – Überprüfung der Nutzbarkeit und Entwicklung eines Auswerteleitfadens für Akteure der Radverkehrsplanung“* [26] der Zugang zu weiteren GPS-Daten Radfahrender besteht, werden im folgenden Kapitel die Ergebnisse mit Parametern eines Datensatzes der Firma Strava verglichen.

NETZABDECKUNG

Der Vergleich mit dem bereits etablierten Anbieter Strava für das Stadtgebiet Dresden zeigt, dass bereits mit den Fahrten von 187 Proband*innen eine sehr hohe Netzabdeckung erreicht werden kann. Ebenfalls auffällig ist das Fehlen von Sportstätten, oder die deutlich geringer ausgeprägte Nutzung der Waldgebiete am Rande der Stadt im Vergleich zur Strava Heat-Map.

Abbildung 48: Heat-Map der Fahrten im Dresdner Stadtgebiet, Hauptstichprobe (eigene Darstellung)

Vor allem im Innenstadtbereich sind in beiden Fällen die Radhaupttrouten sehr gut sichtbar. Einige Relationen, vor allem diejenigen mit größerer Steigung, wurden von den Proband*innen anteilig weniger genutzt als von den Strava-Nutzern.

Abbildung 49: Heat-Map der Strava - Fahrten im Dresdner Stadtgebiet, abgerufen am 07.08.2019

Der höhere optische Detailgrad in der eigenen Kartendarstellung liegt an der Darstellungsform mit Kepler.gl¹¹, welche streng genommen nur eine Überlagerung der Daten, aber keine wirkliche Heat-Map ist. Die Darstellung der Heat-Map von Strava arbeitet mit einer ähnlichen Engine, die jedoch Details nur im Zoom offenbart.

ALTERSVERTEILUNG DER NUTZER

Die Altersverteilung der Strava-Nutzer wurde in [26] ausführlich thematisiert. Der hohe Anteil männlicher Nutzer im Altersbereich zwischen 25 und 54 Jahren sorgt für ein mutmaßlich anderes Gesamtbild bei Geschwindigkeiten und Verkehrsmengen. Ein ähnliches Bild zeigte die Alters- und Geschlechterverteilung der Vergleichsstichprobe. Auch hier war eine Dominanz männlicher Nutzer der mittleren Altersklassen zu beobachten. Der Stichprobenverzerrung durch Selbstauswahl scheint also eher durch das Medium determiniert, als durch den motivatorischen Hintergrund.

¹¹ Kepler ist eine Web-Engine zur Visualisierung großer Datenmengen: <https://kepler.gl>

Im vorliegenden Projekt konnte ein Einfluss von Alter und Geschlecht auf das Fahrverhalten nachgewiesen werden. Ein Einfluss auf die Infrastrukturnutzung konnte jedoch kaum nachgewiesen werden.

Abbildung 50: Altersverteilung der Strava-Nutzer, Stadt Dresden 2016

WEGELÄNGEN

Die Verteilung der Wegelängen hingegen ist nach der Datenaufbereitung der Haupt- und Vergleichsstichprobe ähnlich jener der Haushaltsbefragung SrV für die Stadt Dresden.

Abbildung 51: Vergleich der Wegelängenverteilungen, Stadt Dresden

Dies zeugt zum einen von einer hohen Güte der Datenaufbereitung – hier vor allem der Trennung in Aktivitäten und Wege – zum anderen wird deutlich, dass die Wegweitenverteilung der Strava-Daten eine gänzlich andere ist. Genutzt wurde dafür diejenigen Daten, die durch den Anbieter als sogenannte „Commutes“ bezeichnet werden, also ein Äquivalent zu Alltagswegen darstellen sollen. Die Unterschiede können sowohl in der Datenverarbeitung, als auch im Radverkehrsverhalten der Nutzer*innen begründet sein.

GESCHWINDIGKEITEN

Geschwindigkeitsverteilungen lassen sich aufgrund der besonderen Charakteristik der Strava-Daten nur auf Kanten im Straßennetz vergleichen. Die Anzahl der Durchfahrten sind daher für die Hauptstichprobe vergleichsweise gering. Begründet wird dies durch den geringeren Stichprobenumfang in Verbindung mit einer kürzeren Erhebungsdauer. Trotzdem wird am folgenden Beispiel ein deutlicher Qualitätsunterschied zu den GPS-Daten eines Sports-App-anbieters sichtbar.

