



Fahrradlabor Hochschule Karlsruhe

Juli 2022

Herausgeber:

Jochen Eckart, Christoph Hupfer, Reiner Kriesten,
Philipp Nenninger, Jan Riel



Inhaltsverzeichnis

Jochen Eckart, Anja Zeller: Fahrradlabor Hochschule Karlsruhe	1
Martin Temmen: Messen mit SensorBikes – Wie der Alltagsradverkehr von der Digitalisierung im Radsport profitieren kann	9
Martín Bejarano: Analyse des Radfahrverhaltens in spezifischen Verkehrsanlagen mit Hilfe von Kameras und Drohnen: experimentelle Erhebung in Bogotá (Kolumbien)	15
Nicolas Walter, Maximilian Pils, Mathias Trefzger Thomas Schlegel: Vergleich des Blickverhaltens von Rad- und E-Scooterfahrenden auf Fahrrad- straßen: Analyse einer Eye-Tracking-Studie in Bezug auf Verkehrsschilder und Straßenmarkierungen	27
Annabelle Sommer, Benedikt Prinzing: Radfahren mit Baby: Messung der Feinstaubbelastung in Fahrradanhängern ..	39
Catherina Lutz, Jule Merk: Überholabstände zwischen Rad und Kfz – wie studentische Projekte die For- schung mit neuen Ideen und Perspektiven bereichern	49
Patrick Rebling: Aufbau und Entwicklung eines Fahrradsimulators	57
Maurice Kettner, Sven Helms: Ausgewählte Untersuchungen mit Fahrrad und Pedelec auf einem Fahrzeug- Rollenprüfstand	65
Yannick Rauch: Energie- und Reichweitenvorhersage für E-Bikes	77
Markus Knoch, Nils Schlegelmilch, Klaus Wolfrum: Fahrradtacho an Nabendynamo	87
Jan Riel: Potentiale von E-Bikes im ländlichen Raum – Erfahrungen aus Baiersbronn ..	101
Benedikt Prinzing, Willy Dirnsteiner: Treibhausgasbilanz von Fahrrad, Pedelec und (E-)Pkw im Vergleich	107
Willy Dirnsteiner: Sichtfeld rechtsabbiegender Kraftfahrzeuge auf Radfahrende	117

Tim Wiesler:
Nachhaltige Förderung des Radverkehrs im Winter durch optimierten Winter-
dienst (WinRad) 127

Fahrradlabor Hochschule Karlsruhe

Jochen Eckart
Institut für Verkehr und Infrastruktur
Hochschule Karlsruhe
jochen.eckart@h-ka.de

Anja Zeller
BMDV-Stiftungsprofessur Radverkehr
Hochschule Karlsruhe
anja.zeller@h-ka.de

Abstract

Die angewandte Forschung zum Radfahren an der Hochschule Karlsruhe wird in der Konferenz "Fahrradlabor Hochschule Karlsruhe" erstmals im Überblick dargestellt. Die Forschungen umfassen verschiedene Aspekte des Systems Radverkehr: den radfahrenden Menschen, das Fahrzeug Fahrrad, die bauliche Infrastruktur, die digitale Infrastruktur sowie die Radkultur. Dabei kommen zahlreiche Methoden der Radverkehrsforschung zum Einsatz, wie externe stationäre Beobachtung der Radfahrenden, mobile Erhebung der Radfahrenden sowie Simulation und Modellierung des Radverkehrs. Aufgezeigt wird, wie das interdisziplinäre Zusammenwirken dieser Forschungsansätze als Fahrradlabor neue systematische Forschungsmöglichkeiten für den Radverkehr in Studium, Forschung und Weiterbildung an der Hochschule Karlsruhe bietet.

I. Forschung für den Radverkehr

Radfahren vereint persönliche und gesellschaftliche Vorteile für eine zukunftsfähige und nachhaltige Mobilität und ist zentral für die Schaffung attraktiver und lebenswerter Städte und Gemeinden. Viele Kommunen in Deutschland haben in den letzten Jahrzehnten bereits erste Erfolge bei der Förderung des Radverkehrs erzielt. Ziel ist es aufzuzeigen, wo Forschungsbedarfe zu den aktuellen Herausforderungen für die Radverkehrsförderung liegen. Weiteres Ziel ist es darzustellen, welches Methodenspektrum aktuell für die Forschung zur Verfügung steht. Illustriert wird, wie und warum diese Forschungsmethoden für die aktuellen Herausforderungen Radverkehr erforderlich sind. Zudem wird betrachtet, welche neuen Forschungsfragen mit Hilfe der weiterentwickelten Methoden sich ergeben. Im Ergebnis wird aufgezeigt, was die Hochschule Karlsruhe als "Fahrradlabor" für den Radverkehr in Studium, Forschung und Weiterbildung leistet.

II. Bedarf nach Radverkehrsforschung

Wie eine erfolgreiche Radverkehrsförderung funktioniert, ist in den wesentlichen Grundsätzen bekannt. Die Förderung des Radverkehrs erfordert eine integrierte Strategie, die neben dem wichtigen Fokus auf harte Infrastruktur-Maßnahmen auch weiche Maßnahmen der Kommunikation und des Mobilitätsmanagements umfasst. Diese integrierte und systematische Radverkehrsförderung enthält nachfolgende Elemente [8]:

- ein zusammenhängendes und umfassendes Netzwerk an komfortabler und sicherer Fahrradinfrastruktur inklusive fahrradfreundlicher Knotenpunkte,

- gemischte Stadtquartiere mit einer mittleren Dichte, in denen viele Ziele mit dem Fahrrad schnell und auf kurzen Wegen erreichbar sind,
- Verkehrsberuhigung des motorisierten Individualverkehrs für ein komfortables und sicheres Miteinander,
- sichere und komfortable Fahrradabstellanlagen zu Hause und an zentralen Punkten,
- positive Informations- und Öffentlichkeitskampagnen für den Radverkehr sowie zielgruppengerechtes Mobilitätsmanagement,
- Serviceangebote für den Radverkehr wie Fahrradreparaturstationen, Bike-Sharing etc.

So kommt [7] aufgrund dieser Erkenntnisse sogar zu dem Schluss, dass die Forschung im Radverkehr nur noch ein Verständnis im Detail erzielen kann und daher nicht mehr für die weitere Fahrradforschung relevant ist. Dieser Artikel möchte jedoch zeigen, dass trotz der bekannten grundsätzlichen Strategien für die weitere Radverkehrsförderung insbesondere die Forschung im Detail wichtig ist. So illustrierte bereits [1] für die Radverkehrsinfrastruktur wie relevant die gute Ausgestaltung im Kleinen ist. Nur durch weitere Radverkehrsforschung kann der zunehmende Handlungsbedarf für den Radverkehr in den Bereichen Verkehrssicherheit, Leistungsfähigkeit und Komfort bewältigt werden. Für die verschiedenen Aspekte des Gesamtsystems Radverkehr vom radfahrenden Menschen über das Fahrzeug Fahrrad, die bauliche Radinfrastruktur, die digitale Radinfrastruktur und die Radkultur wird der Forschungsbedarf illustriert.

A. Radfahrender Mensch

Bekannt ist, welche Motivationsfaktoren bisher für die Radfahrenden wichtig waren. Mit deren Hilfe wurde in vielen Kommunen bereits das einfach zu motivierende Nutzerkollektiv für den Radverkehr aktiviert. Es gilt nun neue oder sich verändernde Motivationsfaktoren zu analysieren, die in großem Umfang weitere Menschen das Fahrrad nutzen lassen. So untersucht Riel (in diesem Band), wie Radfahren im ländlichen Raum gefördert werden kann. Sommer und Prinzing (in diesem Band) nehmen die Bedürfnisse junger Eltern bei der Mitnahme von Kindern in Fahrradanhängern in den Blick und schauen was fördernde und hemmende Faktoren sind.

B. Fahrzeug Fahrrad

Das Fahrzeug Fahrrad wird ständig technisch fortentwickelt. In den letzten Jahren hat insbesondere die Entwicklung der Elektro-Fahrradmobilität und die damit verbundene physische Bewegungsunterstützung dazu beigetragen, topographische Widerstände zu überwinden, bisher weniger attraktive Entfernungsklassen zu erschließen und damit neue Nutzergruppen zu gewinnen. So untersucht Riel (in diesem Band), die Potentiale des Pedelecs für die Fahrradförderung im ländlichen Raum. Die Elektro-Fahrradmobilität hat bei der Entwicklung der Antriebstechniken, der Steuerungstechnik sowie der Batterien mit Leistung, Gewicht und Größe immer noch einen großen Forschungsbedarf. So adressieren Kettner und Helms (in diesem

Band) Fragen der Steuerung von Pedelecs mit Hilfe eines Rollenprüfstandes. Rauch (in diesem Band) erforscht das Energie- und Reichweitenmanagement für Pedelecs. Prinzing und Dirnsteiner (in diesem Band) betrachten eventuelle Folgewirkungen und stellen die Treibhausgasbilanz von Pedelec, Fahrrad und Kfz im Vergleich dar.

C. Bauliche Infrastruktur Radverkehr

Bei der baulichen Radverkehrsinfrastruktur gibt es Forschungsbedarf zur Weiterentwicklung von Standards und zur Einführung neuer Infrastrukturformen. So analysiert Dirnsteiner (in diesem Band) die Sichtfelder rechtsabbiegender Kraftfahrzeuge auf Radfahrende und leitet daraus Hinweise für die Weiterentwicklung von Standards ab. Hinzu kommen Unterhaltung und Wartung sowie wetterbedingte Maßnahmen zur Optimierung der Nutzbarkeit von Radverkehrsinfrastruktur. So adressiert Wiesler (in diesem Band) Fragen zur Optimierung des Winterdiensts für den Radverkehr. Aufgrund der starken Zunahme des Fahrradverkehrs in den letzten Jahren ist bei der Gestaltung der Radverkehrsinfrastruktur zunehmend auch deren Kapazität zu betrachten. Unterschiedliche Geschwindigkeiten (Pedelecs), veränderte Nutzergruppen und Nutzungsmuster erweitern die Anforderungen zur radspezifischen Infrastruktur deutlich und sind in der Forschung zu berücksichtigen. Zudem hat die Diskussion zur objektiven und subjektiven Verkehrssicherheit an Bedeutung gewonnen. Ein subjektives Unsicherheitsgefühl ist für viele potenzielle Radfahrende ein Hemmnis. Insbesondere Personen, die bisher wenig Fahrrad fahren und damit für die Steigerung des Radverkehrsanteils in der Stadt und auf dem Land von hoher Bedeutung sind, werden davon stark beeinflusst. In diesem Zusammenhang illustrieren Lutz und Merk 2022 (in diesem Band) die Bedeutung der Überholabstände zwischen Rad und Kfz für die subjektive Sicherheit der Radfahrenden.

D. Digitale Infrastruktur / Internet of Things für den Radverkehr

Die Digitalisierung verändert auch die Möglichkeiten und Anforderungen für die Förderung des Radverkehrs. Chancen bieten insbesondere digitale Anwendungen und Assistenzsysteme. So illustriert Temmen (in diesem Band), wie der Alltagsradverkehr von der Digitalisierung im Radsport profitieren kann. Diese Entwicklungen stehen erst am Anfang und bieten erhebliches Nutzungs- und Innovationspotenzial – sowohl in Software und “mobile devices” als auch in der Entwicklung von Produkten.

E. Radkultur

Die gesellschaftlichen Aspekte des Radfahrens wie Verhaltensweisen, Image, Innovation und Tradition rund um das Radfahren werden unter dem Begriff Radkultur zusammengefasst. Die Radkultur ist für die Verbreitung und die gesellschaftliche Bedeutung des Radfahrens – und somit auch der Nutzung des Fahrrades – bedeutsam und daher ein wichtiges Forschungsthema. An der Hochschule Karlsruhe werden im laufenden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben “Collaboration for Active Mobility in Africa CAMA” die Aspekte der Radkultur in den Städten Nairobi (Kenia), Kampala (Uganda) und Mekelle (Äthiopien) untersucht.

III. Methoden der Radverkehrsforschung

Um diese und zahlreiche weitere Forschungsfragen zum Radverkehr anzugehen, wird ein breites Repertoire an Forschungsmethoden genutzt. Zudem haben sich in den letzten Jahren die Forschungsmethoden für den Radverkehr mit mobilen Erhebungen der Radfahrenden, Crowd-Mapping sowie der Simulation und Modellierung des Radverkehrs umfassend erweitert. Im Folgenden werden die verschiedenen Forschungsformate der Radverkehrsforschung und die sich daraus ergebenden Anwendungsbereiche für die Forschung dargestellt.

A. Externe Beobachtung der Radfahrenden

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Verkehrsteilnehmenden auf dem Rad erfolgt bereits seit mehreren Jahrzehnten. Es kamen zunächst insbesondere beobachtende Studien wie Nutzerbefragungen, Unfallanalysen oder Analysen lokaler Verkehrssituationen zum Einsatz. Dabei werden verschiedene Situationen des Fahrradverkehrs meist von außen durch einen externen Beobachter erfasst. Typisch dafür sind z.B. Unfallanalysen und die Auswertung von Unfallstatistiken für den Radverkehr. Solche Unfallanalysen nutzt auch Dirnsteiner (in diesem Band), um die Sichtfelder rechtsabbiegender Kraftfahrzeuge auf Radfahrende und die sich daraus ergebenden Gefahren zu analysieren. Zudem bilden qualitative und quantitative Befragungen zu Einstellungen und Präferenzen der Radfahrenden eine wesentliche Forschungsmethode und wurden z.B. von Riel (in diesem Band) zur Erfassung der Nutzung der Pedelets im ländlichen Raum eingesetzt.

In den letzten Jahren finden technische Erhebungsinstrumente wie automatische Fahrradzähler, Seitenradargeräte zur Geschwindigkeitsmessung etc. zunehmend Verbreitung in der Fahrradforschung. Zudem werden verschiedene Formate der videobasierten Erhebung wie Überholabstandsmessung durch Video oder videobasierte Verkehrskonfliktanalyse eingesetzt. So illustriert Bejarano (in diesem Band) die Möglichkeiten der Analyse des Radfahrerhaltens in spezifischen Verkehrsanlagen mit Hilfe von Kameras und Drohnen.

B. Mobile Erhebung der Radfahrenden in situ

Zunehmend sind Forschungsmethoden, bei denen Radfahrende während der Fahrt selbst mit Hilfe von ubiquitären Sensoren Daten erfassen. Dies ermöglicht eine radfahrerspezifische Perspektive, die sowohl den Radfahrenden als Nutzenden als auch die genutzte Fahrradinfrastruktur in das Zentrum der Analysen rückt. Diese Entwicklung ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass Sensoren immer günstiger und verfügbarer werden. Zusätzlich ist die Handhabung der Sensoren deutlich einfacher geworden. Dabei kann auf verschiedene, bereits im Massenmarkt vertretene Sensoren und Anwendungen zurückgegriffen werden. So illustriert Temmen (in diesem Band) wie aus dem Freizeit- und Sportbereich stammende Sensoren (Fahrradcomputer oder Fitness-Apps) auch für weitere Einsatzzwecke zur Messung des Radverkehrs genutzt werden können. Viele Erhebungsprojekte im Radverkehr konzentrieren sich auf Sensorik, die in handelsüblichen Smartphones eingebaut ist (insbesondere GPS sowie Erschütterungs-

und Beschleunigungssensoren). Für zahlreiche relevante Forschungsfragen wie etwa die Überholabstände (vgl. Lutz und Merk in diesem Band) werden jedoch weitere Sensoren benötigt. Trefzger (in diesem Band) illustriert die Potentiale des Einsatzes von Eyetracking-Studien für den Radverkehr. So wird analysiert wie Radfahrende Straßenschilder und Straßenmarkierungen wahrnehmen und welche Folgen dies für die Gestaltung der Infrastruktur hat. Weiterhin werden aber auch, basierend auf günstigen Elektronikbausätzen wie z. B. Arduino, eigene Sensorsysteme entwickelt. Wolfrum (in diesem Band) illustriert wie vorhandene Nabendynamos als Fahrradachos genutzt werden können. SensorBikes, mit Mess-Sensorik ausgestattete Fahrräder, bilden einen besonderen Fokus der Forschung an der Hochschule Karlsruhe [4]. Die SensorBikes basieren auf handelsüblichen Trekkingrädern, welche durch die Installierung von diversen Sensoren eine Vielzahl an Daten erheben und in der Analyse miteinander verknüpfen können. Die Sensoren und Anwendungsbereiche des SensorBikes umfassen die Einflussgrößen für den Kraftaufwand, die Verkehrssicherheit sowie den Fahrkomfort der Radfahrenden. Die Einflussgrößen, die sich auf den Kraftbedarf beim Radfahren auswirken, wie Längsneigung, Windgeschwindigkeit, Fahrbahnoberfläche, Reifendruck, Gewicht etc., werden erfasst und dem Energieverbrauch der Radfahrenden sowie weiteren Vitalparametern, etwa dem Puls, gegenübergestellt. Einflussgrößen, die sich auf den Fahrkomfort der Radfahrenden auswirken, wie Witterung/Klima, Erschütterungen, Luftqualität, Lärmbelastung, Belichtung etc., bilden wichtige Einflussgrößen für die Verkehrsmittelwahl und Routenwahl der Radfahrenden. Die Erhebung der Einflussgrößen zur Verkehrssicherheit, wie Seitenabstände und Geschwindigkeit des umliegenden Verkehrs, Bremsbeschleunigungen, Verkehrskonflikte etc., ermöglichen neue Ansätze zur Bewertung der Verkehrssicherheit des Radverkehrs. Erste Projekte mit SensorBikes zur Entwicklung und Verbesserung von Fahrradrouen [5] [9] zeigen ein großes Potenzial für sensorbasierte Erhebungen. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden für die geplante Verbindung zwischen zwei Orten jeweils verschiedene Routenalternativen mit SensorBikes erfasst und Daten zum objektiven Vergleich der Routenalternativen aus Perspektive der Radfahrenden erhoben. Auch die bisher meist nur qualitativ vorliegenden Größen zu Komfort, Kraftbedarf und Geschwindigkeit der Radfahrenden können durch SensorBikes sowie allgemein mobiler Sensorik umfassender erhoben und quantifiziert werden [3]. Durch die Quantifizierung werden die Informationen besser für Entscheidungs- und Planungsprozesse handhabbar gemacht. Die SensorBikes wurden auch zur Erforschung der objektiven und subjektiven Verkehrssicherheit der Mindestüberholabstände zwischen Kfz und Fahrrad eingesetzt. Lutz und Merk 2022 (in diesem Band) sowie [6] zeigen die hohe Bedeutung der Überholvorgänge von Kfz und Rad für das Stressempfinden der Radfahrenden. Der seitliche Überholabstand zwischen Kfz und Fahrrad hängt dabei insbesondere von der Breite der Radverkehrsinfrastruktur ab. Eine 100 cm breitere Radverkehrsinfrastruktur führt zu 33 cm breiteren Überholabständen. Bei 100 cm mehr Fahrbahnbreite steigen die Überholabstände hingegen nur um 7 cm. SensorBikes wurden zudem eingesetzt Fragen von jungen Eltern wie die Belastung von Babys durch Luftschadstoffe

bei der Mitnahme im Fahrradanhänger zu erforschen (Sommer und Prinzing, in diesem Band). Die Luftschadstoffbelastung von Babys bei der Mitnahme im Pkw sowie dem Fahrradanhänger wurde verglichen. Auf der gleichen Route sind die Babys im Fahrradanhänger höheren Feinstaubbelastung ausgesetzt als im Pkw. Bei angemessenen und realitätsnahen Routen für das Fahrrad abseits von Hauptverkehrsstraßen wird jedoch der Unterschied deutlich geringer [10]. Zudem wurde der Komfort für die Babys im Fahrradanhänger und Pkw analysiert. Die Erschütterungen bei der Mitnahme im Fahrradanhänger sind dabei unkomfortabler als im Pkw. Durch die Wahl einer angemessenen Route und einer rücksichtsvollen Fahrweise können die Erschütterungen jedoch reduziert werden. Zudem sind die Erschütterungen im Fahrradanhänger um den Faktor 4 niedriger wie der Transport im Kinderwagen auf unebenen Wegen und daher nicht mit Gesundheitsgefahren verbunden (Eckart und Merk, in diesem Band).

C. Crowd Mapping

Neben den klassischen Feldversuchen in kleinen Stichprobengrößen kommen im Rahmen von partizipativer Forschung und mit Hilfe von Crowd-Mapping auch Untersuchungen mit deutlich größeren Teilnehmerzahlen zum Einsatz [11]. Dabei werden die täglichen Erfahrungen der Radfahrenden aufgezeichnet, dokumentiert und für die Forschung nutzbar gemacht. Vorteil beim Crowd-Mapping ist, dass die Radfahrenden sich durch den "Mitmach-Charakter" eingebunden und mitgenommen fühlen, was hilft, die Lücke zwischen Forschenden und Beforschten zu schließen. Die Messung aus Sicht der Radfahrenden kann helfen, die häufig sehr emotionale Diskussion zum Radverkehr zu objektivieren bzw. bisher nur qualitativ beschriebene Eigenschaften zu quantifizieren. Manche Crowd-Mapping-Ansätze basieren auf der Messung mit ubiquitären Sensoren. Ein Beispiel bildet die App SimRa, die Konflikte von Radfahrenden mit anderen Verkehrsteilnehmenden erhebt (Temmen, in diesem Band). Während der Fahrt nutzt die App die im Smartphone verbauten Beschleunigungssensoren, um plötzliche Bewegungsänderungen zu erkennen. Diese können Indikator für kritische Situationen wie Ausweichmanöver oder Vollbremsungen sein. Nach einer automatischen Vorauswertung der Beschleunigungsdaten werden die Nutzenden im Anschluss an die Fahrt gebeten, ihre Fahrt zu annotieren, indem sie erkannte Konfliktsituationen kategorisieren und beschreiben. SimRa versucht damit, die für das subjektive Sicherheitsgefühl wichtigen Konflikte mit Hilfe der erhobenen Beschleunigungswerte messbar zu machen. Für das Crowd-Mapping werden auch Feedbackinstrumente (Apps für Rückmeldungen etc.) eingesetzt. Diese ermöglichen Radfahrenden eigenständig vor Ort mit geringem Aufwand positive oder negative Rückmeldungen zu geben. So konnte mit der App Radar! im Rahmen der SWR Aktion #besserRadfahren erhoben werden, welche Situationen im Südwesten Deutschlands von Radfahrenden als gefährlich wahrgenommen werden (Temmen, in diesem Band). Die aus der Perspektive der Radfahrenden drängendsten Probleme werden sichtbar. Die große Anzahl wertiger Meldungen zeugt von einer hohen Bereitschaft, konstruktiv an der Verbesserung der Verhältnisse für den Radverkehr mitzuwirken.

D. Simulation und Modellierung Radverkehr

In den letzten Jahren wurden einige Messeinrichtungen für die Analyse von Fahrradfahrten in kontrollierter Laborumgebung entwickelt. Dies umfasst den Einsatz von Verkehrssimulatoren für den Radverkehr, die Einrichtung von mechanischen Fahrradtestständen oder die Einrichtung eines Usability-Labs für Fahrradfahrende. Von der Entwicklung und dem Aufbau eines einfachen Fahrradsimulators berichtet Rebling (in diesem Band). Sein Fahrradsimulator bietet die Möglichkeit Situationen zu untersuchen, die in der Realität noch nicht bestehen oder deren Analyse zu gefährlich wäre. Kettner und Helms (in diesem Band) berichten über die speziellen Möglichkeiten, die sich durch den Einsatz des Fahrzeug-Rollenprüfstands für die Erforschung des Fahrverhalten von Fahrrädern und Pedelecs ergeben. Zudem wird Software entwickelt, die das Verhalten von Radfahrenden besser modellieren kann. Im Fokus stehen insbesondere mikroskopische Modelle, die das Verhalten von einzelnen Verkehrsteilnehmenden im Detail darstellen. Aufbauend auf Forschung zum Energie- und Reichweitenmanagement von Pedelecs (Rauch, in diesem Band) wird gegenwärtig an der Hochschule Karlsruhe im laufenden Forschungs- und Entwicklungsprojekt *Modelo-Rad* die Mikrosimulation des Radverkehrs weiterentwickelt. Der Betrachtungsfokus bisheriger Ansätze der Mikrosimulation liegt meist auf der Interaktion von Radfahrenden mit anderen Verkehrsteilnehmenden. Das fahrdynamische Verhalten der Radfahrenden im Längsverkehr ohne oder nur mit geringen Verkehrs-Interaktionen wird hingegen nicht ausreichend abgebildet. Dieser Fahrtvorgang im Längsverkehr ist jedoch für die Fahrtzeit, den Leistungsbedarf und Komfort der meisten Radfahrten prägend. Ziel von *Modelo-Rad* ist die Entwicklung eines Tools zur hochauflösenden, strecken- und radfahrtypenabhängigen Simulation des Radverkehrs (Rauch, in diesem Band).

IV. Zusammenwirken als Fahrradlabor

Die Methoden für die Radverkehrsforschung haben sich in den letzten Jahren weiterentwickelt. Durch die Vielfalt teils innovativer Forschungsmethoden eröffnen sich neue Möglichkeiten für die Radverkehrsforschung. So ermöglichen ubiquitäre Sensorik und Crowd-Mapping neue Chancen, die Perspektive der Radfahrenden besser zu erfassen. Im Ergebnis können die aufgezeigten aktuellen Herausforderungen in den Bereichen radfahrender Mensch, Fahrzeug Fahrrad, technische Radinfrastruktur, digitale Radinfrastruktur und Fahrradkultur besser adressiert und ein umfassenderes Bild entwickelt werden. Die Radverkehrsforschung sollte sich dabei nicht auf spezifische Forschungsansätze beschränken, sondern einen Multimethodenansatz nutzen. Die für die angewandte Forschung im Radverkehr erforderliche fachliche Breite macht interdisziplinäres Forschen im Team unabdingbar. Das Zusammenwirken der verschiedenen Methoden und Disziplinen in einem solch umfassenden Fahrradlabor ist dabei mehr als die Summe der einzelnen Teile. Das Fahrradlabor Hochschule Karlsruhe eröffnet vielfältige Möglichkeiten, wie die Fahrradforschung auf die heutigen und zukünftigen Fragen reagieren kann. Neben Drittmittelforschung für öffentliche und private Institutionen bieten

sich auch Kooperationsmöglichkeiten mit externen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus Industrie und Zivilgesellschaft an. Ermöglicht wird eine partizipative Forschung, um die Lücken zwischen Wissenschaft, den Radfahrenden sowie der in Stadt- und Verkehrsplanung beteiligten Akteurinnen und Akteuren zu schließen. Im Ergebnis steht die Entwicklung von wissenschaftlich fundiertem, gesellschaftlich robustem, relevantem Wissen und dessen rasche Diffusion in die Fahrradförderung sowie in die praxisgerechte Lehre und Weiterbildung im Themenfeld Radverkehr.

Der Überblick zur Radverkehrsforschung im Fahrradlabor der Hochschule Karlsruhe wird in den nachfolgenden Artikeln vertieft.

References

- [1] Alrutz, D., Bohle, W., Müller, H., Prahlow, H., Hacke, U., Lohmann, G.: Unfallrisiko und Regelakzeptanz von Fahrradfahrern.
- [2] Eckart Jochen, Merk Jule: Die Vermessung der Radfahrenden Analyse des Radverkehrs mit einem SensorBike mit ubiquitären Sensoren, in Lecture Notes in Informatics (LNI), Gesellschaft für Informatik, Bonn 2020
- [3] Eckart Jochen, Temmen Martin, Hauenstein Jan, Rabes Max, Welz Christoph: Kräftig reintreten - Die Effizienz verschiedener Führungsformen des Radverkehrs, in 1 2022 Transforming Cities
- [4] Eckart Jochen, Merk Jule: SensorBike – Die Vermessung der Radfahrenden am Beispiel der Erschütterungsmessung von Babys in Fahrradanhängern, in Hochschule Karlsruhe Forschung aktuell 2021
- [5] Hauenstein, Jan: SensorBike: Radroutenplanung aus Sicht der Radfahrer – Am Beispiel Karlsruhe/Ettlingen. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Bachelorthesis 2020.
- [6] Merk Jule, Eckart Jochen, Zeile Peter: Subjektiven Verkehrsstress objektiv messen – Ein EmoCycling Mixed Methods Ansatz, in REAL CORP 2021 Proceedings/Tagungsband
- [7] Deakin, Nello: Environmental determinants of cycling: Not seeing the forest for the trees?, Journal of Transport Geography, Volume 85, May 2020, 102704.
- [8] Pucher/Buehler: Cycling towards a more sustainable transport future, Transp. Rev., 37 (6), 2017, S. 689-694.
- [9] Röder, Annika: Optimierung und Vergleich regionaler Radrouten unter Einsatz des SensorBikes – am Streckenbeispiel Karlsruhe – Weingarten (Baden). Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Bachelorthesis 2020
- [10] Temmen Martin, Eckart Jochen: Messung der Feinstaubbelastung von Babys in Fahrradanhängern, in BAST Kolloquium "Luftqualität an Straßen 2021"
- [11] Temmen Martin, Eckart Jochen, Merk Jule, Karakaya Ahmet-Serdar, Bermbach David: Crowdsourcing in der Radverkehrsforschung, in Internationales Verkehrswesen (74) 1 2022

Wie die Radverkehrsforschung von der Digitalisierung im Radsport profitieren kann

Martin Temmen
BMDV-Stiftungsprofessur Radverkehr
University of Applied Sciences
Karlsruhe, Germany
Martin.Temmen@h-ka.de

Zusammenfassung

Der Radsport hat sich von Beginn an mit und in Abhängigkeit von den Medien verändert. Dieser Wandel betraf zunächst vor allem den Profiradsport. Seit einigen Jahren ist zu beobachten, dass auch im Freizeit- und Amateurradsport neue Rennformate entstehen oder sich einer wachsenden Popularität erfreuen, die ohne bestimmte technologische Voraussetzungen nicht denkbar gewesen wäre. Die Überschneidungen zwischen Radsport und Alltagsradverkehr sind oft nur sehr gering. Im Folgenden sollen jedoch die Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie die Radverkehrsforschung von aktuellen Entwicklungen des Radsports profitieren kann. Die Perspektive Radfahrender wird dabei stärker als bisher in den Mittelpunkt der Forschung gestellt. Dies ermöglicht beispielsweise eine stärker an den Bedürfnissen der Radfahrenden orientierte Infrastrukturgestaltung.

Index Terms

Radsport, Radverkehrs, Radverkehrsforschung, Mobilitätsforschung, Methoden

I. Eine kleine Geschichte des (Straßen-)Radsports

Die Geschichte der Straßenrennen beginnt in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Viele der damaligen Rennen wurden durch Zeitungen ausgerichtet. So veranstaltet *Le Vélocipède* ab 1869 das über 135 km führende Rennen Paris – Rouen. *Véloce-Sport* rief 1891 das 575 km lange Rennen Bordeaux – Paris ins Leben und *Le Petit Journal* organisierte 1891 erstmals das rund 1.200 km lange Rennen Paris – Brest – Paris [4]. Auch das berühmteste Radrennen der Welt kann auf vergleichbare Wurzeln zurückblicken. Die Tour de France wurde 1903 zum ersten Mal durch die Zeitung *L'Auto* ausgetragen. Die erste Auflage umfasste eine Distanz von insgesamt 2.500 km, welche in insgesamt sechs Etappen bewältigt werden mussten [4]. In dieser Zeit stellten Radrennen eine Möglichkeit zur Auflagensteigerung für die jeweils berichtenden Zeitungen dar. Diese monopolisierten die Berichterstattung nach Möglichkeit. Wie anhand der oben genannten Rennen zu erkennen ist, bestand über eine gewisse Dauer eine Tendenz zu immer längeren Rennen [4]. Mit der Radioübertragung entstand eine neue Form der Berichterstattung, durch die erstmals die Möglichkeit gegeben war, live über die Geschehnisse auf der Strecke und insbesondere den Zieleinlauf zu berichten. Gemeinsam war beiden Arten der

Übertragung, dass die Leserschaft wie auch die Zuhörenden vor dem Radio sich voll und ganz auf die Schilderungen der Reporter (damals allesamt Männer) verlassen mussten. Nicht wenige der Legenden aus der damaligen Zeit entspringen daher eher der ausgeprägten Phantasie der Reporter, welche durch die Notwendigkeit beflügelt wurde, möglichst spektakuläre Geschichten zur Steigerung von Auflage (Zeitung) und Einschaltquote (Radio) zu liefern. Dies änderte sich, als Radrennen ab 1952 regelmäßig im Fernsehen übertragen wurden. 1960 konnte erstmals ein Rennen – kein geringeres als das Radsportmonument Paris – Roubaix – komplett aus der Luft per Helikopter gezeigt werden.

„Der wichtigste Effekt, den das Aufkommen des Fernsehens hatte, bestand darin, dass die Legendenbildung rund um den Radsport größtenteils ein Ende nahm. Nun, da das Publikum die Rennen selbst auf dem Bildschirm sah, anstatt exaltierte Berichte darüber zu lesen, wurde den Rennfahrern weitgehend ihre mythische Dimension genommen.“ [4]

Infolge der neuen technischen Möglichkeiten war es nun möglich, Rennen über ihre gesamte Distanz zu übertragen. Dies hatte auch Folgen für den Charakter der Rennen. Seit dem Beginn der Radioübertragung wurden diese an den damals recht homogenen Tagesablauf der Bevölkerung angepasst: Die Zielankunft fiel mit dem Feierabend zusammen. Bei der Tour de France war die Folge eine Verkürzung der Etappen, die nun in ihrer vollen Länge übertragen werden konnten [4].

Während sich die Übertragung der Radrennen über viele Jahre nicht wesentlich veränderte, prägten digitale Technologien den Radsport selbst deutlich: zunächst durch digitale Tachos, welche eine exakte Geschwindigkeits- und Entfernungsmessung ermöglichten. Diese wurde im weiteren Verlauf durch GPS-Geräte abgelöst, die darüber hinaus die Möglichkeit boten, die gefahrenen Strecken genau zu tracken oder zuvor geplante Strecken nachzufahren. Im Trainingsbereich kam zunächst die Herzfrequenzmessung und später die Leistungsmessung hinzu. Zu beobachten ist, dass die Preise für alle diese Technologien über die vergangenen 20 Jahre deutlich zurückgegangen sind. Während vor allem die Leistungsmessung zur Zeit ihrer Einführung noch ausschließlich für den professionellen Bereich in Frage kam, ist diese heute auch bei Hobbysportler:innen weit verbreitet. Diese Entwicklungen zusammen mit den Möglichkeiten der Mobilfunktechnologie ermöglichen heute neue Einblicke in das Geschehen von Radrennen. So kann nicht nur die Geschwindigkeit der Fahrer:innen live angezeigt werden, sondern ebenfalls die aktuelle Tritt- und Herzfrequenz sowie die Leistung. Diese neuen Informationen ermöglichen dem ambitionierten Radsportfan, die Leistungen der Profis mit der eigenen Leistungsfähigkeit zu vergleichen. Dadurch erwachsen wiederum neue Möglichkeiten der Identifikation mit den Fahrer:innen. Zugleich ändert sich der Blick auf den Radsport nun ein weiteres Mal. Beruhten die ersten Reportagen über Rennen noch auf den nur schwer überprüfbaren Erzählungen der Reporter, wurden diese zunächst durch Fernsehbilder abgelöst, welche ab einem bestimmten Zeitpunkt das Renngeschehen von Start bis Ziel abdeckten. Die aktuelle Entwicklung belässt es nicht beim Blick von außen, sondern gibt in Echtzeit Einblicke in die Körper der einzelnen Fahrer:innen.

Paradoxe Weise hat die Verbreitung digitaler Technologien im Freizeit- und Amateurradsport auf den ersten Blick zu gegenläufigen Entwicklungen geführt. Zu den traditionellen Veranstaltungen der Szene wie Jedermann-Rennen und Radtouristikfahrten sind neue Formate gekommen. Großer Beliebtheit erfreuen sich derzeit Langstrecken- und Abenteuerrennen, die teils an die langen Rennen aus den Anfangsjahren des Radsports erinnern. Ein Beispiel hierfür ist das eingangs erwähnte Paris-Brest-Paris. Bei der letzten Austragung im Jahr 2019 wurde die festgelegte Obergrenze von 6.300 auf 7.600 Teilnehmer:innen erhöht und alle Startplätze vergeben. Parallel hierzu sind in den vergangenen Jahren zahlreiche Selbstversorgerrennen entstanden, bei denen die Teilnehmenden ohne Unterstützung von außen teils mehrere Tausend Kilometer lange Strecken zurücklegen müssen. Oftmals werden einige hundert Startplätze unter einer vielfach höheren Anzahl von Bewerber:innen verlost. Die Grundlage dieser Rennen ist die Navigation per GPS-Track. Die Teilnehmer:innen werden mit GPS-Trackern ausgestattet. Hierdurch kann einerseits kontrolliert werden, dass sich alle an die vorgegebene Strecke halten. Andererseits wird es so für Zuschauer:innen möglich, die Rennen per „Dot-Watching“ vom heimischen Bildschirm aus zu verfolgen.

Auch in anderen Bereichen verändert sich der Alltag der Hobbyradsportler:innen: Auf Plattformen wie Strava werden asynchrone Wettkämpfe auf festgelegten Streckenabschnitten ausgetragen. Auf Zwift wird komplett im virtuellen Raum gefahren.

II. Wie die Radverkehrsforschung von den Entwicklungen im Radsport profitieren kann

Ebenso wie das Aufkommen des Fernsehens die Legendenbildung rund um den Radsport beendet oder zumindest erschwert hat, können die neuen, aus dem Radsport stammenden Technologien der Radverkehrsforschung dabei helfen, mit Mythen aus dem Bereich des Alltagsradverkehrs aufzuräumen. Die neuen Technologien eröffnen zahlreiche Möglichkeiten, Radfahren aus der Perspektive der Radfahrenden zu untersuchen und zu verstehen. Damit wird ein Perspektivwechsel möglich: „Die Forschung nimmt nun die Perspektive der Radfahrenden ein, die so von Beforschten zu Forschenden werden.“ [5]

Die neuen, radfahrtspezifischen Sensoren und Technologien haben mehrere Eigenschaften, durch die sie Erhebungen ermöglichen, die zuvor nicht oder nur sehr schwer realisierbar waren. Zentrale Aspekte sind eine (fahrradspezifische) Nutzerfreundlichkeit sowie (relativ) geringe Anschaffungskosten. Um mithilfe von Sensoren, welche am Rad befestigt werden, realistische Daten über alltägliche Radfahrten zu erheben, muss die Technologie quasi unsichtbar sein. Entsprechend klein, leicht und ergonomisch (quasi unsichtbar) müssen die Sensoren sein. Damit Technologie, ob ein Sensor oder eine App, für Massenerhebungen eingesetzt werden können, müssen sie sich leicht und intuitiv bedienen lassen. Zuletzt werden oftmals Sensoren in einer großen Anzahl benötigt, wodurch Geräte aus der Massenproduktion aufgrund des niedrigeren Preises aufwändigen Spezialanfertigungen vorzuziehen sind.

Im Folgenden werden zwei Beispiele für die neuen Möglichkeiten in der Radverkehrsforschung vorgestellt. Erstens das Sensorbike der Hochschule Karlsruhe, welches es durch eine Vielzahl an Sensoren ermöglicht, Radfahrten aus der Perspektive von Radfahrenden zu beschreiben und zu verstehen. Zweitens unterschiedliche Crowdsourcing-Ansätze, welche mit Apps helfen, bestimmte Aspekte des Radfahrens besser zu verstehen.

Die Basis des durch die Hochschule Karlsruhe entwickelten SensorBike bildet ein herkömmliches Trekkingrad, das je nach Bedarf mit unterschiedlichen weiteren Sensoren ausgestattet werden kann [1]. Wichtige Bestandteile sind die bereits genannten Sensoren zur Messung von Geschwindigkeit, Herzfrequenz und Leistung. Wie auch im Radsport dient der GPS-Fahrradcomputer dazu, die so erhobenen Werte zu synchronisieren und zu verorten. Während die Aussagekraft der einzelnen Daten von begrenzter Reichweite ist, ermöglicht die Verknüpfung neue Einblicke in den Alltagsradverkehr. Als Beispiel soll hier die Untersuchung des Energiebedarfs von Radfahrenden in unterschiedlichen Verkehrssituationen – z.B. an Ampeln, Kreuzungen und Führungswechseln – dienen. So wurde mithilfe des Sensorrades die Effizienz unterschiedlicher Führungsformen des Radverkehrs untersucht. Hierzu wurden „Leistung und Fahrgeschwindigkeit von 32 Alltagsradfahrenden auf einem 8 km langen städtischen Rundkurs in Karlsruhe erhoben“ [2], welcher unterschiedliche Führungsformen umfasste. In den erhobenen Daten zeigten sich deutliche Unterschiede bzgl. der Effizienz verschiedener Führungsformen. So wurde in der für Radfahrende freigegebenen Fußgängerzone deutlich mehr Leistung benötigt um eine Geschwindigkeit von 20 km/h zu erreichen, als auf Radwegen im Seitenraum oder im Mischverkehr. Am effizientesten bewegten sich die Proband:innen auf einem straßenunabhängigen Radweg, welcher die Standards von Radschnellverbindungen erfüllte. Mit 94 W für eine Geschwindigkeit von 20 km/h lag die benötigte Leistung rund ein Viertel niedriger als in der Fußgängerzone – dort wurden 125 W für die gleiche Geschwindigkeit benötigt. Die aus dem Radsport stammende Technologie kann also nicht nur dazu beitragen, Training effizienter zu gestalten, sondern ebenfalls Radinfrastruktur zu optimieren.

Plattformen wie Strava, auf denen eine große Anzahl von Radfahrten hochgeladen werden, verfügen über einen großen Fundus an Daten über die Routenwahl ihrer Mitglieder. Aus der Perspektive der Radverkehrsforschung kann man von einem dauerhaften Crowdsourcing-Projekt sprechen. So geben die Strava-Heatmaps Auskunft zur Nutzung von Straßen durch Radfahrende weltweit. Ihre Nutzbarkeit für die Radwegeplanung wurde bereits vor einigen Jahren erforscht. Einschränkungen in der Nutzbarkeit entstehen durch die weit überwiegend männliche Nutzer:innen-Gruppe und den sportbezogenen Nutzungszweck der Plattform. Bei den hochgeladenen Fahrten handelt es sich daher größtenteils um Freizeit- und Trainingsfahrten mit einer durchschnittlichen Länge von über 30 km. Routen von Fahrten mit anderen, alltäglichen Zwecken sind stark unterrepräsentiert [3].

Dennoch sind Gamification und kompetitive Aspekte auch im Alltagsradverkehr keinesfalls zu unterschätzen, wie sich jedes Jahr beim „Stadtradeln“ zeigt. Die Teilnehmer:innen treten gegeneinander in Teams an. Über einem bestimmten Zeitraum

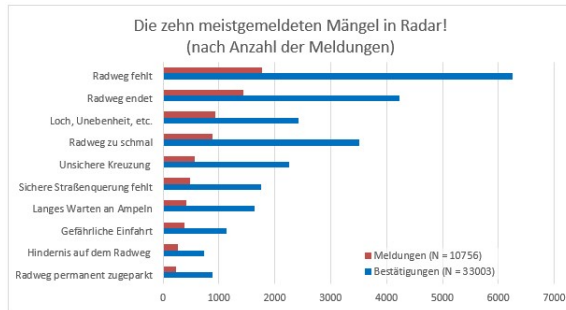


Abbildung 1. Die zehn im Rahmen von #besserRadfahren meistgemeldeten Mängel.

werden alle mit dem Rad zurückgelegten Strecken auf einer Plattform eingetragen. Siegerteams werden in unterschiedlichen Kategorien nach unterschiedlichen Kriterien gekürt. Das Eintragen der zurückgelegten Strecken fand bis vor wenigen Jahren noch komplett per Hand statt. Mittlerweile können Fahrten mit der RADar!-App getrackt werden, die zurückgelegte Distanz wird dann automatisch für die:den jeweilige:n Teilnehmer:in erfasst. Über das reine Tracking hinaus bietet die App die Möglichkeit, Meldungen über positive wie auch negative Situationen abzugeben. Die großen Potenziale derartiger Apps für das Crowdsourcing wurden bei der wissenschaftlichen Begleitung der Aktion #besserRadfahren deutlich. Die Zuhörer:innen und Zuschauer:innen der Sender des Südwestrundfunks (SWR) waren dazu aufgerufen, einen Monat lang, Mängel an der Radinfrastruktur zu melden. Als Plattform wurde die soeben beschriebene RADar!-App genutzt. Innerhalb des Erhebungszeitraums gingen über 10.000 Meldungen ein, die wertvolle Informationen über den Zustand der Radinfrastruktur im Sendegebiet des SWR sowie das subjektive Sicherheitsempfinden der Teilnehmer:innen lieferten [5].

III. Fazit

Um den Anteil Radfahrender am Verkehrsaufkommen zu erhöhen, muss die Forschung sich stärker als bisher mit den Bedürfnissen von Radfahrenden befassen. Sie muss ein Verständnis davon entwickeln, welche Situationen von Radfahrenden als angenehm oder unangenehm wahrgenommen werden. Hierbei spielt das Sicherheitsempfinden eine wichtige Rolle. Dies ist jedoch, wie am Beispiel des Energiebedarfs gezeigt wurde, nicht der einzige Faktor. Um die notwendigen Informationen zu generieren, muss die Radverkehrsforschung stärker als bisher die Perspektive von Radfahrenden einnehmen und diese in den Forschungsprozess einbeziehen. Technologien aus dem Radsport und den Sportwissenschaften können wichtige Impulse für diese dringend notwendige Perspektiverweiterung liefern. Während sich die Verkehrswissenschaften in der Vergangenheit oft stark auf Infrastrukturen oder Fahrzeuge fokussiert haben, standen in den Sport- und

hier insbesondere in den Trainingswissenschaften schon immer die Individuen im Zentrum. Natürlich stellt die Nutzung dieser Technologien kein Allheilmittel dar. Bei der Nutzung von Tracking-Apps ist die bereits erwähnte Überrepräsentation von Personen, die ohnehin begeistert Rad fahren, ein Problem. Um die große Gruppe der potenziellen Radfahrer:innen zu erreichen, müssen jedoch gerade diejenigen berücksichtigt werden, die (noch) nicht Rad fahren.

Literatur

- [1] J. Eckart and J. Merk, "Die Vermessung der Radfahrenden: Analyse des Radverkehrs mit einem Sensorbike mit ubiquitären Sensoren," *Lecture Notes in Informatics*, Gesellschaft für Informatik, Ed., Bonn, 2020.
- [2] J. Eckart, M. Temmen, J. Hauenstein, M. Rabes, and C. Welz, "Kräftig reintreten: Die Effizienz verschiedener Führungsformen des Radverkehrs," *Transforming Cities*, no. 1, pp. 45–49, 2022.
- [3] A. Francke, S. Lißner, and T. Becker, "Big Data im Radverkehr: Ergebnisbericht. Mit Smartphones generierte Verhaltensdaten im Radverkehr," Dresden, 2018.
- [4] B. Maso, *Der Schweiß der Götter: Die Geschichte des Radsports*. Bielefeld: Covadonga, 2011.
- [5] M. Temmen, J. Eckart, J. Merk, A.-S. Karakaya, and D. Bermbach, "Crowdsourcing in der Radverkehrsforschung: Erfahrungen aus der wissenschaftlichen Begleitung der SWR-Mitmachaktion #besserradfahren," *Internationales Verkehrswesen*, vol. 74, no. 1, pp. 66–69, 2022.

Analyse des Radfahrverhaltens in spezifischen Verkehrsanlagen mit Hilfe von Kameras und Drohnen: experimentelle Erhebung in Bogotá, Kolumbien

Martin Bejarano
Institut für Verkehr und Infrastruktur
Hochschule Karlsruhe
martin.bejarano@h-ka.de

Zusammenfassung

Die Analyse der mikroskopischen Variablen, die zum Verständnis vom Verhalten der Radfahrenden führen können, ist ein wesentlicher Aspekt zur Planung und Durchführung der Maßnahmen für eine sichere, komfortable und geeignete Mobilität mit diesen Verkehrsmitteln. Jedoch ist eine solche Analyse aufgrund fehlender Methoden noch nicht umfassend, wobei es dem Entwurf der Fahrradinfrastruktur, der Signalisierung und der durchgeführten Maßnahmen an Verständnis der spezifischen lokalen Anforderungen der Fahrräder mangelt und sich nach standardisierten oder nicht aktualisierten Richtlinien richten. Aus dieser Perspektive ist die Umsetzung von neuen und innovativen Erhebungsmethoden zur spezifischen Variablenanalyse von großer Bedeutung und ein wichtiges Ziel für das Verständnis von detaillierten Informationen des Fahrradverhaltens in bestimmten Verkehrsanlagen. Als Ziel dieses Beitrages wurden zwei Experimente zur Erhebung von Verhaltensmerkmalen in Bogotá, Kolumbien durchgeführt: Einerseits wurde an einem lichtsignalisierten Knoten der Stadt, eine Beobachtung mit Hilfe einer Drohne durchgeführt. Andererseits wurden Kameras verwendet, um das Überholen zwischen Radfahrenden durch ein kontrolliertes Experiment auf einer der am meistgenutzten Fahrradstrecken in der Stadt aufzunehmen. Die Ergebnisse stellen Tendenzen des Verhaltens der Radfahrenden dar. Interessante und hilfreiche Daten konnten zur Verbesserung der beobachteten Orte und zum Verhalten außerhalb der signalisierten Fahrradzonen oder erforderlichen Distanzen beim Überholen von anderen Radfahrenden gesammelt werden.