Abbildung 52: Geschwindigkeitsverteilung Elberadweg (linkselbig) am Querschnitt Waldschlößchenbrücke (Strava Daten und Messungen aus 2016, RadVerS Daten 2018)

Der Datenvergleich in Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigt dabei deutlich das höhere Geschwindigkeitsniveau der App-Daten sowohl gegenüber der Vergleichsmessung als auch gegenüber den Geschwindigkeiten der Proband*innen unserer Stichprobe.

Abbildung 53: Aggregierte Geschwindigkeitsverteilung Elberadweg (linkselbig) am Querschnitt Waldschlösschenbrücke (Strava Daten und Messungen aus 2016, RadVerS Daten 2018)

5. Diskussion

Die Ergebnisse der Feldstudie weisen zahlreiche Erkenntnisse hinsichtlich der Verarbeitung, Einordnung und Nutzung von GPS-Daten für die Radverkehrsplanung auf. Diese sollen im Folgenden diskutiert werden.

5.1 Stichprobenzusammensetzung und Durchführung

Die Stichprobenzusammensetzung sorgte für erste Bewegungsdaten der Alterskohorte 65+. Diese ist in den meisten bekannten Studien wenig oder gar nicht repräsentiert [3], [4], [15]. Die als kritische Größe für eine hohe statistische Teststärke identifizierte Anzahl von circa 200 gültigen Proband*innen konnte durch Ausfälle trotz mehrstufiger Rekrutierung leider nicht ganz erreicht werden. Eine Absicherung von statistischen Zusammenhängen ist also nur im Bereich von 90%-Teststärke möglich. Jedoch liegen die Ergebnisse im Bereich der Vorstudie [27].

Die Versuchsdurchführung erfolgte problemfrei. Technische Probleme waren nur auf einigen älteren Smartphones und solchen mit Energiesparapplikationen zu beobachten. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Onlinebefragungen fiel aber beispielsweise die Gruppe der „Funktionellen“ durch eine vergleichsweise starke Radverkehrsfrequenz auf – hier ist ein starker motivationaler Einfluss des Studiendesigns zu vermuten, obgleich die Proband*innen darauf hingewiesen wurden alltägliche Verhaltensweisen beizubehalten.

5.2 Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung nimmt zu Recht im vorliegenden Dokument einen großen Stellenwert ein. Durch die Bereinigung um Ausreißer durch etablierte Methoden [8], [19], [24], [28] und einer Erkennung der Verkehrsmittel sowie eine Segmentierung der aufgezeichneten Daten in Aktivitäten und Wege konnte eine an Haushaltstichproben angegliche Datengüte erreicht werden. Da innerorts das Zeitfenster für die Trennung von Wegen und Aktivitäten, bedingt durch mitunter sehr kurze Aktivitäten, wie beispielsweise Einkäufe, auf drei Minuten festgelegt wurde (auch um Pausen an

Lichtsignalanlagen nicht als Unterbrechungen zu bewerten) führen längere Pausen vor allem bei Freizeitfahrten meist zu einer Aufteilung in zwei Wege.

Die Methode des gleitenden Zeitfensters stößt bei diesem Optimierungsproblem an eine Grenze. Möglicherweise werden durch die verwendete Methodik also die Wegelängen für Freizeitwege unterschätzt und deren Häufigkeit überschätzt. Eine Summierung über den Tag hat sich daher als sinnvoll erwiesen.

Für das Map-Matching gilt: Die Zusammenführung mit dem städtischen Radverkehrsnetz ist exemplarisch für die Pilotkommune Dresden nötig, da der offene OSM-Datensatz kein ausreichendes Vertrauensniveau hinsichtlich der Führungsformen für den Radverkehr aufweist. Eine komplexe Angleichung des städtischen GIS-Netzes, samt Informationen zu den Radverkehrsanlagen, an das OSM-Netz ist daher unerlässlich. Ein Map-Matching auf das Dresdner GIS Netz ist aufgrund der ungleichen Datenstruktur von Netz und Routing Algorithmus nicht trivial lösbar. Die beschriebene Problematik ist für jedes andere städtische Netz gleichermaßen zu vermuten und macht ebenfalls eine Verschneidung von Datensätzen notwendig. Eine Alternative wäre die Aufnahme des Typs der Radverkehrsanlage in den globalen OSM Datensatz, welche allerdings an regionalen Unterschieden scheitern dürfte.