I. Einleitung

Laut der Inter-amerikanischen Entwicklungsbank (Inter-American Development Bank, IDB) ist Bogotá die Stadt, in der in Lateinamerika am meisten das Fahrrad benutzt wird, da sie über längere Radwege als andere Städte verfügt [1]. Im Jahr 2019 besaß Bogotá über 540 Kilometer Infrastruktur für Radfahrende und die Anzahl von Radfahrten pro Tag betrug über 330.000 [2]. In den Monaten der Pandemie nahm die Fahrradnutzung stark zu. Die Bewohner und Bewohnerinnen Bogotas haben das Fahrrad als sicheres Transportmittel in der Stadt neu erfunden. Im April 2020 wurden 360.000 tägliche Fahrradfahrten registriert und bis Dezember desselben Jahres war die Zahl bereits auf 650.000 gestiegen, was

nach Angaben des Mobilitätsministeriums eine Steigerung von 80 % bedeutet [3]. Diese Zunahme stellt eine große Herausforderung für die Verkehrsplanung bzw. die Radinfrastruktursplanung der Stadt dar. Die aktuellen Verkehrsanlagen müssen nicht nur verbessert, sondern auch an die Anforderungen der zunehmenden Anzahl an Radfahrenden angepasst werden. Die Erzielung notwendiger Maßnahmen ist jedoch erschwert aufgrund negativer Synergien zwischen Zustand und Planung. Einerseits weist laut der letzten Diagnose der Mobilitätsbehörde von Bogotá das Netzwerk Mängel in Kohärenz auf Makroebene (Konnektivität) und Mikroebene (Kreuzungskonfiguration) auf. Dies ist eine Situation, in der die Effizienz abnimmt und das Risiko von Verkehrsunfällen zunimmt [4]. Andererseits sind die existierenden technischen Leitfäden und politischen Planungsstrategien noch nicht ausreichend zum Verständnis des Radverhaltens und infolgedessen auf die Unterstützung von neuen Mobilitätstrends ausgerichtet.

Politisch gesehen stellen die Planhauptstadt „Fahrrad-Politik 2021–2039“ und der nationale „Verkehrssicherheitsplan 2021–2031“ die grundlegenden Prinzipien zur Förderung der nachhaltigen Mobilität und zur Anpassung des Fahrradinfrastrukturnetzes dar. Im Jahr 2016 wurde der nationale Radinfrastrukturleitfaden für kolumbianische Städte veröffentlicht, um den planungstechnischen Aufbau eines großen nationalen Radverkehrsinfrastrukturnetzes, als Teil eines nationalen Systems nachhaltiger Mobilität zu unterstützen [5]. Darüber hinaus verfügt Bogotá mit dem Handbuch zur Verkehrsplanung einen Leitfaden mit Hinweisen und Empfehlungen für die Gestaltung von Radinfrastruktur bzw. für die Planung und den Entwurf.

Obwohl sich alle Richtlinien und politischen Ansätze auf die Verbesserung der Radinfrastruktur fokussieren, sind die Methoden und Variablen zur Analyse von Radfahrenden beschränkt. Dem Planungshandbuch von Bogotá zufolge zielen die Fahrradstudien auf die Erfassung der Leistungsfähigkeit von Radfahrenden im städtischen Radwegenetz durch Verkehrszählung und Messung von Geschwindigkeit ab. Darüber hinaus werden Zeit, Intensität pro Richtung, Zweck der Fahrt, Fahrthäufigkeit und bevorzugte Route als zusätzliche Parameter durch Umfragen analysiert [6]. Insgesamt sind die Methoden und zu erhebenden Variablen nur wenig aussagekräftig, um das Verhalten der Radfahrenden detailliert zu beschreiben. Aufgrund dieser bestehenden Situation ist es notwendig neue Variablen und Methoden zu berücksichtigen. Die Geschwindigkeit an sich stellt zwar eine relevante Variable des Fahrens dar, jedoch existieren neben dieser Variablen weitere Mikrovariablen und Bedingungen der Umgebung, die das Verhalten der Radfahrenden beeinflussen. Um relevanten Mikrovariablen und Bedingungen zu definieren, wurden in Bogotá zwei verschiedene Verkehrsanlagen aus verschiedenen Perspektiven beobachtet. Perspektive A beinhaltet die Fahrtbewegung der Radfahrenden innerhalb eines signalisierten Knotens, welche mit einer Drohne aufgenommen wurde. Perspektive B beinhaltet die Beobachtung der Radfahrenden aus Sicht anderer Radfahrenden während des Zurücklegens einer Strecke. Durch die Beobachtungen war es möglich, verschiedene Situationen quantitativ und qualitativ auszuwerten, wobei eine systematisierte Rangfolge von Faktoren erstellt wurde. Durch die Auswertung konnten andere Variablen und Situationen identifiziert werden, die in vorherigen

Studien in Bogotá nicht berücksichtigt wurden.

II. Methode

Um eine umfassende Erhebung durchzuführen, wurden wie bereits erwähnt, zwei Perspektiven gewählt: In der Perspektive A wurden relevanten Variablen der Radfahrenden in Bezug auf das Verhalten an einem lichtsignalisierten Knoten identifiziert. Die Videoaufnahme mit Hilfe einer Drohne stellte eine geeignete Situation dar, um die Variablen bezüglich der Einhaltung der Verkehrsregeln und Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmenden je nach Fahrentscheidung aus einer 2D-Position zu beobachten. Der Vorteil der Perspektive liegt in der möglichen Teilung der beobachteten Zone in geometrische und signalisierte Abschnitte. Daher ist die Bewertung der Kreuzungskonfiguration je nach Analyse der individuellen Entscheidungen eine der wichtigsten Ergebnisse. In der Perspektive B wurden relevanten Variablen der Radfahrenden identifiziert, die während eines kontinuierlichen Fahrens auftreten. Hierfür wurden Kameras am Helm von Proband:innen installiert. Anders als bei Perspektive A wurden die Bedingungen mit einer Gruppe von Radfahrenden beeinflusst, um die Entscheidung der übrigen Radfahrenden zu beobachten. Beide Erhebungen wurden in der Rush Hour durchgeführt und beide Perspektiven wurden sowohl qualitativ als auch quantitativ bewertet. Die spezifische Planung und Erhebung für jede Situation werden im Folgenden erklärt.

A. Erhebung in einem lichtsignalisierten Knoten

Die Kriterien zur Auswahl des lichtsignalisierten Knotens in Bogotá erfassen fünf grundlegende Aspekte:

- Kreuzungskonfiguration mit unterschiedlichen physischen Konditionen (benutzbare Oberflächen, benutzbare Breite des Fahrradwegs, Signalisierung, Steigung)
- Verbindung zwischen Hauptstraßen der Stadt
- hohe Anzahl an Zufußgehenden und Radfahrenden aufgrund kommerzieller Aktivitäten
- Interaktionen und ständiger Konflikt mit anderen Verkehrsteilnehmenden
- Essentieller Verbindungsknoten der Radwegenetze der Stadt

Der aufgrund der definierten Kriterien ausgewählte Knoten befindet sich im nord-westlichen Teil der Stadt. Die Kreuzungskonfiguration ist der relevante Parameter, denn die Radfahrenden müssen drei unterschiedliche Zonen queren, um über den ganzen Knoten zu kommen. Aufgrund einer ÖPNV Haltestelle (TransMilenio) passiert außerdem ein hoher Fußgängerstrom den Knoten. Zudem befinden sich dort Restaurants und kommerzielle Läden, was eine hohe Dichte an PKW und LKW verursacht. Das Aufkommen an Radfahrenden an dieser Kreuzung ist während Corona um mehr als 200% gestiegen [7], was sie zu einem sehr repräsentativen Punkt für die Studie macht.

Nach der Auswahl des Knotens und der Analyse der Zone wurde die Datenerhebung mit Hilfe von Videos durchgeführt. Das mit der Drohne aufgenommene Video wurde in einer Höhe von 47 m mit einem Winkel orthogonal zur Straße aufgenommen.

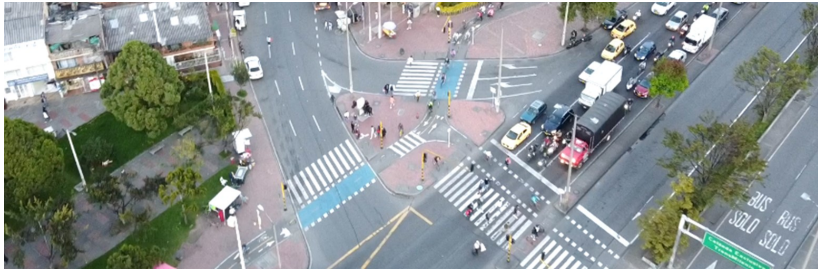


Abbildung 1. Lichtsignalisierter Knoten in der Nordweststadt.



Abbildung 2. Ausgewählter Knoten in Bogotá

Es wurde eine ungefähre Sichtfläche von 1500 m^2 erreicht. Die Verkehrszählung der zwei Hauptrichtungen der Kreuzung wurde ebenfalls durchgeführt, wodurch insgesamt 1.326 Radfahrende erfasst wurden. Die Drohne wurde orthogonal positioniert, um die Ankunft der Radfahrenden an der Kreuzung, die Route durch die beiden Kreuzungen und die Route durch die Verkehrsinsel zu beobachten. Die Signalisierung und die Infrastruktur ermöglichten es, sehr genau definierte Bereiche und Interaktionen zwischen Fußgängern, Fußgängerinnen, motorisierten Fahrzeugen und Radfahrenden zu beobachten. Da der Knoten unterschiedliche Konfliktzonen und Infrastrukturwechsel umfasst, wurde die Klassifizierung der Daten zusätzlich in fünf Zonen aufgeteilt. Auf diese Weise konnte die Nutzung des Radweges und die entsprechenden Variablen für jede Zone analysiert werden.



Abbildung 3. Ausgewählter Radwegeabschnitt in Zentrum der Stadt

B. Erhebung in einem repräsentativen Radwegeabschnitt der Stadt

Für die Datenerhebung eines repräsentativen Radwegeabschnitts der Stadt in Bezug auf die Verkehrsstärke des Radverkehrs und die Interaktionen zwischen Radfahrenden wurde Folgendes berücksichtigt:

- Radwegabschnitt vom Mischverkehr getrennt
- Zweirichtungsradwege
- Verkehrsstärke des Radverkehrs von mehr als 1200 in der Rush Hour

Der gewählte Abschnitt befindet sich im Zentrum der Stadt. Dieser Abschnitt wurde während der Pandemie gebaut und stieß daher auf große Nachfrage der Radfahrenden. Der Abschnitt enthält einen baulich angelegten Radweg vom Mischverkehr getrennt und hat eine Länge von 1.540 m, zwei lichtsignalisierte Knoten und einen Fußgängerüberweg.

Die Videoaufnahme hatte das Ziel eine bewusst positionierte Gruppe von drei Radfahrenden zu überwachen, insbesondere die Entscheidungen der anderen Radfahrenden beim Erreichen der Gruppe. Um die Situation im Detail zu beobachten, wurden jeweils zwei Kameras eingesetzt. Die erste Kamera wurde auf dem Helm eines Radfahrers platziert, der weit genug entfernt war, um das Überholmanöver zu beobachten. Die zweite Kamera wurde auf dem Helm eines der Gruppenmitglieder installiert, um das Überholmanöver aufzunehmen, bis die Gruppe vollständig überholt ist.

Zur Aufnahme von allen möglichen Überholsituationen ist die Gruppe mit einer konstanten Geschwindigkeit von 11 km/h und einem Abstand von weniger als einem Meter zwischen den Mitgliedern gefahren, sodass die ankommenden Radfahrenden die gesamte Gruppe überholen mussten. Zur Messung der Variablen Zeit, Distanz und Geschwindigkeit wurde jede Überholsituation in drei Abschnitte gegliedert: Abschnitt A: Die zurückgelegte Strecke zwischen der Anfangsposition

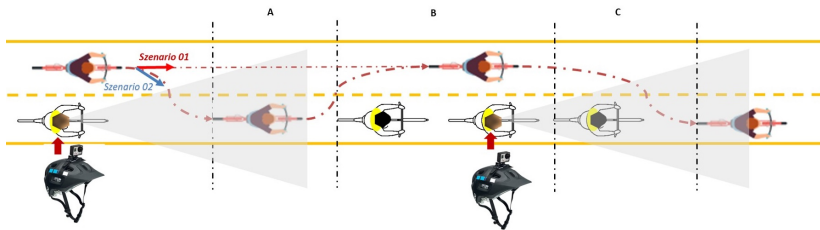


Abbildung 4. Beobachtungsmethode der Überholmanöver



Abbildung 5. Szenario 2

und dem letzten Radfahrenden der Gruppe. Abschnitt B: Die zurückgelegte Strecke auf der Gegenfahrbahn bis die Radfahrenden das erneute Wechseln der Fahrbahn initiieren. Abschnitt C: Vom Initiieren des Fahrbahnwechsels bis zum Beenden des Überholmanövers.

Ein wichtiger Aspekt bei der Messung der Variablen ist, dass das Überholen in zwei Szenarien vorkommt. Szenario 1, wenn sich die Radfahrenden vor dem Überholen der Gruppe nicht auf der rechten Fahrbahn einordnen, sondern auf der Gegenfahrbahn (links) bleiben. Szenario 2, wenn sich die Radfahrenden vor dem Überholen rechts einordnen, das heißt, sich der Geschwindigkeit der Gruppe anpassen und danach überholen. Szenario 2 wird im Folgenden dargestellt.

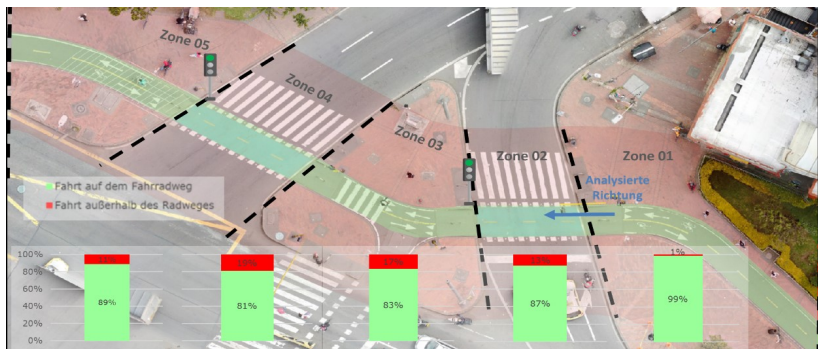


Abbildung 6. Ergebnisse nach Zonen

III. Ergebnisse

A. Lichtsignalisierter Knoten

Nach der Datenerhebung wurde eine Datenbank erstellt, um die Daten systematisch zu strukturieren. Eine Stichprobe von insgesamt 300 Radfahrenden wurde individuell beobachtet und klassifiziert. Davon wurden 210 Radfahrende von Ost nach West gezählt, weshalb sich die Analyse auf diese Radfahrenden fokussierte. Bei der Analyse wurden die Radfahrenden je nach Nutzung des Fahrradweges klassifiziert. Wenn ein Radfahrender den Radweg verließ, zählte dies als regelabweichendes Verhalten und der Grund der Entscheidung wurde beschrieben. Außerdem wurden die Variablen Geschwindigkeit, Zeit und Einhaltung des Ampelsignals je nach grünem oder rotem Licht ausgewertet. Die analysierten Daten nach Nutzung des Fahrradweges zeigen, dass drei von zehn Radfahrenden den Fahrradweg in mindestens einer Zone nicht verwendet haben. In der Zone 01 als Beginn des Knotens wird der Radweg fast immer benutzt, in anderen Zonen kommt es jedoch vor, dass Radfahrende außerhalb des Radweges fahren. Die Gründe, warum die Radfahrenden außerhalb des Radweges fahren, entsprechen:

- 1) Überholen und überqueren bei rotem Signal (37%)
- 2) Wartezone an Ampeln voller Fußgänger und Fußgängerinnen und anderer Radfahrender (19%)
- 3) Überholen von anderen Radfahrenden (17%).

Bezüglich der Einhaltung des Ampelsignals bei zwei Übergängen mit Ampeln, sind zwei von zehn Radfahrenden bei Rot gefahren. In Zone 02 wurden 88% dieser Fälle beobachtet.

Die erhobenen Daten bezüglich der verwendeten Zeit und Geschwindigkeit beim Zurücklegen des Knotens zeigen stark voneinander abweichende Werte je nach Lichtphase der in Zone 02 und Zone 04 existierenden Ampelsignale. Im Fall der gleichzeitigen Grünphase der zwei Ampelanlagen sind die Zeitwerte in allen Zonen,

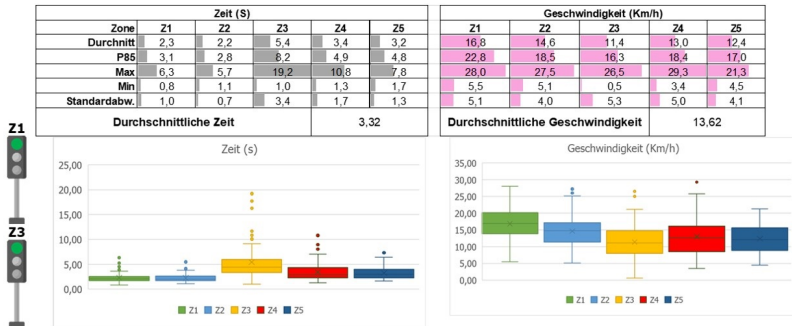


Abbildung 7. Ergebnisse Zeit und Geschwindigkeit: Grünphase

außer Zone 03, ähnlich. Gründe dafür sind die Fußgänger und Fußgängerinnen, die den Radweg überqueren oder die Wartezone zum Überqueren in Richtung Nord-Süd nutzen. Bezüglich der Geschwindigkeit sind die Werte in allen Zonen mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 13,6 km/h im gesamten Verkehrsknoten sehr ähnlich. Die höchsten Geschwindigkeitswerte treten in Zone 01 auf, in der die Radfahrenden von einem kontinuierlichen Radweg kommen.

Im Fall der Rotlichtphase in Zone 02 und der Grünphase in Zone 04 ist die durchschnittliche Zeit beim Zurücklegen des ganzen Knotens im Vergleich zur durchschnittlichen Geschwindigkeit in der Grünphase dieser zwei Ampelsignale nur anderthalb Sekunden höher. Ein wichtiger Grund dafür ist das regelabweichende Verhalten bei der Rotlichtphase in Zone 02. Jedoch ist das 85. Perzentil in der Zone 01 von 19,6 s eine Situation, die nach den kolumbianischen Regelwerken einem „Level of Service B“ entspricht (guter Service). Bezüglich der Geschwindigkeit sind die durchschnittlichen Werte vor der Ampelanlage (Zone 01) und danach (Zone 02) unter 10 km/h. Im Fall der Rotlichtphase in Zone 04 und der Grünphase in Zone 02 ist die gesamte Zeit im Vergleich zur durchschnittlichen Zeit bei der Grünphase dieser zwei Ampelsignale fast viermal höher und zweimal höher im Vergleich zur durchschnittlichen Zeit bei den Rotlichtphasen in Zone 02. Wie vermutet ist die Wartezeit an der Ampel in der Zone 04 sehr hoch. Der 85. Perzentil entspricht 53,4 s und somit einer Situation, die nach den kolumbianischen Regelwerken einem „Level of Service B“ entspricht (schlechter Service). Bezüglich der Geschwindigkeit sind die Werte je nach Zonen sehr unterschiedlich. Die Geschwindigkeit der Radfahrenden sinkt rasch zwischen den Zonen 01 und 03.

B. Fahrradweg

Insgesamt wurden 187 Überholmanöver bei den Szenarien 01 und 02 aufgenommen. Nur 3% der Radfahrenden hatten Überholgeschwindigkeiten zwischen 28 km/h und 32 km/h. In 16% der Fälle nahmen die Radfahrenden Überholgeschwindigkeiten von mehr als 22 km/h auf. Geschwindigkeiten zwischen 18 km/h und

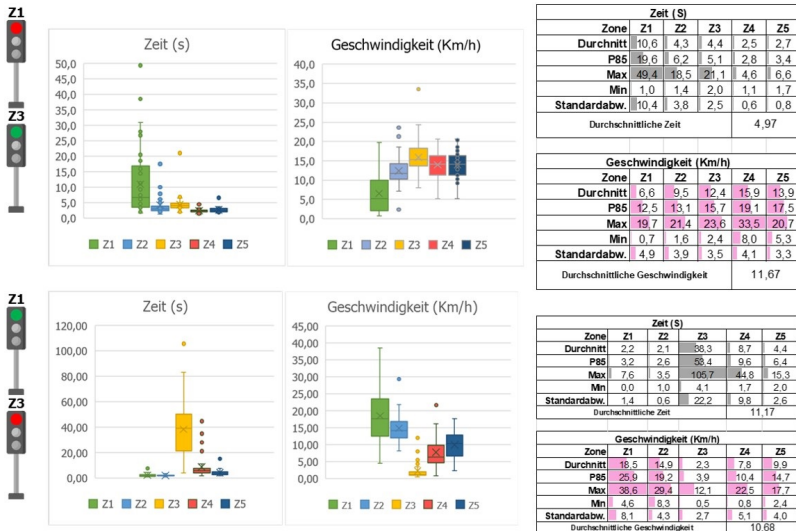


Abbildung 8. Ergebnisse Zeit und Geschwindigkeit: Rotlichtphase

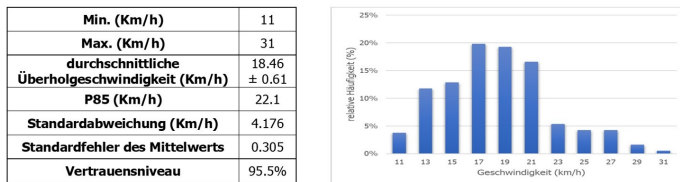


Abbildung 9. Geschwindigkeit Indikatoren

22 km/h kommen mit 36% am häufigsten vor. Die folgende Tabelle zeigt die spezifischen Indikatoren für die Überholgeschwindigkeit.

Der durchschnittliche Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem überholten und dem überholenden Radfahrenden beträgt zwischen 6,85 km/h und 8,07 km/h. Dafür wurde eine durchschnittliche Beschleunigung von $11,5 \text{ m/s}^2$ benötigt. Von der Gesamtzahl der beobachteten Radfahrenden waren 18% Frauen. Die durchschnittliche Geschwindigkeit auf ebenem Niveau beträgt bei Radfahrerinnen 16,25 km/h und bei Radfahrern 18,73 km/h. Die durchschnittliche Geschwindigkeit im einzigen Sektor mit negativer Steigung beträgt bei Radfahrerinnen 19,6 km/h und bei Radfahrern 19,5 km/h. Aus den 187 Überholsituationen konnten Daten von 17 Radfahrenden im Szenario O2 gemessen werden. Zwei Geschwindigkeiten beim Überholen wurden identifiziert. Beim Übergang von Abschnitt A (11 km/h) zu B ist

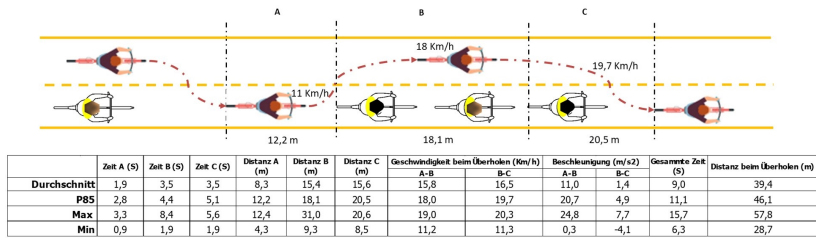


Abbildung 10. Ergebnisse Geschwindigkeit und erforderliche Distanz beim Überholen

die erforderliche Geschwindigkeit durchschnittlich 5 km/h höher um die Gruppe zu überholen. Zudem ist das Zurücklegen einer Distanz von 8,3 m im Durchschnitt erforderlich. Beim Übergang von Abschnitt B zu C ist die Geschwindigkeit im Durchschnitt 0,7 km/h höher als in Abschnitt B. Durchschnittlich benötigten die Radfahrenden 39,4 m und 9 s, um das Überholen der Drei-Personen-Gruppe zu beenden. Das 85. Perzentil beträgt 46,1 m und eine Dauer von 15,7 s. Die Daten und Berechnungen für die analysierten Überholsituationen sind unten dargestellt.

IV. Diskussion

Der Blick aus der Perspektive der Drohne ermöglicht Beobachtungen für jeden einzelnen Radfahrenden, was aus anderen Perspektiven nicht möglich oder nur beschränkt möglich wäre. Dieser Vorteil erleichtert die Systematisierung und Auswertung von Verhaltenssituationen, womit spezifische Probleme in Verkehrsknoten dieser Art identifiziert werden können. Häufig wird in Städten wie Bogotá die Verkehrsqualität von lichtsignalisierten Knoten unter Berücksichtigung der Wartezeit als Hauptindikator bewertet. Diese Bewertung beinhaltet keine zusätzlichen Faktoren und Verhaltensweisen, wie sie in dieser Studie beobachtet und klassifiziert wurden: etwa der Einfluss der Signalisierung auf die Nutzung des Verkehrsraum bei grünem oder rotem Ampelsignal, das Zurücklegen im großen Knoten unter Berücksichtigung der Zeit und Geschwindigkeit je nach Zonen mit spezifischen Bedingungen oder das Verhalten von einzelnen Verkehrsteilnehmenden. Die Ergebnisse der einzelnen Zonen im analysierten Knoten sind sehr wichtige Indikatoren zur Verbesserung der Radinfrastruktur und zur Verkehrsplanung für andere Verkehrsteilnehmende. Es ist notwendig für die Zone O2 des analysierten Knotens, einen kontinuierlichen Radweg einzubauen. Die niedrige Anzahl von Pkw, die im Video beobachtet werden konnten, und die daraus resultierende hohe Anzahl von Radfahrenden bei rotem Ampelsignal zeigt, dass die Priorität auf den Radfahrenden liegen sollte. Aufgrund der hohen Anzahl von Fußgängern und Fußgängerinnen in Zone O3 ist es offensichtlich, dass die Signalisierung bei rotem Ampelsignal keine Rolle spielt, da sich sowohl Fußgänger und Fußgängerinnen als auch Radfahrende auf der Verkehrsinsel ohne Berücksichtigung der Signalisierung gruppieren. In diesem Szenario befanden sich

die Radfahrenden außerhalb des Radweges und Fußgänger und Fußgängerinnen teilweise im Bereich des Radweges. Auf der anderen Seite ermöglicht der Blick aus der Perspektive der Kameras beim Radfahren wesentliche Informationen zum Verständnis der Begegnungen zwischen Radfahrenden zu erhalten. Ob Radfahrende unter bestimmten Bedingungen beschleunigen und Überholen, wurde beobachtet und ausgewertet. Werte, wie die durchschnittliche Distanz und die notwendige Geschwindigkeit zum Überholen, sind entscheidende Faktoren, um die Trassierung und Signalisierung dieser Art von Radwegen zu entwerfen. Der analysierte Radweg ist ausreichend (bezüglich Breite, Zustand, Länge und Signalisierung) für die beobachtete Nachfrage von Radfahrenden, weshalb die Begegnungen zwischen Radfahrenden geeignete Bedingungen anbieten und damit sichere Fahrten ermöglichen. Aus dieser Sicht ist die Methode mit der Gruppe eine bedeutsame experimentelle Situation und führt dazu, künftige Ansätze zu überprüfen.