5.3 Datenauswertung

Den in der Onlinebefragung ermittelten Radfahrer*innen Typen konnten in der Feldstudie keine spezifischen Radverkehrsverhaltensmerkmale zugeordnet werden. Dies kann an im Kontext der Studie als erwünscht vermuteten Verhalten liegen, dass einige Proband*innen zu einer Verhaltensänderung bewegte. Fahrverhaltensparameter wie Geschwindigkeit, Beschleunigung, Wegeweite und Flächenwahl wurden stattdessen, wie auch in der Vorstudie [27], maßgeblich durch Alter, Geschlecht und Wegezweck determiniert. Eine Mustererkennung, inklusive eines Ansatzes zur Clusterung der Wege, als eine Möglichkeit der Zuordnung zu den Typologien der Befragung wurde folglich verworfen.

Für die Verwendung von GPS-Datensätzen, die unter Selbstselektion entstanden sind, ist folglich darauf zu achten, dass diese die Alters- und Geschlechterverteilung der Radfahrenden im Untersuchungsgebiet annähernd repräsentativ wiedergeben. Eine Ziehung von entsprechenden Sub-Samples ist daher anzuraten. Diese dürften deutlich weniger umfangreich ausfallen als der eigentliche Datensatz – besitzen dafür aber eine höhere Reliabilität und Aussagekraft.

Erstmals in einem GPS-Datensatz nachgewiesen wurde das Radverkehrsverhalten älterer Nutzer*innen (65+). Hier konnten zu erwartende Leistungsminderungen nachgewiesen werden. Diese können in der Praxis aber durch elektrisch unterstützte Fahrräder ausgeglichen werden. Eine Untersuchung der Rohdaten bezüglich weiterer Besonderheiten, wie Intermodalität an Steigungen, ggf. Schieben des Fahrrades oder nötige Pausen konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt werden, ist aber als Forschungsbedarf zu vermerken.

5.4 Implikation für die Radverkehrsplanung

Die Implikationen ergeben sich vorwiegend aus den nur geringen Unterschieden bezüglich des Radverkehrsverhaltens. Es ist nur bei sehr alten und mutmaßlich sehr jungen Nutzer*innen von signifikanten Unterschieden und ggf. daraus resultierenden besonderen Planungserfordernissen auszugehen.

Die Geschwindigkeitsverteilung der Nutzer mit Medianwerten von 16-18 km/h scheint jedoch über alle Gruppen nicht geeignet für eine gemeinsame Führung mit dem Fußverkehr bei beengten Platzverhältnissen.

Weiterhin zeigt die nahezu identische Verteilung der Verkehrsflächenwahl in Kombination mit den entsprechenden Befragungsergebnissen, dass die Radfahrenden die bestmögliche Radverkehrsinfrastruktur nutzen. Eine Präferenz einer Nutzergruppe für die schnellere Nutzung im Mischverkehr lässt sich aus den vorhandenen Daten nicht ableiten. Dementsprechend ist, folgt man den Forschungsergebnissen, die Planung von vom MIV separierten Anlagen eher vorzuziehen.

Weiterhin lassen sich aus GPS-Massendaten Radverkehrsbelastungen ableiten [26] und somit Netzlücken ebenso erkennen, wie nur sporadisch genutzte Netzelemente.