Literatur

- [1] Banco interamericano de Desarrollo (BID). Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe. Guía para impulsar el uso de la bicicleta, 2015.
- [2] Alcaldía de Bogotá. Consejo de Política Económica y Social del Distrito Capital CONPES D.C, 2021. "POLÍTICA PÚBLICA DE LA BICICLETA 2021-2039"
- [3] Secretaría Distrital de Movilidad (SDM). El coronavirus y nuestro reencuentro con la bicicleta, 2020. Online verfügbar unter: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/el-uso-de-la-bicicleta-durante-la-pandemia>
- [4] Secretaría Distrital de Movilidad (SDM). Diagnóstico para la política pública de la bicicleta, 2021.
- [5] Ministerio de Transporte de Colombia. Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas. Bogotá D.C, 2016
- [6] Alcaldía de Bogotá. Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y del transporte, 2006.
- [7] Alcaldía de Bogotá. "En siete meses duplicamos número de viajes en bicicleta en Bogotá": Alcaldesa, 2020. Online verfügbar unter: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/numero-de-viajes-en-bicicleta-en-bogota-se-duplico-en-siete-meses>

Vergleich des Blickverhaltens von Rad- und E-Scooterfahrenden auf Fahrradstraßen: Analyse einer Eye-Tracking-Studie in Bezug auf Verkehrsschilder und Straßenmarkierungen

Nicolas Walther
Hochschule Karlsruhe
wani1024@h-ka.de

Mathias Trefzger
*Institut für Ubiquitäre
Mobilitätssysteme*
Hochschule Karlsruhe
mathias.trefzger@h-ka.de

Maximilian Pils
Hochschule Karlsruhe
pima1028@h-ka.de

Thomas Schlegel
*Institut für Ubiquitäre
Mobilitätssysteme*
Hochschule Karlsruhe
thomas.schlegel@h-ka.de

Zusammenfassung

Die Wahrnehmung der Verkehrsumgebung spielt eine wichtige Rolle für die Verkehrssicherheit. In unserem Paper stellen wir eine Studie im realen Verkehrsgeschehen vor, bei der wir untersuchen, wie Schilder und Markierungen von Rad- und E-Scooterfahrenden wahrgenommen werden. Hierfür wurden Blickdaten aufgenommen, ausgewertet und die Blickmetriken von Radfahrenden mit E-Scooterfahrenden verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass E-Scooterfahrende etwas länger Schilder fokussierten als Radfahrende. Auch wurden von den E-Roller-Fahrenden mehr Straßenmarkierungen fokussiert. Die Ergebnisse deuten daraufhin, dass E-Scooterfahrende die untersuchten Bereiche etwas aufmerksamer wahrnehmen als Radfahrende.

Index Terms

Eye-Tracking, E-Scooter, Fahrrad, Mikromobilität, Evaluation

I. Introduction

E-Scooter stehen auch noch in der heutigen Zeit, zwei Jahre nach ihrer offiziellen Zulassung 2019 in Deutschland [1] zunehmend in der öffentlichen Kritik. Der Vorwurf lautet: Anstatt Fahrten des MIV's zu reduzieren, werden Fahrten aus dem Umweltverbund entzogen. Oftmals werden Sicherheitsbedenken geäußert, sowie die Umweltbilanz der E-Scooter in Frage gestellt. Doch ist die Kritik in diesem Ausmaß gerechtfertigt? Ist die Daseinsberechtigung des E-Scooters tatsächlich an die Reduzierung der MIV-Fahrten gebunden? Durch die fehlende Datengrundlage werden Debatten oft emotional und subjektiv, statt rational und objektiv geführt. Der Fokus liegt auf der Diskrepanz zwischen dem Status Quo und der Erwartungshaltung

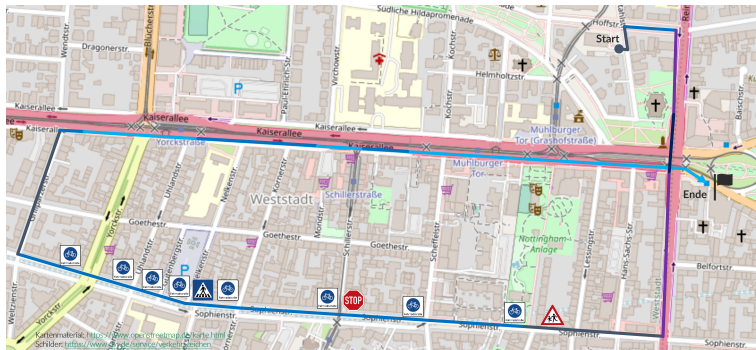


Abbildung 1. Teststrecke Studie

hinsichtlich des Stellenwerts des E-Scooters in den urbanen Mobilitätskonzepten. Um dieser Herausforderung entgegenzuwirken und die Debattenkultur zukünftig faktenbasierter zu gestalten, ist es Ziel dieses Papers, diese Diskrepanz zu minimieren.

Während die Studien den Fokus auf das Verkehrsmittelwahlverhalten und die Regeltunde legen, ist es das Ziel dieser Studie die Blickverhalten von Fahrrad- und E-Scooterfahrenden zu vergleichen.

II. Methodik

In diesem Kapitel wird die Grundlegende Methodik beschrieben, auf welcher diese Arbeit aufbaut. Darunter zählt unter anderem die Streckenwahl, die benutzte Technik sowie das Vorgehen innerhalb der Studie.

A. Streckenwahl

Um einen geeigneten Untersuchungsraum für die Studie zu finden, musste dieser mehrere Kriterien erfüllen. So muss der Untersuchungsraum zunächst aus einem weitestgehend großem Anteil Fahrradstraße und Radfahrstreifen bestehen. Weiterhin muss die Strecke intuitiv und leicht zu merken sein. Zudem soll die Strecke über ein reges Verkehrsaufkommen und über eine ausreichende Beschilderung verfügen. Unter Einhaltung dieser Kriterien, wurde folgende Strecke in Karlsruhe ausgewählt (vgl. Abb. 1).

Der Zeitaufwand für eine Fahrt auf dieser Strecke beträgt ungefähr 20 Minuten und besitzt eine Fahrstrecke von ca. 3,4 Kilometern. Insgesamt besitzt die Studienroute elf relevante Straßenschilder und Markierungen. Unter relevanten Straßenmarkierungen und Schildern zählen nur diese, welche sich auf einer Fahrradstraße befinden.

B. Studienablauf

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu garantieren, absolvierten alle Probanden folgenden Ablauf:

- Fragebogen
- Erklärung der Teststrecke
- Erste Fahrt
- Zweite Fahrt (Verkehrsmittel alternierend)

Die Studie startet mit einem Fragebogen, welcher den Datenschutz und die soziodemografischen Daten der Probanden erfasste. Anschließend wurde den Probanden die Eye-Tracking-Brille aufgesetzt und kalibriert. Danach wurde die Teststrecke erklärt und die erste Fahrt absolviert. Bei der zweiten Fahrt wechselte das Verkehrsmittel. Innerhalb der Studie wurde das Startverkehrsmittel alternierend gewählt, sodass keine Verzerrung resultierte. Der Erhebungszeitraum war der 08.09.2021 - 15.10.2021.

C. Technik

Für die Ermittlung des Blickverhaltens wurde die Eye-Tracking Brille "TobiiGlasses 2" verwendet. Mit Hilfe eines Auswertungsprogramms ist es nun möglich, das Blickverhalten probandenspezifisch zu analysieren. Aufgenommen werden die Blickmuster mittels einer Spiegelung von Infrarotstrahlen in der Pupille. Die Brille erkennt diese Spiegelungen und kann dadurch einen Gaze Point (Blickpunkt) festlegen, welcher in einem festlegbaren Radius die Fokussierungspunkte des Probanden in einer Wiederholungsrate von 60 Frames pro Sekunde (FPS) anzeigt.

III. Auswertung

In diesem Kapitel wird die grundlegende Auswertung dieses Papers behandelt.

A. Soziodemografische Daten

An der Studie nahmen 40 Probanden teil. Von diesen 40 Probanden waren 9 (22,5%) weiblich und 31 (77,5%) männlich. So ist der durchschnittliche Proband dieser Studie männlich und zwischen 19 und 29 Jahren alt. Dadurch erscheint dieses Ergebnis keinesfalls gleichverteilt, jedoch spiegelt es die tatsächlichen Nutzergruppen von E-Scooter in Städten wider. Studien aus Oslo, Wien und der USA identifizieren den Mann unter 40 Jahren als den prototypischen Nutzer von E-Scootern (vgl. [8], [9] & [7]). Laut mehrerer Studien befindet sich die Hauptnutzergruppe von E-Scootern Sharing Angeboten zwischen 18 und 25 Jahren. Ein interessantes Muster ist hier auch bei der E-Scooter Nutzung im privaten Umfeld ersichtlich. So ist bei der Zulassung der in Deutschland versicherten E-Scooter die Altersgruppe von 20 bis 29 Jahren mit lediglich 19,3% vertreten. Hier liegt die dominante Altersgruppe zwischen 30 bis 39 Jahren mit einem Anteil von 32,3% . [4]

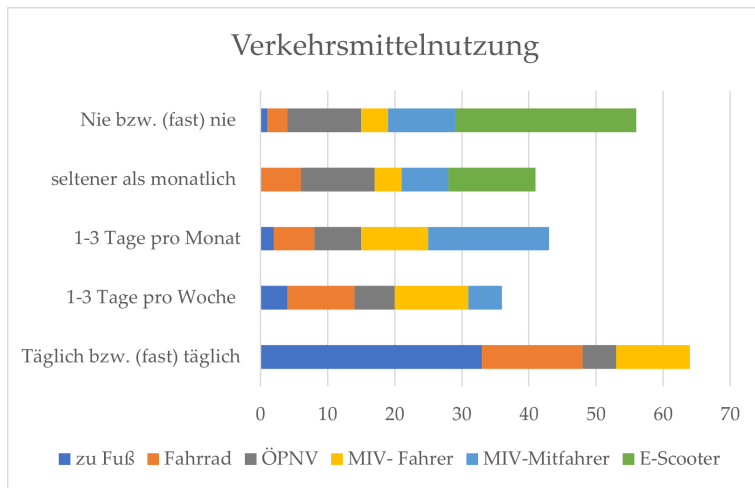


Abbildung 2. Verkehrsmittelnutzung der Probanden

Bei der Ermittlung wie viele der Probanden einen Führerschein besitzen, gaben 38 Probanden (95%) an, dass sie einen Führerschein im Schnitt 9,5 Jahre ($SD=10,4$) besitzen. Laut Statista [3] besitzen in Deutschland (Stand: 2021) 84,34% einen Führerschein. Somit herrscht innerhalb der Probandengruppe eine marginale Abweichung zum Durchschnittswert in Deutschland.

Als nächstes wurde die allgemeine Verkehrsmittelnutzung der Probanden erhoben. Die Verkehrsmittel als auch die Auswahl der Häufigkeiten wurden hier aus dem MID [2] entnommen.

So ist es, wie in Abbildung 3, schnell ersichtlich, dass ein Anteil von 27% der Probanden nie bzw. fast nie den E-Scooter benutzt haben. So legen die meisten Probanden ihre täglichen Wege zu Fuß (33) und per Fahrrad (15) zurück. Erstaunlich gering ist hier der Anteil der Probanden, die mit dem ÖPNV und dem MIV unterwegs sind. Kumuliert ergeben sich aus beiden Teilen ein Anteil von 16 Probanden, die diese Verkehrsmittel täglich oder fast täglich benutzen. Weiterhin erkennbar ist, dass der Anteil der MIV-Fahrer sich nicht ersichtlich zwischen der Häufigkeit ändert. So bleibt die Nutzung bis auf seltener als monatlich und nie bei 11 (27,5%) unter allen befragten Probanden. So liegt die aktive Verfügbarkeit und Nutzung eines PKWs in der Probandengruppe deutlich unter dem deutschen Schnitt [5]. Abschließend wurde die Regelkunde der Probanden erhoben. Unter Regelkunde werden hier allgemeine Kenntnisse zu Verkehrsregelungen in Fahrradstraßen abgefragt. Dazu wurden neun unterschiedlich schwere Fragen erstellt. Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass jeder der einen Kfz- oder Fahrrad-Führerschein in Deutschland besitzt, diese Fragen zu 100% beantworten können muss. So wurden unter an-

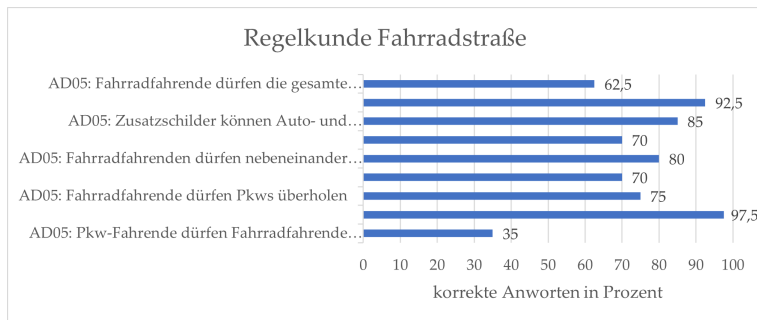


Abbildung 3. Verkehrsmittelnutzung der Probanden

derem Fragen zur allgemeinen Regelung auf Fahrradstraßen abgefragt (rechts vor links, Überholvorgänge etc.). Die Antwortmöglichkeiten bestanden hier aus drei Auswahlmöglichkeiten (trifft zu, trifft nicht zu, unsicher).

Wie in Abbildung 3 dargestellt, fällt das Ergebnis der Abfrage ernüchternd aus. Im Schnitt beantworteten etwa die Probanden 2/3 der Fragen korrekt. Eine hohe Diskrepanz der Korrektheit gibt es hier bei der Frage ADO5: Pkw-Fahrende dürfen Fahrradfahrenden in einer Fahrradstraße überholen. Diese Frage beantworteten lediglich 35% aller Probanden korrekt. Die am häufigsten korrekten gegebenen Antworten beziehen sich auf die Fragestellung "Pkw und Motorradfahrer dürfen den Radverkehr weder behindern noch gefährden" mit einer Korrektheitsquote von 92,5% und "Fahradfahrenden dürfen Fahrradfahrenden überholen" mit einer Quote von 97,5%.

So gibt es bei der Auswertung gibt keine ersichtliche Korrelation zwischen der Häufigkeit der Nutzung eines Fahrrads und des Wissens der Regelkunde auf der Fahrradstraße. Dies ist jedoch ein unerwartetes Ergebnis, da dies bedeutet, dass obwohl die Probanden häufig mit dem Fahrrad verkehren, sie nicht alle für die zutreffende Regulierungen kennen. Betrachtete man nun die zusammengefasste Häufigkeit der Verkehrsmittel MIV Fahrer und Mitfahrer entsteht folgende Abbildung.

Weiterhin ist ersichtlich, dass die Probanden deutlich seltener mit dem MIV Fahrten zurücklegen als mit dem Fahrrad. So benutzen hier lediglich zwei Probanden den MIV als Fahrer täglich und ein Proband den MIV 1-3-mal die Woche. Summa summarum ist somit die Nutzungshäufigkeit des MIV im Verhältnis eins zu drei. Somit ist deutlich erkennbar, dass die Probandengruppe mehr Fahrrad als MIV affin ist. Dadurch kann die Hypothese erstellt werden, dass Fahrradfahrer, welche wenig bis selten mit dem MIV verkehren, weniger Wissen im Konfliktfall Kfz/Fahrrad und den Regulierungen im Straßenverkehr besitzen als Probanden, welche gleichverteilter oder zumindest häufiger mit dem MIV unterwegs sind. Diese Hypothese belegt sich im Rahmen dieser Studie auch bei genauerem betrachten der gegebenen Antworten.

Die Probanden welche als unsicher eingestuft wurden und fahrradaffin sind, beantworteten ebenfalls häufig die Fragen falsch, welche MIV-Fahrer betreffen. Somit kann die Annahme getroffen werden, dass Fahrradfahrende, welche nicht häufig mit dem MIV unterwegs sind, dementsprechend sich schlechter in der Regelkunde auskennen.

B. Erkennung Straßenschilder

Wie bereits erwähnt, verläuft die objektive Bewertung hauptsächlich aus den Daten, die mittels der Eye-Tracking-Brille gewonnen worden sind. Insgesamt sind dies 18 Stunden und 20 Minuten an aufgenommenen Eye-Tracking Aufnahmen. Der durchschnittliche Gaze-Sample, sprich die Qualität der Eye-Tracking-Aufnahmen, entspricht 72 % (SD=18,6).

Anhand der Eye-Tracking Aufnahmen konnte festgestellt werden, wie oft Schilder erkannt wurden. Auf der Strecke, welche für die Schilderkennung in Frage kommt, befinden sich 11 verschiedene Straßenschilder. Diese bestehen aus einem Stoppschild, einem Zebrastreifenschild, einem verkehrsberuhigten Bereich und und acht Fahrradstraßenschildern.

So nahmen bei der Erstfahrt auf dem E-Scooter 18 Probanden Schilder im Allgemeinen wahr. Auf dem Fahrrad dagegen nahmen 19 Probanden Schilder wahr. Insgesamt wurden so während der Erstfahrt auf dem E-Scooter 63 und auf dem Fahrrad 62 Schilder von den Probanden erkannt. Bei einer maximalen möglichen Gesamtzahl von 220 Schilderkennung für alle Erstfahrten, entspricht dies einer Erkennungsquote von 28,64% für E-Scooter und 28,19% für Fahrradfahrende. So wurde bei der Erstfahrt nicht mal jedes dritte Schild von den Probanden erkannt. So erscheint dieses Ergebnis anfangs als eine düstere Prognose in Bezug auf die Verkehrssicherheit der Probanden, jedoch lässt sich diese geringe Quote durch mehrere Faktoren erklären.

In Deutschland gibt es 500 verschiedene Verkehrszeichen welche bundesweit über 20 Millionen mal aufgestellt wurden [9]. So ist der Mensch während der Fahrt auf einer Straße vielen unterschiedlichen Reizen ausgesetzt. Nach der Millerschen Zahl, kann ein Mensch gleichzeitig 7 ± 2 Informationen wahrnehmen und im Kurzzeitgedächtnis aufbewahren. Aufgrund der zahlreichen Einflüsse während der Fahrt, wird diese Informationsobergrenze schnell erreicht. Ein weiterer Grund ist, dass viele Schilder repetitiv sind. So muss nach StVO bei jeder Einmündung und Kreuzung ein Verkehrsschild angebracht werden. Da die Haupteerhebungsstraße viele Seitenstraßen besitzt, ist dadurch auf einer Strecke von einem Kilometer neun Mal das gleiche Verkehrsschild anzutreffen. Dadurch wird tendenziell beim Fahren in der Fahrradstraße lediglich das erste Schild aktiv betrachtet.

Weiterhin konnte die Dauer der Schilderkennung gemessen werden. Damit ein visuelles Signal von dem menschlichen Gehirn verarbeitet und realisiert wird, benötigt dieses ungefähr 150 Millisekunden oder zirka $\frac{1}{7}$ Sekunde. So müssen die Probanden das Schild mindestens 150 Millisekunden erkannt haben, um es aktiv als Schild wahrzunehmen. In Bezug auf die Erstfahrten von E-Scooter und Fahrradfahrenden ergibt sich daraus folgendes Ergebnis. Von allen E-Scooterfahrenden, fokussierten

diese ein Schild im Durchschnitt für 0,423 Sekunden ($SD=0,209$). Bei Fahrradfahrenden verringerte sich diese Durchschnittszeit auf 0,396 ($SD=0,222$) Sekunden. So nahmen E-Scooterfahrende im Durchschnitt Verkehrsschilder für 0,027 Sekunden länger wahr als Fahrradfahrende. Bei der Betrachtung der totalen Schilderkennungszeit je Probanden ist ein ähnliches Ergebnis zu erkennen. So betrachtet ein E-Scooterfahrender während der Erstfahrt alle Schilder kumuliert für 1,734 Sekunden ($SD=1,487$). Ein Fahrradfahrender betrachtet bei der Erstfahrt kumuliert alle Schilder lediglich für 1,62 Sekunden ($SD=1,704$). Zusammenfassend besteht kein deutlicher Unterschied bei der Schilderkennung zwischen E-Scooter und Fahrradfahrenden bei Erstfahrten. Nichtsdestotrotz schneiden E-Scooterfahrende marginal besser ab als Fahrradfahrende. Aufgrund der geringen Probandengröße von lediglich 20 Erstfahrten lässt sich diese Aussage jedoch nicht weiter verallgemeinern. So stellt sich weiterhin die Frage, ob es grundsätzlich Unterschiede bei der Erkennung der Schilder zwischen der Erst- und der Zweitfahrt gibt. Um diese These zu betrachten, werden nun die Zweitfahrten betrachtet.

E-Scooterfahrende betrachteten während ihrer Zweitfahrt insgesamt 54 Schilder. Fahrradfahrende dagegen betrachteten während der Zweitfahrt 40 Schilder. So nahm bei der Zweitfahrt die Wahrnehmung von Schildern bei beiden Verkehrsmitteln ab. Dieses Phänomen lässt sich auf den Lerneffekt zurückführen. Die Probanden haben die Strecke zumindest einmal vollständig absolviert, weshalb sie einige Gegebenheiten, wenn auch nur wage und unterbewusst, bereits kennen. Die Schilderererkennung bei den E-Scooterfahrenden nahm um 4,09% und bei Fahrradfahrenden um 10,01% ab. Hierbei ist ein deutlicher Unterschied zwischen den einzelnen Verkehrsmitteln erkennbar. Doch worauf ist dieser Unterschied zurückzuführen? Eine Annahme wäre die Unsicherheit auf dem E-Scooter. So ist es unabhängig davon, ob die Route bereits bekannt ist oder nicht, wenn die Person unsicher auf dem Verkehrsmittel ist, nimmt diese dementsprechend die Umgebung stärker wahr, da die sich die Blicke weiter streuen. Fühlt sich eine Person sicher auf dem Verkehrsmittel und hat dementsprechend mehr Vertrauen auf eine angemessene Reaktion in Gefahrensituationen, entsteht die Gefahr, dass die Person dadurch in eine Art Tunnelblick verfällt. Diese Annahme spiegelt sich ebenfalls in der Fokussierdauer den betrachteten Schilden wider. So fokussierten E-Scooterfahrende ein Schild im Durchschnitt für 0,423 Sekunden ($SD=0,206$). Fahrradfahrende dagegen betrachten ein Schild im Durchschnitt lediglich 0,323 Sekunden ($SD=0,272$).

Bei der Gegenüberstellung dieser Werte mit den Ergebnissen der Erstfahrt, ergibt sich bei den E-Scooterfahrenden in Betracht auf die Durchschnittliche Zeit keinen Unterschied. Bei Fahrradfahrenden dagegen, gibt es eine Differenz von exakt 73 Millisekunden. Bei der totalen Fokussierungsdauer der Schilder benötigten E-Scooterfahrende im Schnitt 1,597 Sekunden ($SD=1,373$) und Fahrradfahrende benötigten 1,296 Sekunden ($SD=1,423$). Insgesamt fokussieren die E-Scooterfahrenden in der Zweitfahrt Schilder länger als Fahrradfahrende.

Dadurch lässt sich in Betracht auf die Frage, ob es Unterschiede zwischen der Erst- und Zweitfahrt bei der Erkennung von Straßenschildern gibt, im Rahmen dieser Studie ein klares Bild erkennen. E-Scooterfahrende nehmen nicht nur im Schnitt mehr

Schilder wahr, sondern fokussieren diese auch länger. Welche Ursachen dies nun haben könnte, ist im Rahmen der erhobenen Daten schwer zu sagen. Ein möglicher Grund dafür kann die Gewohnheit des Verkehrsmittels sein, da Probanden tendenziell objektiv unsicherer fahren, sofern sie sich auf dem benutzten Verkehrsmittel sicher fühlen. Ein weiterer Faktor könnte die Geschwindigkeit darstellen. E-Scooter sind auf maximal 20 km/h begrenzt, wodurch ein durchschnittlicher Fahrradfahrer sich zwischen 10-25km/h [6] bewegt. Doch auf dem Fahrrad gibt es keine physische Begrenzung, sodass hier eine wesentliche höhere Geschwindigkeit möglich ist. Bei erhöhter Geschwindigkeit sinkt der Sichtbereich des Menschen immer weiter. So kann auf dem Fahrrad bei höheren Geschwindigkeiten ein Tunnelblick entstehen, welcher durch die Position des Sitzens auf vielen Rädern weiterhin verstärkt wird (tendenzieller Blick auf die Straße). Um hier jedoch umfassendere faktischen Aussagen zu treffen, müsste diese Studie mit einer deutlich höheren Probandenmenge durchgeführt werden.

C. Erkennung Straßenmarkierung

Die Schildererkennung ist nicht der einzige Faktor, an dem die Objekterkennung geprüft werden kann. So gibt es Fahrrad- und E-Scooterfahrende, welche ihren Blickfokus mehr auf die Straße als auf Beschilderung oberhalb des Kopfes legen. Dieses Verhalten kann weiterhin durch die Form des Fahrrads, beispielsweise ein Rennrad, verstärkt werden, da die Körperposition während des Fahrens dieses Verhalten unterstützt. In Deutschland ist eine Straßenmarkierung zugehörig zu jedem Schild pflicht, wodurch garantiert werden kann, dass eine Markierung immer vorhanden ist. In Bezug auf die Auswertung ist das Betrachten der Straßenmarkierungen im Falle dieser Studie jedoch weniger aussagekräftig als die Auswertung der Schildererkennung. So ist die Erkennung der Markierungen mit mehreren Problemen behaftet, welche bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Aufgrund der Blickposition ist es schwer, eine Fokussierung der Markierungen immer korrekt zu erkennen. Durch einen schlechten Gaze-Sample oder durch starke Sonneneinstrahlungen, kann es dazu führen, dass der Gaze-Plot nicht ausreichend ist. Dieser Fall des schlechten Gaze-Samples tritt bei dem Betrachten einer Markierung, aufgrund der Kopfposition, häufig ein. Weiterhin sind einige Markierungen auf der Straße abgefahren, wodurch eine Erkennbarkeit dieser nicht immer garantiert werden kann. Abschließend gibt es noch das Problem der passiven Wahrnehmung. Schauen Personen tendenziell häufig auf den Boden, nehmen sie die Markierungen zwar auf den Eye-Tracking Aufnahme war, da Sie diese zwangsweise für eine kurze Zeit im Blickfokus hatten. Diese bedeutet jedoch nicht, dass diese die Markierung bewusst wahrgenommen haben müssen, weshalb dies Ungenauigkeit bei der Analyse berücksichtigt werden muss.

Bei der Auswertung der Markierungen, wurde ebenfalls zwischen Erst- und Zweitfahrt differenziert. In der Erstfahrt nahmen 18 E-Scooterfahrende und 18 Fahrradfahrende Markierungen auswertbar wahr. Die fehlenden vier Probanden konnten Aufgrund von zu schlechtem Gaze-Sample an den benötigten Stellen nicht ausgewertet werden. Von diesen fokussierten Fahrradfahrende 62 und E-Scooterfahrende

69 Markierungen auf dem Boden. Mit einer möglichen Gesamtmenge von elf Markierungen pro Fahrt ergibt sich eine mögliche Gesamtzahl von 198 Markierungen für die Erstfahrt. So haben 34,85% der E-Scooterfahrenden und 31,31% der Fahrradfahrenden eine Markierung wahrgenommen. Im Durchschnitt erkannte so jeder E-Scooterfahrende 3,83 Markierungen ($SD=1,67$) und jeder Fahrradfahrende 3,44 Markierungen ($SD=1,67$). Auch bei den Markierungen nahmen lediglich die Probanden etwa 1/3 aller erkennbaren Markierungen auf der Erhebungsstrecke wahr. Bei der Zweitfahrt ergab sich folgendes Ergebnis. E-Scooterfahrende nahmen 61 Markierungen und Fahrradfahrende 70 Markierungen wahr. So nahmen objektiv Fahrradfahrende sogar mehr Markierung bei der Zweitfahrt wahr als auf der Erstfahrt. E-Scooterfahrende dagegen nahmen ungefähr 4% weniger Markierungen wahr als zuvor. So kann auch dieses Verhalten bei den E-Scooterfahrenden durch den Lerneffekt der Zweitfahrt begründet werden. Da das Erkennen der Markierungen nicht so eindeutig ist, wie das aktive Erkennen von Schildern, war in Bezug auf die Korrektheit der Auswertung keine Analyse über die aktive Blickdauer auf eine Markierung sowie die korrekte Entfernungseinschätzung zu einer Markierung möglich.

Natürlich gibt es zwischen den Probanden klare Verhaltensmuster bei der Art welche Erkennung präferiert wird, diese sind jedoch nicht weiterhin aussagekräftig, da die Anzahl der Erstfahrten zu gering ist. So ist es zumindest bei der reinen Erkennung der zwei Markierungsarten erkennbar, dass beide Markierungsformen (Schilder und Bodenmarkierungen) gleichermaßen wichtig und deshalb unabdingbar sind. Im Zweيتدurchlauf ist auch hier ein anderes Verhaltensmuster als bei der Schildererkennung zu erkennen. So nahmen im Gegensatz zu der Schildererkennung Fahrradfahrer nicht 10% weniger Markierungsformen wahr, sondern haben die Anzahl der erkannten Markierungen um eins erhöht. Bei E-Scootern ist ein ähnliches Verhaltensmuster erkennbar. So nahmen unabhängig von der Markierungsform E-Scooterfahrende bei der Zweitfahrt ungefähr 4% weniger Markierungen wahr. Im Allgemeinen ist es jedoch klar erkennbar, dass beide Markierungsformen bei der Erstfahrt mit einer Erkennungsrate von ungefähr 30% deutlich zu gering ist. Dies bedeutet jedoch nicht, dass dadurch die Verkehrsteilnehmer automatisch objektiv unsicher fahren, da dieses Werte durch Faktoren wie die Menge der Beschilderung und die Intuitivität der Straße stark beeinflusst werden. Wichtig ist hier abschließend zu erwähnen, dass selbstverständlich nicht alle Schilder für den Hauptverkehr der Straße sind. So ist es auch wichtig einbiegende Verkehrsteilnehmer über die Führungsform der Straße durch Markierungsformen zu informieren. Ein weiterer Interessanter Forschungspunkt wäre, wie sich das Verhalten der Objekterkennung ändert, wenn eine Markierungsform entfernt wird. Dadurch wäre es möglich, die tatsächliche Wichtigkeit der einzelnen Markierungsformen konkret festzustellen. Weiterhin interessant wäre eine Studie in Bezug auf Markierungs- und Schildererkennung mit Menschen, welche nicht aus Deutschland kommen.

IV. Diskussion und Future Works

Abschließend lassen sich aus allen erhobenen Faktoren einige Muster und Unterschiede feststellen. Mit der übergeordneten Fragestellung: "Sind E-Scooter wirklich so gefährlich wie sie in der Allgemeinheit dargestellt werden?", lässt sich im Rahmen dieser Arbeit nun klar sagen: Nein, sind sie nicht. Dafür wurden verschiedene objektive Aspekte erhoben und miteinander betrachtet. Zusammenfassend ist so erkennbar, dass in keinen der erhobenen Aspekte der E-Scooter objektiv schlechter ist als das Fahrrad.

So fokussierten E-Scooterfahrende bei den Erstfahrten Schilder um im Schnitt um 0,027 Sekunden länger als Fahrradfahrende. Auch bei der total betrachteten Fokussierdauer aller Schilder, nahmen E-Scooterfahrende diese 1,734 Sekunden, 0,134 Sekunden länger als Fahrradfahrende, wahr. In Betracht auf die Zweitfahrten, ergibt sich bei den E-Scootern ein identisches Ergebnis. Bei den Fahrradfahrenden dagegen, sank die Fokussierdauer im Schnitt um 0,1 Sekunden. Bei der totalen Fokussierungsdauer der Schilder sank diese bei Fahrradfahrenden um 0,324 Sekunden, welches ungefähr 20% entspricht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Fokussierung der Markierungen. So nahmen während der Erstfahrt E-Scooterfahrenden 69 Markierungen (34,85%) und Fahrradfahrende 62 Markierungen (31,31%) wahr. Auf der Zweitfahrt dagegen erkannten E-Scooterfahrende 4% weniger Markierungen als während der Erstfahrt. Fahrradfahrenden nahmen dagegen 8 Markierungen mehr wahr als auf der Erstfahrt. Abschließend ist so bei der Objekterkennung kein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Verkehrsmitteln ersichtlich.

Doch was sagt dieses Ergebnis nun im genaueren aus? So ist es ersichtlich, dass im Kern das objektive Sicherheitsempfinden, im Rahmen dieser Studie, nicht ausschlaggebend von dem verwendeten Verkehrsmittel beeinflusst wird, sondern von dem Nutzer, der dieses aktiv benutzt. So unterscheiden sich die Verkehrsmittel im Schnitt gegeneinander nur marginal, wodurch es bei den Nutzern starke Diskrepanzen gibt. So ist die Sicherheit auf dem Straßenverkehr nur im geringen Maße in Normalsituationen von dem benutzten Verkehrsmittel abhängig, sondern wird im größten Teil von der Person beeinflusst, die das Verkehrsmittel benutzt. Schlussendlich ist in Bezug auf die objektive Sicherheit auf Fahrradstraßen das Stigmata, welche von der Gesellschaft momentan auf den E-Scooter projiziert wird, faktisch objektiv unbegründet.

Da die erhobenen Aspekte alleinig nicht für eine vollständige Aussage über die objektive Sicherheit ausreichen, muss zukünftig, unter Betracht von weiteren Aspekten weitergeforcht werden, sodass das übergreifende Ergebnis alle benötigten Aspekte beinhaltet und berücksichtigt.

Ein zukunftsorientierter Ansatz wäre die Durchführung der Studie in 3-5 Jahren. So müsste die Studie, im gleichen Untersuchungsraum, mit mehr Probanden über einen längeren Raum stattfinden. Dadurch ergeben sich gleich mehrere Auswertungsmöglichkeiten, welche das Ergebnis weiterhin ergänzen würden.

Zum einem könnte eine größere Probandengruppe akquirieren werden, wodurch die Gesamtmenge und deren Repräsentativität steigt. Da die Zahl der Nutzung jährlich steigt, kann die Annahme getroffen werden, dass in 3-5 Jahren dadurch auch die allgemeine Gewohnheit des E-Scooterfahrens steigt. Dadurch könnte ein erster Vergleich erstellt werden, wie stark die Gewohnheit der E-Scooter das Fahrverhalten tatsächlich beeinflusst. Zum andern ist eine Erweiterung der Sensorik interessant. So könnte beispielsweise mittels eines Stresssensors Stresssituationen definiert werden. Anhand dieser definierten Situationen könnten nun neue Messungen mittels Eye-Tracking durchführen, umso entsprechend weitere Analyse über den Zusammenhang von Stress und der objektiven Sicherheit zu erfahren.

Literatur

- [1] Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz, Bundesverband für das Netzwerk der Verbraucherzentralen Deutschland; 07.01.2020; E-Scooter: Diese Regeln gelten für Elektro-Tretroller; <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/emobilitaet/escooter-diese-regeln-gelten-fuer-elektrotretroller-35716>, Zugriff: 19.02.2022.
- [2] Bundesministerium für Digitales und Verkehr; 13.01.2022; Mobilität in Deutschland (MiD), <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/mobilitaet-in-deutschland.html> am 19.02.2022
- [3] V. Pawlik, Umfrage in Deutschland zu Besitz eines PKW-Führerscheins bis 2021, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/172091/umfrage/besitz-eines-pkw-fuehrerscheins/#:~:text=Umfrage%20in%20Deutschland%20zum%20Besitz%20eines%20PKW%20DF%C3%BChrscheins%20bis%202021&text=Im%20Jahr%202021%20hatten%20etwa,bei%20rund%2012%20C86%20Millionen> am 19.02.2022
- [4] M. Kords, E-Scooter in Deutschland nach Altersgruppen, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1260543/umfrage/e-scooter-in-deutschland-nach-altersgruppen> am 19.02.2022
- [5] W. Canzler, Pkw-Verfügbarkeit, <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/datenreport-2021/umwelt-energie-und-mobilitaet/330362/pkw-verfuegbarkeit/> am 19.02.2022
- [6] I. Weidner, Zeit Online 18.10.2018, Darf man so schnell radeln, wie man will?; <https://www.zeit.de/mobilitaet/2018-10/radfahren-hochstgeschwindigkeit-radweg-verkehrsrecht#:~:text=Mit%20einem%20gew%C3%B6hnlichen%20Rad%20und,bis%20zu%2045%20km%2Fh> am 19.02.2022]
- [7] B. Laa and U. Leth, Survey of E-scooter users in Vienna: Who they are and how they ride, Journal of Transport Geography, Volume 89 (102874), Elsevier, December 2020.
- [8] N. Fearnley, S. H. Berge and E. Johnsson, January 2020. Shared e-scooters in Oslo, TØI Report: 1748/2020, Institute of Transport Economics, Oslo.
- [9] NACTO, Shared Micromobility in the U.S., New York: The National Association of City Transportation Officials (NACTO), <https://nacto.org/shared-micromobility-2019/>, aufgerufen am 01.06.2022, 2019.

Radfahren mit Baby: Messung der Feinstaubbelastung in Fahrradanhängern

Annabelle Sommer
*Fakultät für Informations-
management und Medien*
Hochschule Karlsruhe
soan1012@h-ka.de

Benedikt Prinzing
*Fakultät für Informations-
management und Medien*
Hochschule Karlsruhe
prbe1012@h-ka.de

Zusammenfassung

Bei Eltern mit Babys ist oft ein Rückgang der Fahrradnutzung zu beobachten. Eine Sorge ist eine erhöhte Luftschadstoffbelastung des Babys im Vergleich zum Auto. Deshalb wurde von Studierenden die Feinstaubbelastungen beim Transport von Babys mithilfe eines an der Hochschule Karlsruhe entwickelten SensorBikes untersucht.

Hierzu wurden zwei Routentypen miteinander verglichen: Dieselbe Strecke für Fahrrad und Pkw entlang einer Hauptverkehrsstraße (HVS) und eine jeweils angemessene und realitätsnahe Route bei gleichem Start- und Zielort.

Im direkten Vergleich sind Babys bei der Mitnahme im Fahrradanhänger höheren Feinstaubbelastungen ausgesetzt als im Pkw mit geschlossenen Fenstern. Jedoch zeigen die Untersuchungen auch, wie sich die Feinstaubbelastung im Fahrradanhänger reduzieren lässt.

I. Problemstellung Feinstaubbelastung in Fahrradanhängern

Radverkehr ist einer der Verkehrsträger der Zukunft. Es vereint persönliche (aktive Mobilität, körperliche Fitness) und gesellschaftliche (emissionsfrei, leistungsfähig, flächensparsam, stadtverträglich) Vorteile für eine zukunftsfähige und nachhaltige Mobilität in der Stadt und auf dem Land. Bei Eltern mit Babys ist häufig ein Rückgang der Fahrradnutzung zu beobachten. Im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Fördern und Stärken der Fahrradnutzung bei jungen Familien nach der Geburt von Kindern“ [7], wurde untersucht welche Hemmnisse bei der Fahrradnutzung von jungen Eltern bestehen und wie diese beseitigt werden können. Eine häufige Sorge junger Eltern war, dass die Babys bei der Fahrradfahrt im Vergleich zum Auto einer erhöhten Luftschadstoffbelastung ausgesetzt sind. Da diese Fragestellung im Rahmen des F+E-Vorhaben nicht abschließend geklärt werden konnte wurde diese durch studentische Forschung an der Hochschule Karlsruhe untersucht [16]. Analysiert wurde, wie sich die Luftschadstoffbelastung von Babys bei der Mitnahmen im Fahrradanhänger im Vergleich zum Pkw darstellt. Daraus lassen sich Empfehlungen für die Eltern ableiten.

II. Fachliteratur zur Feinstaubbelastung beim Radfahren

Weltweit sind zahlreiche Menschen hohen Feinstaubbelastung ausgesetzt und infolge dessen von Gesundheitsbeeinträchtigungen betroffen [9]. Bei Feinstaubbelastungen wird unterschieden zwischen grobem Feinstaub PM₁₀, der alle Partikel bis zu einem Durchmesser von 10 Mikrometer (μm) umfasst, sowie feinen Feinstaub

PM_{2,5}, der Partikel von bis zu 2,5 μm umfasst. Mit sinkender Teilchengröße nehmen die schädlichen Wirkungen auf die Gesundheit zu [1]. So können die feineren Partikel tief in die Lungen vordringen, die Lungenbarriere durchbrechen und in das Herz-Kreislauf-System eindringen. Da Babys und Kleinkinder ihre Schutzmechanismen erst entwickeln und in Relation zum Körpergewicht höhere Dosen aufnehmen, sind sie besonders verwundbar für die Folgen durch Feinstaubbelastungen [13]. Es gibt bereits zahlreiche Studien zur Luftschadstoffbelastung von Radfahrenden [2]–[6], [12], [15]. Die meisten Studien wählen für die Analyse dieselben Routen für Kfz und Fahrrad, um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. Dabei wird vernachlässigt, dass Radfahrenden häufig von Routen des Kfz-Verkehrs abweichen und durch Nebenstraßen oder Grünanlagen fahren. Die Wahl der untersuchten Routen hat große Auswirkung auf die Feinstaubbelastung [3]. In den morgendlichen Belastungsspitzen werden entlang der HVS deutlich höhere Belastungen gemessen als zu Nebenverkehrszeiten oder in Seitenstraßen [2], [3]. Zudem haben meteorologische Rahmenbedingungen sowie der Luftaustausch in Straßenräumen einen entscheidenden Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung. Die Feinstaubbelastung schwankt daher permanent [8].

Wenige Studien haben sich speziell mit der Luftschadstoffbelastung von Babys und Kleinkindern beschäftigt [4], [15]. Eine Studie, die Messungen direkt an einem Kinderfahrrad sowie eine Fahrradanhänger durchführte fand heraus, dass die Belastungen in einem Fahrradanhänger ca. 35 % höher sind als für einen Erwachsenen [4]. Eine weitere Studie kommt zu einem ähnlichen Ergebnis. Babys im Kinderwagen oder Fahrradanhänger, die sich mit ihrem Kopf auf gleicher Höhe mit den Auspuff befinden, sind höheren Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt [15]. Die Entfernung zur Emissionsquelle hat damit einen entscheidenden Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung.

III. Messdesign für mobile vergleichende Feinstaubmessung

A. *SensorBike der Hochschule Karlsruhe*

Mobile Messungen können helfen, die individuellen Luftschadstoffbelastungen von Verkehrsteilnehmenden räumlich und zeitlich nachzuvollziehen [14]. Fahrräder wurden bereits als mobile Messplattformen genutzt [2], [8], jedoch haben sich für mobile Messungen der Luftschadstoffbelastung beim Radfahren noch keine einheitlichen Qualitätsstandards etabliert [10].

Das SensorBike der Hochschule Karlsruhe wurde für die angewandte Forschung im Radverkehr entwickelt und ist durch den Anbau von diversen Sensoren für die zeitgleiche Erhebung und Verknüpfung von Daten geeignet. Um die Feinstaubbelastungen bei der Mitnahme von Babys in einem Fahrradanhänger in Echtzeit messen zu können, wurde das SensorBike mit dem Messgerät Fidas® Frog der Firma Palas ausgestattet. Das handliche Gerät (Maße 100x240x150 mm, Gewicht 2,1 kg) [11] erlaubt eine mobile Messung der Feinstaubbelastung. Mit Hilfe eines Verlängerungsrohrs am Messeinlass kann jeweils die Kopfhöhe des Babys berücksichtigt

werden. Zusätzlich werden die Messfahrten mit Hilfe einer Kamera dokumentiert, um eine Zuordnung der Messwerte zu Standorten und einzelnen Ereignissen zu ermöglichen. Da Babys, im Gegensatz zu den Radfahrenden, bei der Mitnahme im Fahrradanhänger nicht aktiver als beim Mitfahren im Auto sind, wurde eine veränderte Atemfrequenz nicht berücksichtigt.

B. Messdesign für eine mobile Feinstaubmessung

Die Erfahrungen aus der Literatur sowie der Vorstudie wurden bei der Entwicklung des Messdesigns für die mobile Messung der Feinstaubbelastung berücksichtigt [16]. Ziel der Messung ist der Vergleich der Feinstaubbelastung für Babys bei einer Mitnahme im Fahrradanhänger oder dem Pkw. Die Messung der Feinstaubbelastung umfasst die Parameter PM₁₀ und PM_{2,5}.

Die Fahrten mit dem Fahrrad und dem Pkw haben den gleichen Start- und Zielort und werden abwechselnd dreimal hintereinander wiederholt, um die Messwerte vergleichbar zu machen und Einzelereignisse auszumitteln. Aufgrund der kurzen Dauer mobiler Messungen und der täglichen Schwankung der Hintergrundbelastung steht der relative Vergleich der Mitnahme in den verschiedenen Verkehrsmitteln im Vordergrund. Die Messungen erfolgen an vier Messtagen mit günstigen meteorologischen Bedingungen (kein Niederschlag oder starker Wind). In die Messungen in einem innerstädtischen Quartier in Karlsruhe wurden neben stark belasteten HVS auch innerstädtische Sammelstraßen mit einbezogen, um eine realitätsnahe Mischung abzubilden. Im Ergebnis wird ermittelt, wie sich die Feinstaubbelastung für die beiden Verkehrsmittel darstellt, wenn weitestgehend identische Ausgangsbedingungen bestehen.

Hierzu wurden zwei Routentypen miteinander verglichen: Zum einen dieselbe Strecke für Fahrrad und Pkw entlang einer HVS. Die Route in Karlsruhe mit Startort an der Kreuzung Yorckstraße/Sophienstraße führte über die Sophienstraße (Sammelstraße) und die Reinhold-Frank-Straße (HVS) zum Zielort am Hochschulcampus in der Moltkestraße. Die Route ist 2,2 km lang, hat eine Fahrtdauer von ca. 6 bis 9 Minuten und bildet einen Alltagsweg aus einem innerstädtischen Wohngebiet zur Kita bei der Hochschule ab.

Zum anderen wurde eine für das jeweilige Verkehrsmittel angemessene und realitätsnahe Route bei gleichem Start- und Zielort befahren. Für das Fahrrad wurde eine direkte Route unter Nutzung von Nebenstraßen und Grünanlagen (Scheffelstraße, Stabelstraße, Moltkestraße) gewählt, während der Pkw die bereits beschriebene Route über die HVS Reinhold-Frank-Straße nutzt. Um einen Vergleich zwischen der mobilen Messung und stationären Messtationen zu ermöglichen, führen die Messfahrten an einer ortsfesten Luftmessstation der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) in der Reinhold-Frank-Straße vorbei.

Die Messfahrten werden mit einem Trekkingrad und einem Fahrradanhänger der Firma Thule durchgeführt. Das Verdeck des Fahrradanhängers wird während der Messfahrten offengelassen. Der Messeinlass wird auf Kopfhöhe eines im Fahrradanhänger sitzenden Babys justiert. Die Vergleichsmessungen im Pkw finden mit

einem Skoda Fabia mit Benzinmotor statt. Die Fenster sind während der Messung geschlossen und die Lüftung sowie die Klimaanlage moderat angeschaltet. Das Messgerät wird auf der Rückbank aufgestellt und der Messeinlass auf die Kopfhöhe des Babys justiert.

Da nur ein Echtzeitmessgerät zur Verfügung steht, werden die zu vergleichenden Messfahrten zeitnah hintereinander wiederholt. So erfolgt immer abwechselnd eine Hin- und Rückfahrt mit dem Pkw sowie mit dem Fahrrad (zwei Messungen). Dies wird drei Mal wiederholt (3x2 Messungen je Verkehrsmittel). Die Messfahrten erfolgen in einer alltagsgerechten Fahrweise: die Straßenverkehrsordnung wird befolgt. Es werden für das Verkehrsmittel angemessene Geschwindigkeiten gefahren sowie ein kleinkindergerechtes Fahrverhalten (z.B. kein direktes Aufstellen hinter einem Lkw) umgesetzt.

Die mobilen Messungen werden um weitere Faktoren sowie mögliche Unterschiede in der Luftschadstoffbelastung erweitert: Vergleich bei offenem und geschlossenem Verdeck des Fahrradanhängers; Vergleich Fahrradanhänger und Fahrradgepäckträger; Vergleich stationäre Messung auf Kopfhöhe eines Erwachsenen (Messhöhe 150 cm) sowie eines Babys/Kleinkindes (Messhöhe 35 cm) bei 1,5 m Abstand zum Fahrbahnrand.

IV. Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Gemessen wurde an fünf Tagen im Juni 2020. Zu Beginn wurde ein Pretest durchgeführt. Anschließend folgten vier Messtage mit dem Vergleich auf gleicher Route, zwei Tage mit dem Vergleich auf jeweils angepasster Route sowie ein Tag mit den erweiterten Messungen mit offenem oder geschlossenem Verdeck, auf dem Gepäckträger sowie die stationäre Messung auf Höhe von Erwachsenen oder Kleinkindern. Insgesamt wurden 102 Messfahrten durchgeführt.

A. Aggregation der Ergebnisse der Messfahrten

Anhand einer typischen Messung wird im nun folgenden die Auswertung beispielhaft illustriert. Mit Hilfe der Videoaufzeichnung ist eine Zuordnung der Spitzen möglich (Abbildung 1).