5.5 Grenzen der Methodik

Die Grenzen der Methodik können in technische und methodische Grenzen unterschieden werden. Die technischen Grenzen liegen vor allem in der Genauigkeit der GPS-Daten und der Verarbeitung beim Map-Matching. Die Genauigkeit der GPS-Koordinaten bis zu einem Radius von 30m um den realen Punkt herum erlaubt beispielsweise die Zuordnung zu Radverkehrsanlagen oder Mischverkehr auf der Straße nur über getroffene Zusatzannahmen wie bspw. die vorausgesetzte Regelbefolgung. Nutzt ein(e) Proband*in regelwidrig die benutzungspflichtige Radverkehrsanlage nicht, dann wird dies in den Daten zumeist nicht sichtbar. Auch das Map-Matching birgt methodische Grenzen. Je nach genutztem Profil und den entsprechenden Freigaben und Gewichtungen von Anlagen für den Radverkehr können unterschiedliche Zuordnungen einer Radfahrt zu einem Straßennetz entstehen. Dabei ist es das Ziel, eine möglichst hohe Übereinstimmung mit den real genutzten Wegen zu erreichen, eine 100-prozentige Übereinstimmung ist in den seltensten Fällen zu erreichen.

Weiterhin wurde bei der Datenauswertung auf ein Höhenmodell verzichtet. Damit sind die Topografie und somit auch der Bereich in dem Radfahrten stattfanden weitgehend unterrepräsentiert. Das ist insofern für die Pilotstadt vernachlässigbar, als dass Steigungen in Dresden in den überwiegenden Fällen sehr moderat sind, und im Stadtzentrum nicht vorhanden.

Die methodischen Grenzen liegen vor allem in der Betrachtungstiefe begründet. Da die vorliegende Untersuchung mehr als 10.000 Fahrten umfasst, war eine Einzelfallprüfung der Fahrten ausgeschlossen. Zwar wurden ca. 600 Fahrten stichpunktartig auf unterschiedliche Kriterien hin überprüft, aber eine Detailbetrachtung bspw. bezüglich der Wartezeiten, oder welche Geschwindigkeit auf welchem Infrastrukturelement gefahren wurde, konnte aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden. Gleiches gilt für eine Analyse

des verkehrlichen Umfeldes. Dies hat für die Radverkehrsmodellierung eine hohe Bedeutung und sollte in vertiefenden Untersuchungen bearbeitet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Schelewsky, H. Jonuschkat, B. Bock, and K. Stephan, *Smartphones unterstützen die Mobilitätsforschung*. 2014.
- [2] F. Harvey and K. Krizek, 'Commuter Bicyclist Behavior and Facility Disruption', *Transp. Res. Board*, p. 60, 2007.
- [3] J. Broach, J. Dill, and J. Gliebe, 'Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data', *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 46, no. 10, pp. 1730–1740, 2012.
- [4] J. Hood, E. Sall, and B. Charlton, 'A GPS-based bicycle route choice model for San Francisco, California', *Transp. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 63–75, 2011.
- [5] J. Strauss and L. F. Miranda-Moreno, 'Speed, travel time and delay for intersections and road segments in the Montreal network using cyclist Smartphone GPS data', *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 57, no. September, pp. 155–171, 2017.
- [6] B. Jestico, T. Nelson, and M. Winters, 'Mapping ridership using crowdsourced cycling data', *J. Transp. Geogr.*, vol. 52, pp. 90–97, 2016.
- [7] S. Flügel, N. Hulleberg, A. Fyhri, C. Weber, and G. Ævarsson, 'Empirical speed models for cycling in the Oslo road network', *Transportation (Amst.)*, no. 1, 2017.
- [8] K. W. Axhausen and N. Schüssler, 'Identifying trips and activities and their characteristics from GPS raw data without further information', *Conf. Pap.*, 2008.
- [9] FGSV, 'Empfehlung für Verkehrserhebungen', FGSV Verlag, Germany, 2012.
- [10] G. Ahrens, 'Die Stunde der Wahrheit Präsentation und Diskussion der Ergebnisse des SrV 2013 Inhalt', 2014, no. November.
- [11] ISUP GmbH and PGV-Alrutz GbR, 'Radverkehrskonzept Dresden', no. 05 11, 2017.
- [12] C. A. Zimmerman, 'The life cycle concept as a tool for travel research', *Transportation (Amst.)*, vol. 11, no. 1, pp. 51–69, 1982.