Der Durchschnittswert der Messung wird in erster Linie durch einige Messspitzen geprägt. Die Messspitzen von PM 10 und PM 2,5 stimmen weitgehend überein, wobei die Ausschläge bei PM 10 ausgeprägter sind als bei PM 2,5. Zu Beginn der Fahrt treten Spitzen durch das Warten an einer Lichtsignalanlage (LSA) hinter einem Kfz auf. Dann folgen Ausschläge auf einem Streckenabschnitt, bei dem Baumkronen die Straße fast komplett überdecken. Die Messspitze ist vermutlich auf Baumpollen sowie einen geringen Luftaustausch durch das Blätterdach zurückzuführen. Dieses Phänomen trat bei allen Messfahrten auf. Im darauffolgenden Abschnitt in der Reinhold-Frank-Straße, wird die stationäre Messstation des LUBW passiert. Der Messwerte der stationären Messtation liegen für PM 2,5 bei $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, was dem im Fahrradanhänger gemessenen Wert entspricht. Es folgen weitere Messspitze

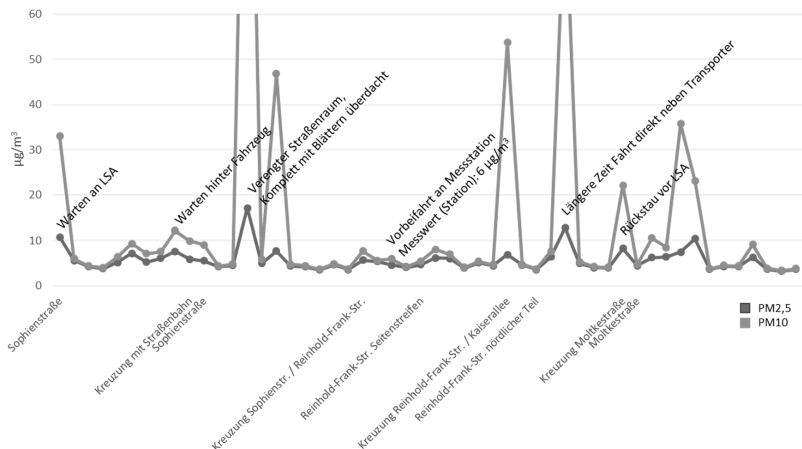


Abbildung 1. Feinstaubbelastung Fahrradanhänger Messfahrt Nr.4

jeweils an den Knotenpunkten Reinhold-Frank-Straße/Kaiserallee sowie Reinhold-Frank-Straße/Moltkestraße durch den Rückstau der LSA sowie durch die Fahrt neben einem Transporter. Der Mittelwert der Messfahrt liegt für PM 2,5 bei $5,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und der Median bei $5,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für PM 10 war der Mittelwert $13,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und der Median $5,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Auswertung für Messfahrten im Pkw erfolgt vergleichbar. Dabei sind ebenfalls Messspitzen zu erkennen, diese sind jedoch deutlich weniger ausgeprägt als beim Fahrradanhänger.

Für jeden Messtag werden die Fahrten je Verkehrsmittel für die verschiedenen Routen zusammengefasst und der Mittelwert sowie der Median berechnet. Dabei liegt der Median immer niedriger als der Mittelwert und verdeutlicht, wie die Messspitzen den Mittelwert in die Höhe treiben. Die Werte für die Messtage werden in Boxplots zusammengefasst, die neben dem Mittelwert und Median auch die Streuung der Ergebnisse in Form von Quartile illustriert.

Die Messwerte für PM 2,5 und PM 10 schwanken von Tag zu Tag deutlich, was auf unterschiedliche Witterungsverhältnisse und damit einhergehende Hintergrundbelastung zurückzuführen ist (siehe Abbildung 2). Infolgedessen sind die Schwankungen zwischen den Tagen deutlich ausgeprägter als die Unterschiede zwischen den Verkehrsmitteln an einem Tag. Aufgrund dessen ist ein Vergleich zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln nur am jeweiligen Tag möglich.

B. Vergleich der Luftschadstoffbelastung auf gleicher Route

Zunächst wird die Feinstaubbelastung für die Mitnahme von Babys in einem Fahrradanhänger sowie in einem Kfz auf der gleichen Route verglichen (siehe Tabelle

I und Abbildung 2). An allen Messtagen ist sowohl der Median als auch der Mittelwert für PM 2,5 und für PM 10 für das Fahrrad höher als für den Pkw. Der Mittelwert liegt beim Fahrradanhänger um 178 % bei PM 2,5 und 326 % bei PM 10 höher als beim Pkw. Beim Median ist der Unterschied zwischen Fahrradanhänger und Pkw mit 164 % bei PM2,5 und 183 % bei PM10 ein wenig geringer.

Tabelle I
Mobile Messung Fahrrad und Pkw auf gleicher Route

	Tag 1				Tag 2			
	PM2,5		PM10		PM2,5		PM10	
	\varnothing	\tilde{x}	\varnothing	\tilde{x}	\varnothing	\tilde{x}	\varnothing	\tilde{x}
Auto	3,54	3,06	7,80	3,23	7,01	6,79	10,64	7,08
Fahrrad	5,89	4,94	18,60	5,90	11,12	9,71	28,61	10,74
	Tag 3				Tag 4			
	PM2,5		PM10		PM2,5		PM10	
	\varnothing	\tilde{x}	\varnothing	\tilde{x}	\varnothing	\tilde{x}	\varnothing	\tilde{x}
Auto	1,36	0,94	5,16	0,98	4,40	4,00	7,14	4,23
Fahrrad	2,58	1,79	12,21	1,94	8,72	6,49	39,97	8,43

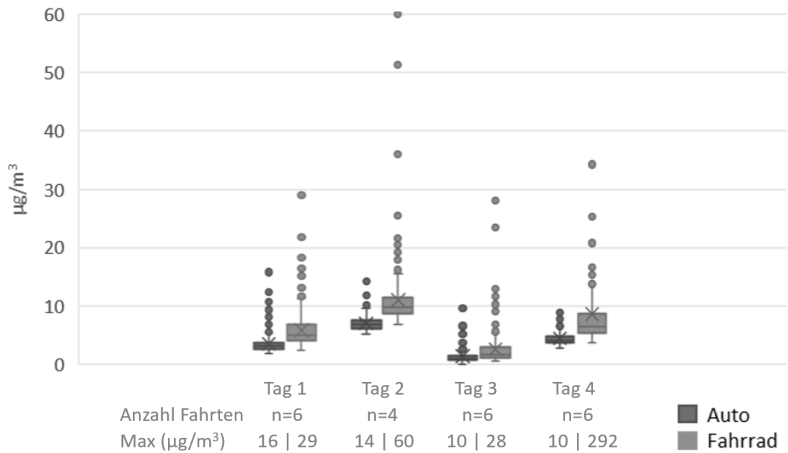


Abbildung 2. Vergleich mobile Messungen PM2,5 Fahrrad und Pkw auf gleicher Route

Der Faktor der Belastung ist tagesabhängig. An den Tagen 2 und 4 ist dieser deutlich ausgeprägter als an den Tagen 1 und 3. Bei der detaillierten Betrachtung der hintereinander ausgeführten Messfahrten ist die Belastung im Fahrradanhänger immer höher als im Pkw. Die Differenzen zwischen Mittelwert und Median fällt beim Fahrradanhänger höher aus als beim Pkw, da die Messspitzen im Fahrradanhänger

stärker ausfallen. Ursächlich sind dafür insbesondere Belastungsspitzen wie z.B. beim Warten an einer LSA. Zusammenfassend bedeutet dies, dass die Feinstaubbelastung für Babys bei gleicher Route im Fahrradanhänger höher ist als bei der Mitnahme im Pkw.

C. Vergleich der Luftschadstoffbelastung auf angepasster Route

An zwei Messtagen erfolgte ein Vergleich der Feinstaubbelastung zwischen Fahrradanhänger und Pkw auf angepassten Routen (siehe Tabelle II und Abbildung 3).

Tabelle II
Mobile Messung Fahrrad und Pkw auf angepasster Route

		Tag 2				Tag 4			
		PM2,5		PM10		PM2,5		PM10	
		\varnothing	\tilde{x}	\varnothing	\tilde{x}	\varnothing	\tilde{x}	\varnothing	\tilde{x}
Auto		6,55	5,67	11,81	6,23	2,00	1,46	5,60	1,52
Fahrrad		8,04	7,33	18,44	7,74	5,32	4,57	19,56	5,17

Auf der für das Fahrrad angepassten Route ist die Differenz der Feinstaubbelastung zwischen dem Fahrradanhänger und dem Pkw, welcher über die HVS Reinhold-Frank-Straße fährt, geringer (siehe Tabelle I und Tabelle II).

An Tag 2 liegt die Feinstaubbelastung im Fahrradanhänger auf der angepassten Route bei PM 2,5 nur 23 % und bei PM 10 56 % über den Werten des Pkw. Hingegen ist die Differenz der Feinstaubbelastung bei gleicher Route von Fahrradanhänger und Pkw deutlicher höher: Bei PM 2,5 konnte im Fahrradanhänger eine um 59 % höhere Belastung als beim Pkw gemessen werden, bei PM 10 sogar um 169 %.

Tag 4 wird durch eine nicht erklärbare Auffälligkeit beeinflusst. So liegen bei der angepassten Route die im Fahrradanhänger gemessenen Werte bei PM 2,5 um 166 %, hingegen bei PM 10 nur um 24 % gegenüber den Messwerten des Pkw höher. Bei gleicher Route konnte beim Fahrradanhänger eine Mehrbelastung von 98 % bei PM 2,5 und 460 % bei PM 10 festgestellt werden. Ursache können Messfehler oder Sondereinflüsse sein. Diese Annahme wird dadurch gestützt, dass beim Pkw, welcher bei beiden Messdesigns die gleiche Route fährt, unterschiedliche Werte gemessen worden sind. Bei den Messfahrten zur angepassten Route des Fahrrads wurde beim Pkw mit $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei PM 2,5 eine deutlich niedrigere Belastung gemessen (Tabelle II) als bei den Messfahrten zur gleichen Route am selben Tag. Hier lagen die Werte für PM 2,5 bei $4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabelle I). Bei den Messungen im Fahrradanhänger sowie bei PM 10 trat kein vergleichbar großer Unterschied auf. Setzt man als Tag 4 als Vergleichswert für die angepasste Route ein Wert PM 2,5 in Höhe von $4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an (aus vorherigen Messung auf der Route am selben Tag), dann liegt die Mehrbelastung zwischen Fahrradanhänger und Pkw für PM 2,5 bei 21 % Mehrbelastung für die angepasste Route und 98 % Mehrbelastung für die gleiche Route. Trotz des ungeklärten Wertes lässt sich daher die Aussage treffen, dass durch eine angepasste Routenwahl die Mehrbelastung für die Mitnahme von Babys im Fahrradanhänger im Vergleich zum Pkw deutlich reduziert wird.

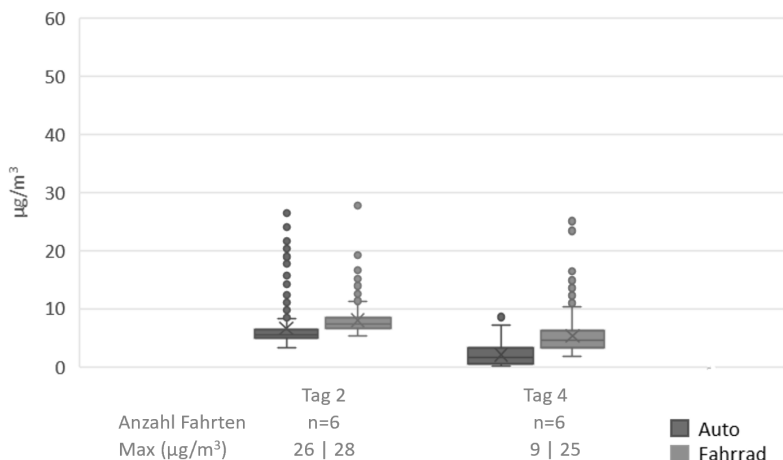


Abbildung 3. Vergleich mobile Messungen PM2,5 Fahrrad und Pkw auf angepasster Route

D. Vergleich erweiterte Rahmenbedingungen

Als eine Rahmenbedingung wird die Feinstaubbelastung im Fahrradanhänger mit offenem oder geschlossenem Verdeck verglichen (siehe Tabelle III). Die Feinstaubbelastung für PM 2,5 und PM 10 ist bei geschlossenem Verdeck gegenüber dem geöffneten Verdeck deutlich erhöht. Der erhöhte Luftaustausch bei offenem Verdeck ermöglicht demnach Belastungsspitzen schnell wieder abzubauen.

Tabelle III

Mobile Messung Vergleich offenes oder geschlossenes Verdeck Fahrradanhänger

	Offenes Verdeck				Geschlossenes Verdeck			
	PM2,5		PM10		PM2,5		PM10	
	Ø	\bar{x}	Ø	\bar{x}	Ø	\bar{x}	Ø	\bar{x}
Fahrrad	2,58	1,79	12,21	1,94	3,53	2,45	26,39	4,46

Zudem wird die Feinstaubbelastung auf Höhe eines auf dem Gepäckträger montierten Kindersitzes sowie auf Höhe eines Fahrradanhängers mit geöffnetem Verdeck in Messfahrten erfasst (siehe Tabelle IV). Die Feinstaubbelastung auf dem Gepäckträger (Kindersitz) ist nur unwesentlich geringer als im Fahrradanhänger.

Bei einer stationären Messung an der Kreuzung Sophienstraße/Schillerstraße mit 1,5 m Abstand zum Fahrbahnrand wird die Feinstaubbelastung auf Kopfhöhe des Babys (35 cm) sowie eines Erwachsenen (150 cm) verglichen. Die Belastung auf Kopfhöhe des Erwachsenen ist sowohl für PM 2,5 als auch PM 10 im Mittelwert und im Median geringer als auf Kopfhöhe des Babys (siehe Tabelle V). Damit unterscheiden

Tabelle IV

Mobile Messung Mitnahme Kindersitz auf Gepäckträger oder Fahrradanhänger

	Gepäckträger				Geöffnetes Verdeck			
	PM2,5		PM10		PM2,5		PM10	
	\emptyset	\bar{x}	\emptyset	\bar{x}	\emptyset	\bar{x}	\emptyset	\bar{x}
Fahrrad	2,47	1,68	11,77	1,82	2,58	1,79	12,21	1,94

Tabelle V

Stationäre Messung Höhe Baby oder Erwachsener

	Kind				Erwachsener			
	PM2,5		PM10		PM2,5		PM10	
	\emptyset	\bar{x}	\emptyset	\bar{x}	\emptyset	\bar{x}	\emptyset	\bar{x}
Stationär	5,51	4,57	14,23	5,33	4,13	3,47	12,95	3,85

sich die Ergebnisse gegenüber der mobilen Messung, bei der nur ein sehr geringer Unterschied der Feinstaubbelastung festgestellt werden konnte. Im Verlauf längerer Strecke scheinen die Belastungen auf den unterschiedlichen Höhen zu variieren und sich auszugleichen.

V. Fazit und Ausblick

Im Ergebnis der vergleichenden Messungen lassen sich Faktoren bestimmen, von denen die Feinstaubbelastung von Babys bei der Mitnahme im Fahrradanhänger oder Pkw abhängen. Bei den durchgeführten Messungen sind Babys im Fahrradanhänger höheren Feinstaubbelastungen ausgesetzt wie Babys in Pkw. Bei angemessenen Routen für das Fahrrad abseits von HVS wird der Unterschied zwischen Fahrrad und Kfz jedoch deutlich geringer. Die Schwankung der Feinstaubbelastung zwischen den einzelnen Tagen aufgrund der Witterungsverhältnisse ist dabei deutlich größer als die Unterschiede zwischen der Mitnahme mit dem Fahrrad oder dem Pkw.

Folgende Maßnahmen können getroffen werden, um die Feinstaubbelastung für Babys bei der Mitnahme im Fahrradanhänger zu reduzieren: Routen abseits von HVS, Zeiten mit geringer Feinstaubbelastung, Fahrradanhänger mit offenem Verdeck und das Vermeiden von Aufstellung hinter Lkw/Transporter. Weniger relevant ist, ob die Mitnahme in einem Fahrradanhänger oder in einem Kindersitz auf dem Gepäckträger erfolgt.

Ein Vergleich der gemessenen Feinstaubbelastung mit den gesetzlichen Grenzwerten oder den Grenzwerten der WHO ist aufgrund der Momentaufnahmen mobiler Messungen nicht unmittelbar möglich. Jedoch entsprechen die auf dem Fahrradanhänger gemessenen Feinstaubbelastungen in etwa den Werten der stationären Messstation der LUBW. An der Messstation Reinhold-Frank-Straße werden bereits seit mehreren Jahren die gesetzlichen Grenzwerte für PM 10 und PM 2,5 eingehalten. Im Pkw fallen die Werte bei Messung an gleicher Stelle ungefähr halb

so hoch aus. Insofern ist nicht davon auszugehen, dass unter den Bedingungen für die Messung, wie sie in Karlsruhe vorlagen, eine gesundheitsschädliche Belastung durch Feinstaub für ein Kind zu erwarten ist.

Author Contributions

Ein besonderer Dank gilt unseren Kooperationspartnern: Firma Palas GmbH, Verein „Fahrrad & Familie e.V.“, Dr. Schmidt Stiftung für Verkehr und Umwelt, Verbund der Stifter der Hochschule Karlsruhe, Carl-Zeiss-Stiftung.

Literatur

- [1] WHO Expert Consultation: Available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs).
- [2] P. Apparicio, M. Carrier, J. Gelb, A. Séguin, and S. Kingham. Cyclists' exposure to air pollution and road traffic noise in central city neighbourhoods of Montreal. *Journal of Transport Geography*, 57:63–69, 2016.
- [3] Hanna Boogaard, Frank Borgman, Jaap Kamminga, and Gerard Hoek. Exposure to ultrafine and fine particles and noise during cycling and driving in 11 Dutch cities. *Atmospheric Environment*, 43(27):4234–4242, 2009.
- [4] Heinz Burtcher and Karen Schüpp. The occurrence of ultrafine particles in the specific environment of children. *Paediatric respiratory reviews*, 13(2):89–94, 2012.
- [5] M. Cepeda, J. Schoufour, R. Freak-Poli, C. Koolhaas, K. Dhana, W. Bramer, and O. Franco. Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic review. *The Lancet Public Health*, 2(1):e23–e34, 2017.
- [6] Audrey de Nazelle, Scott Fruin, Dane Westerdahl, David Martinez, Anna Ripoll, Nadine Kubesch, and Mark Nieuwenhuijsen. A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona. *Atmospheric Environment*, 59:151–159, 2012.
- [7] H. Eberhard and A. Gering. Radfahren mit Baby, Ergebnisse, Erfahrungen und Empfehlungen aus fünf Jahren Forschung und Praxis: Vortrag, 2020.
- [8] B. Elen, J. Peters, M. van Poppel, N. Bleux, J. Theunis, M. Reggente, and A. Standaert. The Aeroflex: a bicycle for mobile air quality measurements. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 13(1):221–240, 2012.
- [9] EPA. Integrated Review Plan for the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter.
- [10] S. Kaur, M. J. Nieuwenhuijsen, and R. N. Colvile. Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments. *Atmospheric Environment*, 41(23):4781–4810, 2007.
- [11] Palas GmbH. Fids Frog: Datasheet, 2019.
- [12] D. C. Quiros, E. S. Lee, R. Wang, and Y. Zhu. Ultrafine particle exposures while walking, cycling, and driving along an urban residential roadway. *Atmospheric Environment*, 73:185–194, 2013.
- [13] S. Salvi. Health effects of ambient air pollution in children. *Paediatric respiratory reviews*, 8(4):275–280, 2007.
- [14] L. Scherzer. Die Belastung von Nutzern im Straßenverkehr mit Luftschadstoffen: Das Fahrrad als mobiler Messträger zur Feinstaubmessung im Straßenraum. (11/2017), 2017.
- [15] A. Sharma and K. Prashant. A review of factors surrounding their pollution exposure to in-pram babies and mitigation strategies. 2018.
- [16] A. Sommer, B. Prinzing, and B. König. Abschlussbericht Messung der Feinstaubbelastungen von Babys beim Radfahren und Autofahren: Projekt Verkehrsökologie Sommersemester 2020, 2020.

Überholabstände zwischen Rad und Kfz – wie studentische Projekte die Forschung mit neuen Ideen und Perspektiven bereichern

Jochen Eckart

*Institut für Verkehr und Infrastruktur
Hochschule Karlsruhe
jochen.eckart@h-ka.de*

Catharina Lutz

*Institut für Verkehr und Infrastruktur
Hochschule Karlsruhe
catharina.lutz@h-ka.de*

Jule Merk

*Institut für Verkehr und Infrastruktur
Hochschule Karlsruhe
jule.merk@h-ka.de*

Zusammenfassung

Die Überholvorgänge zwischen Kfz und Rad sind von hoher Bedeutung für die subjektive Verkehrssicherheit von Radfahrenden und damit essentiell für die Förderung des Radverkehrs. Die Straßenverkehrsordnung hat mit der Novelle im Jahr 2021 eine Konkretisierung des Mindest-Überholabstands zwischen Kfz und Radfahrenden von innerorts 1,5 m und außerorts auf 2,0 m vorgenommen. An der Hochschule Karlsruhe wurden verschiedene studentische Forschungsvorhaben durchgeführt, um Überholabstände zu messen und zu analysieren von welchen Rahmenbedingungen diese abhängen. Basierend auf den Erfahrungen aus der studentischen Forschung wurde ein drittmittelgefördertes Forschungsvorhaben entwickelt. Im Folgenden werden die bisher erlangten Erkenntnisse zu den Einflussfaktoren auf die Überholabstände Kfz-Rad dargestellt. Zudem wird illustriert, wie studentische Forschung zur Entwicklung von Forschungsvorhaben beitragen kann.

I. Die Bedeutung des Überholabstandes zwischen Kfz und Fahrrad für die Förderung des Radverkehrs

Viele Städte und Landkreise wollen den Radverkehr als einen Beitrag zu einer zukunftsfähigen nachhaltigen Mobilität fördern. In diesem Rahmen ist die Sicherheit des Radverkehrs zu beachten, der sich aus einer objektiven und einer subjektiven Dimension zusammensetzt [7], [8].

Die objektive Sicherheit betrachtet mit einer quantitativen Analyse die eingetretenen Unfälle und basiert meist auf der polizeilichen Unfallstatistik. In dieser Statistik sind Unfälle mit Beteiligung von Radfahrenden durch überholende Kfz selten. Wenn diese auftreten sind sie häufig mit hohen Unfallfolgen verbunden, deutlich häufiger geht die Gefahr jedoch von plötzlich öffnenden Fahrzeuga Türen, dem sogenannten „Dooring“ [1].

Die subjektive Sicherheit analysiert die emotionale Bewertung der Bedrohlichkeit einer Verkehrssituation durch die Radfahrenden [3]. Der Beitrag der Überholvorgänge Kfz-Fahrrad auf das subjektive Sicherheitsempfinden von Radfahrenden wurde anhand von Stressmessungen untersucht [10], [11]. Bei der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf der Fahrbahn bzw. auf einem Schutzstreifen oder Radfahrstreifen ist das Überholen durch ein Fahrzeug mit 36 % der dominante Stressauslöser.

Nach [4], [5], [6], [14] und [15] ist das subjektive Sicherheitsempfinden ein zentraler Faktor für die Förderung des Radverkehrs. Ein subjektives Unsicherheitsgefühl ist für viele potenzielle Radfahrende ein Hemmnis für eine häufige Nutzung des Fahrrades. Insbesondere Personen die bisher wenig Fahrrad fahren, und damit für die Steigerung des Radverkehrsanteils von hoher Bedeutung sind, bildet das subjektive Gefühl von Unsicherheit eine Hemmnis für die häufigere Nutzung des Fahrrades. Die Einhaltung ausreichender Abstände bei Überholvorgängen Kfz-Fahrrad fördert die objektive Verkehrssicherheit und das subjektive Sicherheitsgefühl der Radfahrenden und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Förderung des Radverkehrs. Nach Schurig [13] ist überholen „das Sichvorbeibewegen eines von hinten annähernde(n) Fahrzeugs an einem anderen das auf der gleichen Fahrbahn in der selben Richtung fährt oder verkehrsbedingt wartet“. Die Verhaltensregeln für das Überholen sind in §5 StVO [2] geregelt. Bei Überholvorgängen von Kfz gegenüber dem Radverkehr muss eine Behinderung ausgeschlossen sein. Dafür ist innerorts ein Abstand von mindestens 1,5 m und außerorts von 2,0 m zwischen Kfz und Fahrrad einzuhalten (§2 Abs. 4 StVO [2]).

Die in den nachfolgenden Ergebnissen ermittelten Überholabstände beziehen sich auf den Abstand zwischen der Spiegelaußenkante des überholenden Kfz und der Außenkante der Fahrradlenkstange und wird „Lateral Clearance“ genannt [9].

II. Studentische Erhebung der Überholabstände zwischen Kfz und Fahrrad

Überholabstände können mittels mobiler Ultraschall- oder Infrarot-Sensoren erfasst werden. Für die die nachfolgende Erhebung wurde ein SensorBike der Hochschule Karlsruhe genutzt, welches mit einem selbstgebauten Laser-Abstandssensor sowie Kameras in Fahrtrichtung nach vorne und hinten sowie einem GPS-Tracker ausgestattet ist. Zunächst wurden verschiedene studentische Arbeiten zum Thema Überholabstand durchgeführt, um die wichtigsten Einflussfaktoren identifizieren zu können.

Welz [16] erhob insgesamt Erhebungsfahrten mit einer Gesamtlänge von circa 120 km Strecke mit insgesamt 250 Überholvorgängen auf innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen in Karlsruhe, noch vor der Einführung der StVO Novelle, die den Mindestüberholabstand konkret festlegte. Die gemessenen Überholabstände lagen zwischen 40 cm und 360 cm (durchschnittlich 149 cm und im Median 141 cm Überholabstand). Die Art der Radverkehrsführung hat tendenziell Einfluss auf das Abstandsverhalten des motorisierten Individualverkehrs zum Radverkehr. Auf-

grund geringer Fallzahlen können jedoch keine Aussagen zum Einfluss verschiedener Radinfrastrukturen getroffen und statistisch nachgewiesen werden.

Werner [17] führte im Januar 2021 Erhebungsfahrten mit 188 km Länge und 723 Überholvorgängen durch. Für die Analyse der Ergebnisse wurden einfaktorielle Varianzanalysen (ANOVA) sowie eine schrittweise multiple lineare Regression genutzt. Im Ergebnis zeigt sich, dass das Vorhandensein von Radfahrstreifen den größten positiven Einfluss auf die Überholabstände hat. Es zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang in der Unterscheidung von Radfahrstreifen und Mischverkehr, denn auf Radfahrstreifen sind die Überholabstände um 22,4 cm größer. Der direkte Vergleich von Schutzstreifen und Mischverkehr weist keinen signifikanten Einfluss auf die Überholbreite nach. Zudem konnte bei der Verbreiterung von Radverkehrsanlagen, gegenüber einer Verbreiterung der Kernfahrbahn ein größerer positiver Einfluss auf die Überholabstände nachgewiesen werden: Bei einer Verbreiterung der Gesamtfahrbahn um 100 cm zeigen sich statistisch signifikante Zuwächse des Überholabstands von 44,9 cm, wenn die Verbreiterung der Anlagenbreite zugeordnet wird und 20,7 cm bei einer Verbreiterung des Schutzraumes. Eine statistisch signifikante Steigerung des Überholabstandes um 7,3 cm konnte bei einer Verbreiterung der Fahrbahn um 100 cm nachgewiesen werden. Für die Einflussgrößen Straßenkategorie, Vorhandensein und Aufstellung von parkenden Fahrzeugen, Gegenverkehr, Parallelverkehr, zulässige Höchstgeschwindigkeit und Fahrzeugklasse konnten keine statistisch signifikanten Zusammenhänge ermittelt werden.

Im Kurs „Fahrradlabor“ wurde durch die Zusammenarbeit von Röder, Fassbinder, Hauenstein, Rabes, Welz und Weingärtner [12] eine deutlich größere Anzahl an Überholvorgängen erhoben, da sich in den vorangegangenen Studien gezeigt hat, dass die Stichprobengröße tendenziell zu klein war. Im Dezember 2020 wurden 800 km Strecke mit rund 2.300 Überholvorgängen erfasst. In den Ergebnissen wurde deutlich, dass die Breite der Überholvorgänge zwischen Kfz und Fahrrad insbesondere von der Breite der Radverkehrsinfrastruktur auf der Fahrbahn wie Radfahrstreifen oder Schutzstreifen abhängt. Eine 100 cm breitere Radverkehrsinfrastruktur führt zu 33 cm breiteren Überholabständen. Ab einer Breite von 1,85 m führt Radverkehrsinfrastruktur zu signifikant weiteren Überholvorgängen als die Führung der Radfahrenden im Mischverkehr auf der Fahrbahn. Dabei kommt es allein auf die Breite der Radverkehrsinfrastruktur an, ob Radfahrstreifen oder Schutzstreifen eingesetzt werden ist hierbei nicht entscheidend. Bei geringeren Breiten der Radverkehrsinfrastruktur kann die Führung im Mischverkehr zu einer geringeren Anzahl enger Überholabständen führen. So wird zwar im Mischverkehr nicht mit mehr Abstand überholt, jedoch können deutlich mehr abgelehnte Überholvorgänge als bei Radverkehrsinfrastruktur unter 1,5 m Breite nachgewiesen werden. Auch die Breite der Restfahrbahn (gesamte Fahrbahn abzüglich Radinfrastruktur und ruhender Verkehr) hat einen Einfluss auf die Überholabstände zwischen Kfz und Fahrrad. Bis zu einer Fahrbahnbreite von 9,0 m hat eine Verbreiterung der Fahrbahn eine Vergrößerung der Überholabstände zur Folge. Bei 100 cm mehr Fahrbahnbreite steigen die Überholabstände um 7 cm. Ab 9,0 m hat die Restfahrbahnbreite hingegen keinen Einfluss auf die Überholabstände mehr.

Das Überholen des Radfahrenden bei Gegenverkehr wird nur selten beobachtet, ist aber mit deutlich engeren Überholabständen verbunden. Der ruhende Verkehr, die zulässige Höchstgeschwindigkeit sowie der Typ der überholenden Fahrzeuge haben keinen nachweisbaren Einfluss auf Überholabstände zwischen Kfz und Fahrrad. Um die Einhaltung der Mindestüberholabstände der StVO innerorts von 1,5 m zu gewährleisten, bietet sich eine Radverkehrsinfrastruktur mit Mindestbreite von 1,85 m an.

III. Forschungsvorhaben Überholabstände zwischen Kfz und Fahrrad

Basierend auf den Erfahrungen aus den studentischen Projekten wird ein Forschungsvorhaben entwickelt, welches sich insbesondere mit der Entwicklung von geeigneten Maßnahmen zur Verbreiterung der Überholabstände auseinandersetzt. Das Projekt läuft unter dem Titel „gÜ-Rad - Kommunale Konzepte zur Einhaltung der gesetzlichen Überholabstände zwischen Kfz und Radfahrenden“ und wird durch den NRVF über die nächsten zwei Jahre (2022-2024) gefördert. Die Projektpartner sind die AGFK Baden-Württemberg und die Hochschule Karlsruhe.

Durch eine Messung der Überholabstände zwischen Kfz und Fahrrad werden in zehn Modellkommunen kritische Straßenabschnitte mit zahlreichen engen Überholvorgängen mittels Seitenabstandsmessungen identifiziert. Für diese Straßenabschnitte werden dann mit der Kommunalverwaltung temporäre Realexperimente (Markierungen, Querschnittsaufteilung, Plakate, Schilder, lokale Kampagnen etc.) als Maßnahmen entwickelt, durchgeführt und evaluiert, um enge Überholvorgänge zu reduzieren. Der Erfolg der Realexperimente wird durch eine Nachher-Messung der seitlichen Überholabstände verifiziert. Ziel des Projekts ist es, Hilfestellungen für Kommunen zu entwickeln, wie sie kritische Situationen mit engen Überholvorgängen identifizieren und Maßnahmen zu deren Verbesserung ergreifen können.

Nur durch eine Kooperation der Akteure Kfz-Führende, Radfahrende und kommunale Verwaltungen kann eine Reduzierung von zu engen Überholvorgängen und eine gemeinsame, erhöhte Rücksichtnahme der Verkehrsteilnehmenden erreicht werden. Durch die geplanten temporären Realexperimente ist es möglich, entwickelte Lösungsvorschläge auch tatsächlich (zeitlich und örtlich begrenzt) zu realisieren und evaluieren. So kann die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen nachgewiesen werden. Die temporären Realexperimente bilden damit einen Ansatz, die in Verwaltung, Politik oder Bürgerschaft eventuell bestehenden Widerstände gegen Maßnahmen zu mindern und sie proaktiv in die Entwicklung von Lösungen einzubinden. Für den angestrebten Transformationsprozess der Mindestüberholabstände ist es wichtig, dass die Realexperimente für alle Zielgruppen erlebbar sind.

Ziel des angestrebten Projektes ist es, die erhobenen Daten an den Anforderungen der kommunalen Planungsprozesse zu orientieren. Von Fahrradverbänden wurden bereits Informationskampagnen (z. B. Fahrräder mit Schwimmmudeln auf dem Gepäckträger zur Verdeutlichung der Mindestabstände) zu den Überholabständen

veranstaltet. Jedoch bestehen bei anderen Verkehrsteilnehmenden vielfach Zweifel an der Qualität und Neutralität der Aussagen von diesen Akteuren. Mit dem Projekt werden alle Beteiligten in die Erhebung der Daten eingebunden, eventuelle Konflikte und Konkurrenzen zwischen Zivilgesellschaft und Kommunen vermieden und ein partnerschaftliches Verhältnis gefördert. Zudem werden die Maßnahmen und Strategien zur Förderung ausreichender Überholabstände für das kommunale Handeln nutzbar gemacht und kann auf zahlreiche Kommunen übertragen werden. Das Projekt strebt an, eine Vorgehensweise zu entwickeln, die es erlaubt, solche Messkampagnen mit geringem Aufwand und ohne hohe technische Expertise in verschiedenen Kommunen duplizieren zu können. Zudem soll die Anzahl der Teilnehmenden erhöht und damit die Qualität der Studien gesteigert werden. Kommunen sollen in die Lage versetzt werden, Projekte zur Erhebung von Überholabständen und der Entwicklung von Maßnahmen zur verbesserten Einhaltung der Mindestabstände eigenständig durchführen zu können. Das Transferpaket befasst sich mit den Übertragungsmöglichkeiten der Ergebnisse des Vorhabens auf weitere Kommunen. Es wird kontinuierlich entsprechend des jeweiligen Projektstands durch die AGFK und die HKA entwickelt. Die im Projekt gewonnen Ergebnissen zur Bedeutung enger Überholabstände, dem Einfluss des Straßenraums, der Verkehrsinfrastruktur, die in den Realexperimenten erprobten Maßnahmen sowie die Ahndung von Verstößen werden dargestellt. Zudem wird den Kommunen der im Projekt erprobte Ablauf mit der Messung von Überholabständen, der Entwicklung und Durchführung von Realexperimenten sowie deren Evaluation dargestellt. Das Transferpaket umfasst folgende Inhalte:

Ein kommunaler Praxisleitfaden (AGFK) für Strategien zur Einhaltung der gesetzlichen Überholabstände zwischen Kfz und Rad wird erstellt. Ziel ist Kommunen eine Hilfestellung zu bieten, wie sie kritische Situationen, die besonders häufig mit engen Überholvorgängen zwischen Kfz und Rad einhergehen, identifizieren und Maßnahmen zu deren Bewältigung umsetzen können. Basierend auf den Erfahrungen aus den Modellkommunen werden Vorgehensweisen und Maßnahmen identifiziert, die es erlauben, solche Messkampagnen mit geringem Aufwand und ohne hohe technische Expertise in weiteren Kommunen duplizieren zu können. Dafür werden auch die im Projekt entwickelten GIS Tools, Excel-Tabellen zur Auswertung, sowie Anleitungen für die Messungen interessierten Kommunen zur Verfügung gestellt. Zudem werden Maßnahmen und Strategien zur verbesserten Einhaltung von Überholabständen entwickelt.

Für die interessierte Fachöffentlichkeit, Praxisakteure sowie die allgemeine Öffentlichkeit wird für die gesamte Projektlaufzeit und bei entsprechendem Bedarf auch darüber hinaus eine Webseite mit Projektinformationen erstellt. Ziel der Webseite ist es, die praktische Nutzung der Ergebnisse des Vorhabens zu fördern und über den aktuellen Stand des Vorhabens, Zwischen- und Endergebnisse zu informieren. Die Ergebnisse des Vorhabens werden auf Weiterbildungsveranstaltungen der AGFK-BW und soweit der Bedarf besteht auch darüber hinaus präsentiert und in einem wissenschaftlichen Artikel veröffentlicht.

IV. Fazit

Grundlegende Erkenntnisse zum Einfluss der Verkehrsinfrastruktur auf die Überholabstände zwischen Kfz und Rad konnten durch studentische Forschung geschaffen werden. In verschiedenen Projekten werden bereits Ansätze verfolgt, Daten zum Radverkehr mittels GPS-Daten oder Smartphone-Daten für die Fahrradförderung aufzubereiten. Erste bürgerwissenschaftliche Ansätze zur Messung von Überholabständen mit Hilfe von Sensoren gibt es bereits mit Kampagnen und Vorhaben in Stuttgart, Berlin, Köln, Leipzig, Dresden oder Hamburg. Jedoch sind die Aussagen über die Überholabstände zwischen Kfz und Fahrrad aus solchen bürgerschaftlichen Kampagnen wenig aussagekräftig, wenn Zusatzinformationen zu lokalen Rahmenbedingungen, wie Abmessungen des Straßenraums, Radverkehrsanlagen, Verkehrsstärke etc. fehlen. Das vorliegende Projekt erfasst daher die situationsspezifischen Daten zu den Überholabständen. Die bisherigen bürgerschaftlichen Messkampagnen sind zudem von einzelnen engagierten Akteuren mit einem hohen Organisationsvermögen sowie technischer Kompetenz abhängig. Zudem wurden in den letzten Jahren erste wissenschaftliche Ergebnisse zu Überholabständen aus Simulatorstudien sowie wissenschaftliche Feldstudien, beispielsweise „Space2Ride“ oder „Sicher überholt!“ gewonnen. Diese wissenschaftlichen Studien sind mit einem hohen Aufwand verbunden und fokussieren sich bisher meist auf die Aufdeckung von Wirkungszusammenhängen. Die Entwicklung von lokalen Maßnahmen und Strategien zur Erhöhung der Überholabstände fehlt bisher meist, dies soll mit dem Forschungsvorhaben gÜ Rad adressiert werden.

Literatur

- [1] Brockmann, S. (2020): Unfallrisiko Parken für RadfahrerInnen und FußgängerInnen. Pressekonferenz, Münster.
- [2] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (06. März 2013): Straßenverkehrsordnung. StVO.
- [3] Fuller, R. (2005): Towards a general theory of driver behaviour. Accident; analysis and prevention, 37, 3, 461–472.
- [4] Geller, R. (2009): Four Types of Cyclists. Online verfügbar unter: www.portlandoregon.gov/transportation/article/237507, Stand: 21.01.2022.
- [5] Horton, D. (2007): Fear of Cycling. In: Cycling and Society, Horton, D., Rosen, P., Cox, P. (Hrsg.), Ashgate Publishing Limited, 133–142.
- [6] Hull, A., O'Holleran, C. (2014): Bicycle infrastructure: can good design encourage cycling? Urban, Planning and Transport Research, 2, 1, 369–406.
- [7] Johannsen, H. (2013): Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion. Grundlagen der Unfallaufklärung. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden.
- [8] Klebelsberg, D. (1982): Verkehrspsychologie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [9] Llorca, C., Angel-Domenech, A., Agustin-Gomez, F., Garcia, A. (2017): Motor vehicles overtaking cyclists on two-lane rural roads: Analysis on speed and lateral clearance. Safety Science, 92, 302–310.
- [10] Merk, J. (2019): Vergleich der objektiven Verkehrssicherheit und des subjektiven Verkehrsstresses bei Schutzstreifen und Radfahrstreifen im Vergleich zu eigenständigen Radwegen. Masterarbeit Hochschule Karlsruhe, Studiengang Verkehrssystemmanagement.

- [11] Merk, J., Eckart, J., Zeile, P. (2021): Subjektiven Verkehrsstress objektiv messen - ein EmoCycling-Mixed-Methods-Ansatz. In: CITIES 20.50-Creating Habitats for the 3rd Millennium: Smart-Sustainable-Climate Neutral. Proceedings of REAL CORP 2021, 26th International Conference on Urban Development, Regional Planning and Information Society, Schrenk, M., Popovich, V. V., Zeile, P., Elisei, P., Beyer, C., Stöglehner, G. (Hrsg.), 676-778.
- [12] Röder, A., Fassbinder, J., Hauenstein, J., Rabes, M., Welz, C., Weingärtner, J. (2021): Abschlussbericht im Projekt Fahrradlabor.
- [13] Schurig, R. (2015): Straßenverkehrs-Ordnung. StVO: mit Anlagen zur StVO (jeweils bei den §§ 40 bis 43) und Allgemeiner Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO) : Kommentar. Kirschbaum Verlag, Bonn.
- [14] Schwedes, O., Wachholz, S., Friel, D. (2021): Sicherheit ist Ansichtssache. Subjektive Sicherheit: Ein vernachlässigtes Forschungsfeld. Online verfügbar unter: https://www.ivp.tu-ber-lin.de/fileadmin/fg93/Dokumente/Discussion_Paper/DP1_7Schwedes_et_al.pdf, Stand: 14.02.2022.
- [15] Wang, J. Y.T., Mirza, L., Cheung, A. K. L., Moradi, S. (2014): Understanding factors influencing choices of cyclists and potential cyclists: A case study at the University of Auckland. Road and Transport Research: a journal of Australian and New Zealand research and practice, 23, 4, 37-51.
- [16] Welz, C. (2020): Erhebung und Analyse des Überholabstands vom motorisierten Individualverkehr zum Radverkehr auf Stadtstraßen am Beispiel der Stadt Karlsruhe. Bachelorarbeit Hochschule Karlsruhe, Studiengang Verkehrssystemmanagement.
- [17] Werner, F. (2021): Analyse von Abständen bei Überholvorgängen des motorisierten Verkehrs gegenüber Radfahrenden auf kritischen und unkritischen Querschnitten. Masterarbeit Hochschule Karlsruhe, Studiengang Verkehrssystemmanagement.

Aufbau und Entwicklung eines Fahrradsimulators

Patrick Rebling

Institut für Energieeffiziente Mobilität

Hochschule Karlsruhe

patrick.rebling@h-ka.de

Zusammenfassung

Emissionsfreie Verkehrsmittel erleben einen regelrechten Aufschwung im innerstädtischen Verkehr. Diese Wandlung fordert zukünftig neue Verkehrsplanungskonzepte, weshalb am Institut für Energieeffiziente Mobilität (IEEM) ein Fahrradsimulator entwickelt wird, mit dem das Verhalten von Fahrradfahrenden im städtischen Verkehr genauer untersucht werden kann. Dabei können Probandinnen und Probanden auf einem realen Fahrrad durch eine virtuelle Welt fahren, welche auf eine Leinwand projiziert wird. Während der virtuellen Fahrradfahrt können beliebige Verkehrssituationen provoziert werden, ohne die beteiligten Personen zu gefährden. Dabei soll den Nutzenden eine möglichst realitätsnahe Fahrsituation simuliert werden, indem beispielsweise der Tritt Widerstand entsprechend der simulierten Steigung angepasst wird.

Schlüsselbegriffe

Simulation, Unity 3D

I. Einleitung

Neben der Urbanisierung und dem damit einhergehenden erhöhten Verkehrsaufkommen innerhalb der Städte ist auch die Art des Verkehrsmittels zunehmend im Wandel. So wird immer häufiger auf emissionsarme bzw. lokal emissionsfreie Verkehrsmittel, wie beispielsweise das Fahrrad oder den E-Roller gesetzt [1]. Unter den Bedingungen der Pandemie erfolgte nochmals eine signifikante Zunahme des Radverkehrsanteils unter den Verkehrsmitteln [2], [3]. Um einen harmonischen Verkehrsfluss zu erzeugen, ist die Untersuchung der Verhaltensweisen der verschiedenen Verkehrsteilnehmenden und deren Interaktionen untereinander essenziell. Im Rahmen dieses Beitrags steht hierbei vorwiegend das Fahrverhalten von Radfahrenden in urbanen Umgebungen im Vordergrund. Für eine effiziente Analyse wird darum ein Fahrradsimulator vorgestellt, der ebendies ermöglicht.

Durch die Entwicklung und den Aufbau dieses Simulators soll eine effiziente Betrachtung von spezifischen Szenarien mit einer Vielzahl von Versuchspersonen ermöglicht werden. Dabei wird der Vorteil der Reproduzierbarkeit von Simulationen dafür genutzt, um jeder Probandin und jedem Probanden die gleiche Ausgangssituation zu präsentieren und anschließend die unterschiedlichen Verhaltensweisen und Reaktionen innerhalb des Szenarios beobachten zu können. Überdies können mithilfe des Simulators kritische Gefahrensituationen analysiert werden, ohne die Versuchspersonen zu gefährden.

In den nachfolgenden Abschnitten wird zunächst das Gesamtkonzept des Fahrradsimulators und anschließend die einzelnen Komponenten, welche für eine realitätsnahe Simulation erforderlich sind, sowie die Simulationsumgebung beschrieben. Abschließend wird ein Ausblick auf mögliche Folgeprojekte auf Basis des aktuellen Stands des Fahrradsimulators gegeben.

II. Konzept

Für den Aufbau des Fahrradsimulators wird eine Projektionslösung gewählt, welche durch eine 180° Leinwand und zwei Beamer die virtuelle Welt vor die Probandin oder den Probanden projiziert (siehe Abbildung 1). Als Gerüst dient dabei eine Traversenkonstruktion, die den einfachen Auf- und Abbau des Simulators ermöglichen soll. Im Mittelpunkt des Halbkreises wird das Fahrrad sowie die entsprechende Sensorik und Aktorik für die Simulation positioniert. Die Besonderheit des Aufbaus besteht darin, dass keine weitere Sensorik am Fahrrad angebracht werden muss, sondern dass die Datenaufnahme entkoppelt vom eigentlichen Simulatorfahrrad erfolgt. Dies ermöglicht einen einfachen Austausch des Fahrrads, womit auch andere Fahrradtypen, beispielsweise auch E-Bikes, im Rahmen des Simulators genutzt werden können.

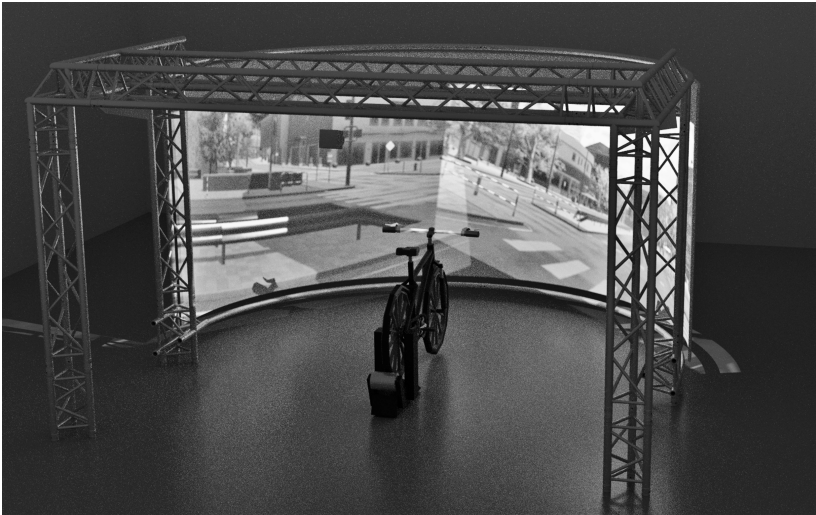


Abbildung 1. Konzeptbild des Fahrradsimulators, nach welchem der Realaufbau erfolgt. Durch eine Traversenkonstruktion wird die Mobilität des Simulators gewährleistet. Zwei Beamer projizieren die virtuelle Welt vor die Probandin oder den Probanden auf eine 180° Leinwand. Das Simulatorfahrrad wird im Mittelpunkt des Halbkreises, inklusive der Sensorik und Aktorik, platziert. [4]

III. Sensorik und Aktorik

Für einen funktionsfähigen, realitätsnahen Fahrradsimulator gilt es, verschiedene Daten zu erfassen und zu verarbeiten. Für die Bewegungen des Modells innerhalb der Simulation müssen der Lenkwinkel und die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrrads bestimmt werden. Um auf die Fahrgeschwindigkeit und Steigungen mit einem entsprechenden Fahrwiderstand, welcher sich in der Änderung des Trittmoments widerspiegelt, zu reagieren, wird eine Aktorik am Hinterrad des Fahrrads angebracht, welche dies ermöglicht.

Als Mikrocontroller für die Datenaufnahme der Sensorik am Fahrrad sowie zur Steuerung eines Rollentrainers zur Variation des Trittmoments dienen zwei Arduino UNO. Diese kommunizieren über serielle Schnittstellen mit dem Simulationsrechner.

A. Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit

Die Rotationsgeschwindigkeit des Rollentrainers wird optisch über ein angefügtes Schwarz-Weiß-Muster berechnet. Als Sensor wird hierfür eine Photodiode genutzt, deren analoge Ausgabe über eine Komparatorschaltung digitalisiert und an einen Arduino übergeben wird (siehe Abbildung 2). Diese Analog-Digital-Wandlung erfolgt durch eine Schaltschwelle, welche mit einem entsprechend ausgelegten Spannungsteiler eingestellt wird. Der Arduino kann anschließend die Geschwindigkeit durch die bekannten Parameter des Sensorrads und der Flankenänderung des digitalen Eingangssignals in Abhängigkeit der Zeit berechnen. Dabei spielt lediglich die Bogenlänge der Farbsegmente eine relevante Rolle, da der absolute Rotationswinkel des Rollentrainers nicht ausschlaggebend für die Fahrradgeschwindigkeit ist. Durch die Kombination mit einem Potentiometer kann die Schaltschwelle der Komparatorschaltung optimal an die aktuellen Lichtverhältnisse angepasst werden.

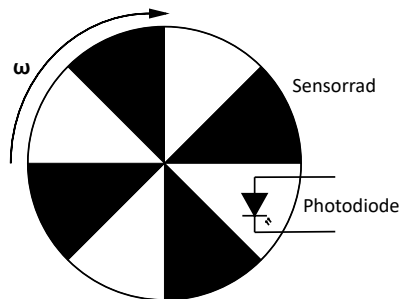


Abbildung 2. Schematische Darstellung des Sensoraufbaus zur Bestimmung der aktuellen Fahrgeschwindigkeit. Eine Komparatorschaltung (zur Vereinfachung hier nicht dargestellt) übergibt den binarisierten Ausgang einer Photodiode an einen Arduino, welcher darauf aufbauend die Winkelgeschwindigkeit ω bestimmt. Durch die Bekanntheit der Parameter des Sensorrads, kann über ω die Fahrradgeschwindigkeit v berechnet werden.