- [13] M. Lanzendorf, 'Mobility biographies. A new perspective for understanding travel behaviour', *10th Int. Conf. Travel Behav. Res.*, no. August, p. 20, 2003.
- [14] R. Wittwer, *Zwangsmobilität und Verkehrsmittellorientierung junger Erwachsener: Eine Typologisierung*, Schriftenr. Dresden: Technische Universität Dresden Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr Geschäftsführender Institutsdirektor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Lippold, 2014.
- [15] B. Charlton, E. Sall, M. Schwartz, and J. Hood, 'Bicycle Route Choice Data Collection using GPS-Enabled Smartphones', *TRB 2011 Annu. Meet.*, pp. 1–10, 2011.
- [16] E. M. Hill, J. L. Davis, P. Elósegui, B. P. Wernicke, E. Malikowski, and N. A. Niemi, 'Characterization of site-specific GPS errors using a short-baseline network of braced monuments at Yucca Mountain, southern Nevada', *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 114, no. 11, pp. 1–13, 2009.
- [17] L. Gong, T. Morikawa, T. Yamamoto, and H. Sato, 'Deriving Personal Trip Data from GPS Data: A Literature Review on the Existing Methodologies', *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 138, no. 0, pp. 557–565, 2014.
- [18] L. Shen and P. R. Stopher, 'Review of GPS Travel Survey and GPS Data-Processing Methods', *Transp. Rev.*, vol. 34, no. 3, pp. 316–334, 2014.
- [19] G. Xiao, Z. Juan, and C. Zhang, 'Travel mode detection based on GPS track data and Bayesian networks', *Geus Comput. , Environ. Urban Syst.*, vol. 54, pp. 14–22, 2015.
- [20] J. Wolf, R. Guensler, and W. Bachman, 'Elimination of the Travel Diary: Experiment to Derive Trip Purpose from Global Positioning System Travel Data', *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 1768, no. 1, pp. 125–134, 2007.
- [21] S. Tsui and A. Shalaby, 'Enhanced System for Link and Mode Identification for Personal Travel Surveys Based on Global Positioning Systems', *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 1972, no. April, pp. 38–45, 2007.
- [22] P. Stopher, Q. Jiang, and C. Fitzgerald, 'Processing GPS Data from Travel Surveys', pp. 1–17, 2005.

- [23] N. Schuessler and K. W. Axhausen, 'Map-matching of GPS traces on high-resolution navigation networks using the Multiple Hypothesis Technique (MHT)', *October*, no. October, pp. 1–22, 2009.
- [24] H. Gong, C. Chen, E. Bialostozky, and C. T. Lawson, 'A GPS/GIS method for travel mode detection in New York City', *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 36, no. 2, pp. 131–139, 2012.
- [25] S. Joo, C. Oh, E. Jeong, and G. Lee, 'Categorizing bicycling environments using GPS-based public bicycle speed data', *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 56, pp. 239–250, 2015.
- [26] A. Francke and S. Lißner, 'Big Data im Radverkehr', 2017.
- [27] M. von Harten, 'Welche Radfahrtypen können aus GPS-Datensätzen abgeleitet werden?', Dresden, 2017.
- [28] L. Shen and P. R. Stopher, 'Review of GPS Travel Survey and GPS Data-Processing Methods', *Transp. Rev.*, vol. 34, no. 3, pp. 316–334, 2014.

A. Anhang

A.I Mitglieder des Expertenbeirats

Prof. Dr.-Ing. Udo Becker (TU Dresden, Professur Verkehrsökologie)

Prof. Dr. rer. nat. habil. Dipl. Psych. Tibor Petzoldt (TU Dresden, Professur Verkehrspsychologie)

Prof. Dr. Carmen Hagemeister (TU Dresden, Professur für Diagnostik und Intervention)

Dipl. Psych. Juliane Anke (TU Dresden, Professur Verkehrspsychologie)

Dipl.-Ing. Dipl. UWT Thomas Böhmer (Team Red, ADFC)

Dipl.-Verk.wirtsch. Angela Francke (TU Dresden, Professur Verkehrspsychologie)

Dipl.-Ing. Michael Hardinghaus (DLR, Institut für Verkehrsforschung)

Dipl.-Ing. Maike von Harten (TU Dresden, Professur Verkehrsökologie)

Dipl. Geogr. Stefan Huber (TU Dresden, Professur Verkehrsökologie)

Dr.-Ing. Stefan Hubrich (TU Dresden, Professur für integrierte Verkehrsplanung und Straßenverkehrstechnik)

Dipl.-Ing. Sven Lißner (TU Dresden, Professur Verkehrsökologie)

M.A. Doris Reichel (Deutsches Institut für Urbanistik)

A.II Datenschutzerklärung

Datenschutzerklärung / Einwilligungserklärung für das Forschungsprojekt „RadVerS“

1. Datenerhebende Stelle und Zweck der Datenverarbeitung

Im Rahmen des Forschungsprojekts Radverhaltensstudie im Weiteren „RadVerS“ soll untersucht werden wie sich das realisierte Verhalten unterschiedlicher Nutzergruppen im Radverkehr unterscheidet. Dazu werden im Rahmen des Projektes einige Parameter erhoben. Dies betrifft unter anderem den Wegezweck, die gefahrene Route, die Oberflächenbeschaffenheit und soziodemografische Daten des Radfahrenden selbst. Diese Daten werden im Anschluss an die Feldphase durch die Professuren für Verkehrsökologie und Verkehrspsychologie der TU Dresden

ausgewertet. Allein für vorgenannten Forschungszweck sollen personenbezogene Daten von Probanden durch die TU Dresden [Fakultät für Verkehrswissenschaften, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Die Professuren Verkehrsökologie und Verkehrspsychologie. *Anschrift: Hettnerstraße 1, 01062 Dresden; Email: svn.lissner@tu-dresden.de; Telefon: 0351/4633929*] verarbeitet werden (Verarbeitung im Sinne von Erhebung, Speicherung, Veränderung und Nutzung). Hierzu ist eine freiwillige und informierte Einwilligung erforderlich.

2. Datenverarbeitung

Die Einwilligungserklärung umfasst die Verarbeitung folgender personenbezogener Daten:

- Name, Nachname, Postleitzahl
- E-Mail-Adresse
- Alter und Geschlecht und Bildungsstand
- Beruflicher und familiärer Status
- GPS-Koordinaten (geographische Länge und Breite, Höhe, Datum, Zeit, Genauigkeitsangabe, Geschwindigkeit)
- Wegezweck der Radfahrt
- 3-Achsen Beschleunigungs-, Gyroskop- und Magnetometerdaten
- eine nicht-anonyme User-ID des Nutzers, die es erlaubt, Daten vom gleichen Gerät zu erkennen und diese in Verbindung mit sozio-demografischen Merkmalen (Alter, Geschlecht, Bildung) zu bringen
- Das Modell des verwendeten Smartphones

3. Anonymität

Die Datenerhebung erfolgt personenbezogen. Das bedeutet, dass auf Grund der erhobenen Daten Rückschlüsse auf Sie, insbesondere auf Ihr Verkehrsverhalten, gezogen werden können. Wir sichern jedoch zu, dass die Daten unverzüglich anonymisiert werden, sobald es der Forschungszweck erlaubt. Es kann jedoch unter Umständen und im Einzelfall möglich sein, dass keine vollständige Anonymisierung möglich ist.

4. Datenübermittlung

Insofern dies nicht anders gesetzlich bestimmt ist, erfolgt keine Übermittlung von personenbezogenen Daten an Dritte.

5. Veröffentlichung

Die Forschungsergebnisse werden in wissenschaftlich üblicher Form veröffentlicht. Wir sichern zu, dass aus den Veröffentlichungen keinerlei Rückschlüsse auf natürliche Personen möglich sind.

6. Freiwilligkeit und Widerruf

Die Teilnahme am Forschungsprojekt ist freiwillig. Eine Nichtteilnahme hat keine Folgen! Diese Einwilligung kann jederzeit schriftlich und formlos bei der datenerhebenden Stelle und mit Wirkung auf die Zukunft widerrufen werden. In diesem Fall werden Ihren personenbezogenen Daten unverzüglich gelöscht.

☐ Hiermit bestätige ich, dass ich die Datenschutzerklärung (jederzeit einsehbar unter <https://www.verkehrsökologie.de/datenschutz/> gelesen und verstanden habe und unter diesen Bedingungen freiwillig am Forschungsprojekt „RadVerS“ teilnehmen m