B. Bestimmung des Lenkwinkels

Zur Bestimmung des Lenkwinkels werden zwei Konzepte erarbeitet und implementiert. Im ersten Fall wird der Winkel über ein Potentiometer und ein Gyroskop mithilfe eines softwareseitig implementierten Komplementärfilters ermittelt (siehe Abbildung 3). Bei einem solchen Filter wird eine Eingangsgröße und deren zeitliche Änderung miteinander verknüpft, damit mögliche Drifts und Rauschen geglättet werden. Hierfür wird die Änderung des Winkels ω_{gyro} , welcher durch ein Gyroskop bestimmt wird, integriert. Da in der Realität auch ohne eine Rotation meist ein Drift des integrierten Wertes über die Zeit vorkommt, wird der Winkel ϕ_{gyro} durch einen Hochpass geführt, damit nur schnelle Winkeländerungen wahrgenommen werden. Aus dem Potentiometer wird der absolute, jedoch verrauschte Winkel ϕ_{poti} bestimmt, der durch einen Tiefpass geglättet wird. Die beiden Winkel ϕ_{tp} und ϕ_{hp} werden durch Addition zum resultierenden Lenkwinkel ϕ_{steer} verknüpft.

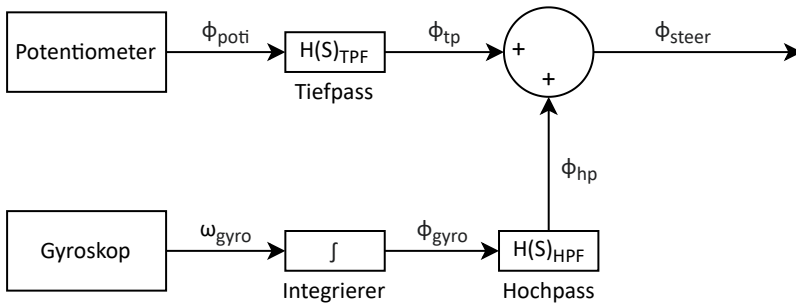


Abbildung 3. Komplementärfilter zur Berechnung des Lenkwinkels. Dieses Vorgehen verknüpft den verrauschten Winkel ϕ_{poti} mit dem instabilen Integrationsergebnis der Winkeländerung ω_{gyro} , um einen robusten, resultierenden Lenkwinkel ϕ_{steer} zu erhalten.

Eine einfachere und dennoch effektive Variante, welche aktuell standardmäßig genutzt wird, ist die Bestimmung des Lenkwinkels des Fahrrads über einen Encoder und ein Potentiometer (siehe Abbildung 4). Dabei wird der initiale Winkel, welcher zu Simulationsbeginn mit dem Potentiometer gemessen wird, als Startwinkel des Encoders genutzt. Die einzelnen Encoder-Ticks werden innerhalb des Programms ausgelesen und durch den Arduino in einen absoluten Winkel konvertiert. Durch einen Abgleich der beiden Kanäle A und B des Encoders, welche phasenverschoben sind, kann die Richtung der Rotation bestimmt werden. Der resultierende Lenkwinkel ϕ_{steer} wird anschließend über eine serielle Schnittstelle an den Simulationsrechner versandt.

C. Kommunikation

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten spielt eine relevante Rolle im Gesamtsystem (siehe Abbildung 5). Die beiden Arduinos kommunizieren

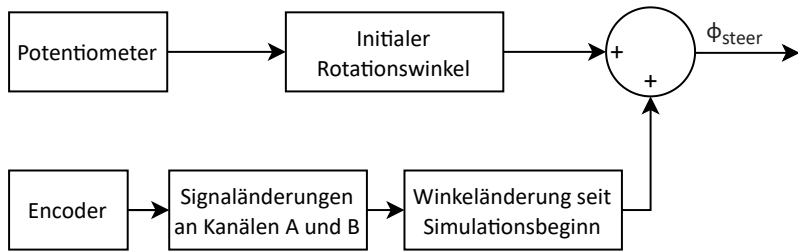


Abbildung 4. Prinzip zur Berechnung des Lenkwinkels ϕ_{steer} auf Basis eines Potentiometers zur Berechnung des initialen Winkels und eines Encoders zur Bestimmung der absoluten Winkeländerung während der Simulation.

jeweils nur mit dem Simulationsrechner, welcher die eingehenden Daten verarbeitet. Diese Kommunikation erfolgt über serielle Schnittstellen. Der vordere Arduino, welcher den Lenkwinkel bestimmt, sendet den berechneten Winkel an den Rechner. Hier erfolgt die Kommunikation unidirektional. Der Arduino liest den analogen Wert des Potentiometers und die digitalen Werte des Encoders über Eingangspins ein. Der hintere Arduino, welcher die Geschwindigkeit bestimmt und den Rollentrainer ansteuert, kommuniziert bidirektional über die serielle Schnittstelle. Über Bluetooth Low Energy (BLE) wird der Widerstand des Rollentrainers angesteuert. Die Geschwindigkeit wird, wie oben beschrieben, über eine Komparatorschaltung mit einer Photodiode erzeugt. Das Einlesen des digitalen Wertes erfolgt über die Eingangspins des Arduinos. Weitergehend existiert eine Koppelung zwischen den Projektoren und einer Kamera zur Entzerrung und Überlagerung der Bilder auf der konkaven Leinwand und somit immersiven Darstellung der Simulation für die Probandin oder den Probanden.

IV. Simulationsumgebung

Aktuell befindet sich das Fahrrad in der Simulationsumgebung in einer virtuellen und imaginären Stadt namens *Windridge City*, welche kostenfrei von Unity 3D zur Verfügung gestellt wird (siehe Abbildung 6). Durch eine Kapselung aller fahrradspezifischer Modelle und Skripte lässt sich das Fahrradmodell jedoch ohne größeren Aufwand in eine andere Umgebung versetzen. So können 3D Modelle von beliebigen Kreuzungen erzeugt und der Fahrradsimulator in dieser virtuellen Welt genutzt werden, um Verkehrsflüsse und Gefahrensituationen zu analysieren. Das 3D Modell des Fahrrads wird innerhalb der Simulation einfach gehalten, da es für den Nutzer ohnehin nicht sichtbar ist und somit wenig Ressourcen für das Rendering und die Animation benötigt. Weitergehend wird eine Benutzeroberfläche zur Verfügung gestellt, welche Einstellungsänderungen und Informationsanzeigen zur Laufzeit ermöglicht. Hierbei kann die Art des Dateneingangs gewählt werden. Zu Auswahl stehen die manuelle Steuerung des Fahrrads über Slider, damit auch offline ohne Zugriff auf den Fahrradsimulator Änderungen an der Simulation und der

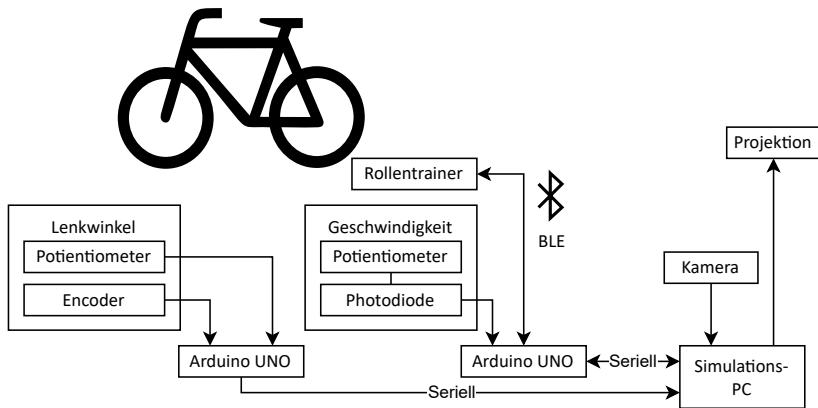


Abbildung 5. Übersicht der Kommunikation im Fahrradsimulator zwischen den einzelnen Komponenten. Das Fahrrad ist dabei austauschbar, wodurch verschiedene Fahrradarten und -modelle genutzt werden können. Die Pfeile zeigen auf, ob es sich um eine unidirektionale oder bidirektionale Kommunikation zwischen zwei Komponenten handelt.

Software geprüft werden können sowie die Steuerung über das Simulatorfahrrad. Über eine Grafik wird der aktuelle Gesamtfahrwiderstand inklusive einer kurzen Historie dargestellt.

A. Fahrradmodell in Unity

Für die Fahrdynamik des Modells in Unity existieren zwei Ansätze. In beiden Fällen wird auf das Einspur-Ackermann-Modell zur Berechnung der Fahrtrajektorie zurückgegriffen [5]. Im einfacheren Modell wird das Fahrrad stets aufrecht gehalten. Der Lenkwinkel in Kombination mit der Geschwindigkeit hat hierbei keinen Einfluss auf die Neigung des Fahrrads. In einem weiteren Ansatz erfolgt die Aufrechterhaltung des Fahrrads durch einen PID-Regler, welcher die Schwerpunktverlagerung des Radfahrers darstellen soll. Diese Variante erzeugt realistischere Fahrbewegungen, schwächt jedoch im aktuellen Zustand des Fahrradsimulators die Immersion, da sich das Simulatorfahrrad nicht neigen kann.

V. Zusammenfassung und Ausblick

Die erste Entwicklungsstufe des Fahrradsimulators bietet die Möglichkeit das Fahrverhalten von Probandinnen und Probanden in einer virtuellen Welt zu analysieren. Dabei werden die realen Werte am Simulatorfahrrad für den Lenkwinkel und die aktuelle Fahrgeschwindigkeit in die Simulation überführt. Als Fahrer-Feedback ändert sich der Tritt Widerstand in Abhängigkeit der Steigung und der Geschwindigkeit des Fahrradmodells in der Simulation.

Durch Anpassungen des bestehenden Fahrradsimulators im Rahmen von Abschluss- und Projektarbeiten soll die Immersion weiter gesteigert werden. Beispielsweise



Abbildung 6. Das virtuelle Fahrrad in der Simulationsumgebung *Windridge City*. Ebenfalls dargestellt wird die Steuerung und das Diagramm, welches Informationen über Fahrwiderstände liefert. Die Steuerung des Fahrrads kann dabei, wie beispielsweise hier dargestellt, manuell mit Slidern erfolgen oder über das Simulatorfahrrad.

kann eine Adaption hin zu Virtual Reality erfolgen oder der Fahrradsimulator um eine Bewegungsplattform erweitert werden. Hierfür kann eine einfache Plattform für die realistische Simulation von Stößen durch Schlaglöcher oder Bordsteine aufgebaut oder ein komplexes Bewegungskonzept zur realistischen Darstellung von Beschleunigungen und Steigungen erarbeitet werden. Dadurch kann auf die komplexe Regelungsalgorithmik gewechselt werden und die Probandin oder der Proband in eine immersivere Simulation eintauchen, was zu realitätsnäherem Fahrverhalten führt. In weiteren Projekten ist zudem die Validierung des Simulators gegen den Einsatz von Realversuchen geplant. Die daraus resultierenden Erkenntnisse sollen genutzt werden, um die Simulation weiter an die Realität anzugleichen.

Mitwirkende

Dieser Beitrag basiert auf der Projektarbeit *Fahrradsimulator* von Raphael Schlingmann, Lucas Schillinger, Paul Bäcker und Sibel Talyat Hyusmen, sowie den Weiterentwicklungen von Paul Bäcker als akademischer Mitarbeiter am Institut für Energieeffiziente Mobilität. [4]

Literatur

- [1] T. Richter und O. Beyer, *Sicherheit und Nutzbarkeit markierter Radverkehrsführungen*, Serie Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. Unfallforschung der Versicherer, 5/2019, Vol. Nr. 59. [Online]. Available: <https://m.udv.de/download/file/fid/11903>
- [2] H. Frey, B. Laa, U. Leth, F. Kratochwil, und P. Schober, „Mobilität in Wien unter COVID19: Begleituntersuchung Temporäre Begegnungszonen und Pop-Up Radinfrastruktur.“
- [3] S. Kraus und N. Koch, „Provisional COVID-19 infrastructure induces large, rapid increases in cycling,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 118, Nr. 15, 2021.

- [4] R. Schlingmann, L. Schillinger, P. Bäcker, und S. T. Hyusmen, „Projektarbeit: Fahrradsimulator.“
- [5] M. Mitschke und H. Wallentowitz, *Dynamik der Kraftfahrzeuge*, 4. Aufl., Serie VDI. Berlin and Heidelberg: Springer, 2004. [Online]. Available: http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?pid=1493716&custom_att_2=simple_viewer

Ausgewählte Versuche mit Fahrrad und Pedelec auf einem Scheitelrollenprüfstand

Sven Helms
Fakultät MMT
Hochschule Karlsruhe
sven.helms@h-ka.de

Natanael Herr
Student MMT
Hochschule Karlsruhe

Joshua Marcen
Student MMT
Hochschule Karlsruhe

Michael Senger
Student MMT
Hochschule Karlsruhe

Maurice Kettner
Fakultät MMT
Hochschule Karlsruhe
maurice.kettner@h-ka.de

Zusammenfassung

Seit 2021 steht an der Hochschule Karlsruhe ein moderner 48-Zoll-Scheitelrollenprüfstand der Firma AVL zur Verfügung. Der ursprünglich für Kraftfahrzeugversuche (bis 200 km/h und 150 kW Antriebsleistung) entwickelte Prüfstand wurde angepasst, so dass auch Versuche mit Zweirädern durchgeführt werden können. Der Prüfstand bietet klassische Betriebsfunktionen wie die Regelung auf konstante Zugkraft und konstante Geschwindigkeit als auch die Möglichkeit einer sogenannten Straßenlastsimulation, welche basierend auf zuvor messtechnisch ermittelten Fahrwiderständen das Fahren auf der Rolle in beliebigen Fahrzyklen ermöglicht. Auch Steigungen und Gefälle können vorgegeben werden. In dieser Betriebsart ist es möglich Lastkollektive abzufahren, Reichweitenuntersuchungen an E-Bikes/Pedelecs vorzunehmen oder auch EMV Messungen durchzuführen. Durch Simulation der realen geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstände können beispielsweise Rekuperationsstrategien oder auch Bremssysteme in Kombination mit einer Wärmebildkamera untersucht werden.

Der Prüfstand ist echtzeitfähig, d.h. die Zugkraft- und Leistungsmessung erfolgt tretkurbelwinkelauflöst und ist damit auch für Analysen der biomechanischen Zusammenhänge zwischen FahrerIn und Fahrrad z.B. für Untersuchungen zum "Runden Tritt" bei verschiedenen Sitzpositionen.



Abbildung 1. Messung mit einem Fahrrad auf dem Rollenprüfstand

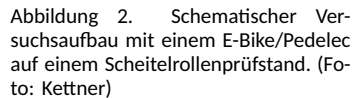
Die Auswertung erfolgt entweder direkt am Prüfstand über AVL Concerto oder extern nach der Konvertierung in ein beliebiges Dateiformat. In der Veröffentlichung werden der Aufbau und die Funktionen des Prüfstands, sowie ausgewählte Beispiele von Versuchen und Ergebnissen vorgestellt. In der Wissenschaft sind Untersuchungen zur Fahrradtechnik (anders als z.B. in der Automobilwesen) weniger präsent als beispielsweise Untersuchungen zu Infrastruktur (Verkehrsstudien) mit Fahrrädern. Das Fahrrad wird hierbei als Blackbox verwendet. Dabei sind gerade in den letzten Jahren eine Vielzahl an technischen Innovationen in der Fahrradindustrie entwickelt worden. Da mit zunehmender Komplexität der Fahrradtechnik der Bedarf an Ingenieuren steigt, empfiehlt sich daher eine Aufnahme der Themen Fahrradtechnik in der akademischen Ingenieursausbildung. Neben den mechanisch-konstruktiven Themen sind hierbei zunehmend auch mechatronische Themen gefragt.

- reproduzierbare, definierbare Randbedingungen eingestellt
- umfangreiche Messtechnik verwendet
- Einzelkomponenten, Teilsysteme oder Software bereits ohne Fahrzeug (HiL, SiL) untersucht
- Versuche im Zeitraffer ermöglicht werden.

So sind in wissenschaftlichen Publikationen beispielsweise Komponentenprüfstände für Untersuchungen des Antriebs [1], der Bremsen [2][6], die Untersuchung der Steifigkeit von Fahrradrahmen [3] oder des Rollwiderstands unterschiedlicher Fahrradreifen [4] zu finden.

A. Aufbau

In den Grundfunktionen kann der Prüfstand wahlweise auf konstante Soll-Geschwindigkeit oder wahlweise auf konstante Zugkraft regeln. Zusätzlich ist eine dynamische Straßenlastsimulation möglich, bei der ein zeitlicher Sollgeschwindigkeitsverlauf vorgegeben wird und der Prüfstand dabei die Zugkraft geschwindigkeitsabhängig einstellt. Ergänzend lassen sich Gefälle und Steigungen vorgeben.



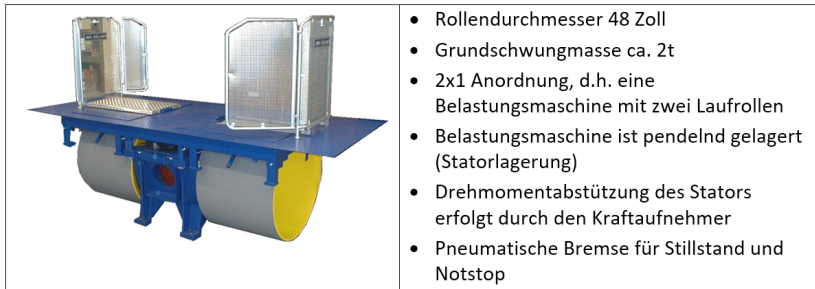


Abbildung 3. AVL Roadsim Scheitelrollenprüfstand (Foto: AVL) mit technischen Daten.

B. Funktionsprinzip der Straßenlastsimulation

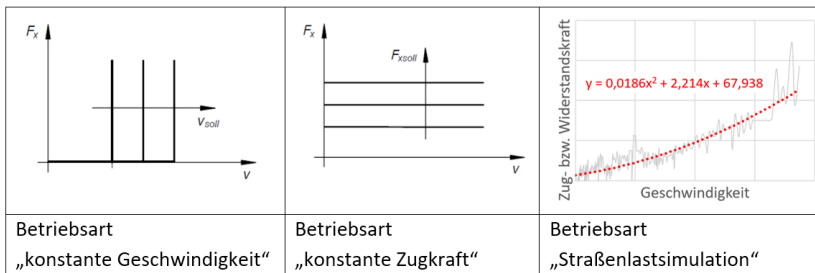


Abbildung 4. Neben den klassischen Betriebsmodi $v = \text{konst.}$ und $F = \text{konst.}$, bietet der AVL Prüfstand die Möglichkeit einer Straßenlastsimulation

Vorgehensweise Straßenlastsimulation: Bei der Straßenlastsimulation wird eine Soll-Geschwindigkeit über der Zeit vorgegeben, die die Fahrerin oder der Fahrer mit dem Fahrzeug entsprechend folgt. Die Prüfstandssteuerung regelt dann dynamisch für die jeweilige Geschwindigkeit die entsprechende Zugkraft. Zur Bestimmung der fahrzeugspezifischen Fahrwiderstände wird ein (oder mehrere) Ausrollversuche “Coast-Down-Versuch” mit dem Fahrzeug auf ebener Fahrbahn. Unter Vernachlässigung des Steigungswiderstands ergibt sich dabei folgender Zusammenhang:

$$F_T = (m + m_r) \cdot a = F_L + F_R \quad (1)$$

Mit:

F_T = Trägheits- bzw. Beschleunigungskraft

m = Fahrzeugmasse

m_r = rotatorische Massen

a = Beschleunigung

$F_L = c_W \cdot A \cdot \rho_L / 2 \cdot v^2$ = Luftwiderstand

c_W = Luftwiderstandsbeiwert

A = Stirnfläche

ρ_L = Luftdichte

$F_R = f_r \cdot m \cdot g$ = Rollwiderstand

f_r = Rollwiderstandsbeiwert

Durch zeitliche Ableitung der Ausrollkurve wird die Beschleunigung bestimmt. Nach Multiplikation mit der Fahrzeugmasse kann die von der Geschwindigkeit abhängige Zugkraft mit einem Polynom-Funktion 2. Grades näherungsweise beschrieben werden.

$$F_T = F_0 + F_1 \cdot v + F_2 \cdot v^2 \quad (2)$$

Die Koeffizienten F_0 , F_1 und F_2 werden als initiale Größen der Prüfstandssteuerung übergeben, um dann durch Ausrollversuche auf der Rolle solange iteriert zu werden, bis die Ausrollkurve mit ausreichender Genauigkeit mit der des Straßenversuchs übereinstimmen.

Zur Straßenlast- bzw. Wegstreckensimulation ist zudem ein zeitlicher Verlauf der Fahrgeschwindigkeit erforderlich, der innerhalb der Betriebsgrenzen des Prüfstands beliebige Verläufe erlaubt. So kann beispielsweise mittels GPS Tracking bei einer realen Fahrt die Ermittlung der Geschwindigkeit über der Zeit erfolgen. Das GPS-Signal ist hierfür vergleichsweise genau, wie durch Hinterlegen des Positionsverlaufs auf einer Karte (hier: <https://www.openstreetmap.de>) Abbildung 5, links ersichtlich ist. Über die zeitliche Aufnahme des Längen- und Breitengrades mit einem GPS-Empfänger kann die Geschwindigkeit bestimmt werden. Für die Aufnahme der Höhe ist das GPS in der Regel zu ungenau. Hierzu ist die Verwendung eines Luftdrucksensors eher geeignet. Wetterbedingte Luftdruckänderungen können bei länger andauernden Messfahrten z.B. durch einen zusätzlichen stationären Luftdrucksensor kompensiert werden. Die Erfassung des GPS-Signals und des Luftdrucks kann während der Fahrt beispielsweise über ein geeignetes Smartphone mit GPS-Sensor (üblich) und Luftdrucksensor (selten, hier: Huawei Mate 20) mit der App "phyphox" der RWTH Aachen [5] als zeitliche Verläufe mit z.B. 1 Hz gespeichert und in unterschiedlichen Formaten exportiert werden.

II. Versuche

A. Antriebsversuche

In der ersten Versuchsreihe werden Zugkraftmessungen an einem Pedelec der Marke Haibike vorgenommen. Das Pedelec ist mit einem Elektromotor der Firma Bosch vom Typ Performance Line CX ausgestattet.

Die Fahrwiderstände des Fahrrads wurden zuvor mittels einer Ausrollkurve berechnet und anschließend mittels Coast-Down Versuchen iterativ von der Prüfstandsregelung bestimmt. Ziel der Experimente ist es, die Präzision des Prüfstands zu

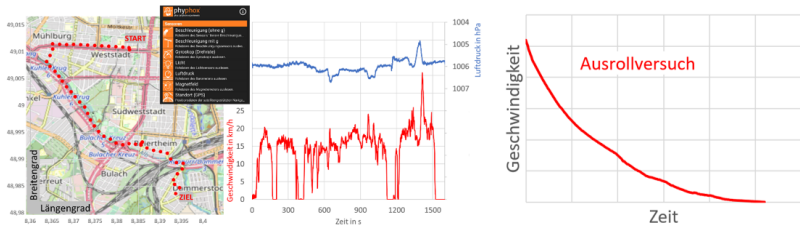


Abbildung 5. GPS-Tracking von realen Fahrzyklen (links) und Ausrollversuch zur Bestimmung der Fahrwiderstände

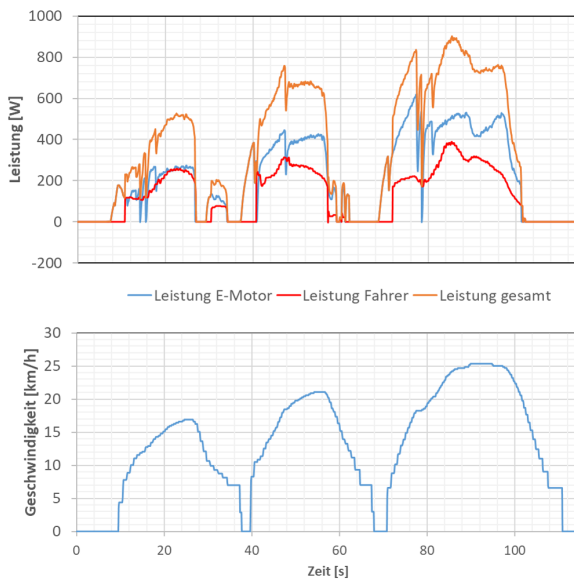


Abbildung 6. Leistung des Fahrers, E-Motors sowie Gesamtleistung während des Beschleunigens in den Fahrmodi Tour, Sport und Turbo

untersuchen, sowie Antriebsstrangverluste und Schwankungen in der Zugkraft über die Kurbelbewegung zu ermitteln.

Im ersten Versuch soll die Leistung des Pedals, welche über einen CAN-Bus Logger bestimmt wird, mit der gemessenen Radleistung des Rollenprüfstands verglichen werden. Hierzu wird im 17. Gang für die Fahrmodi "Tour", "Sport" und "Turbo" jeweils ein Beschleunigungsvorgang aufgezeichnet.

Das Steuergerät des Pedelecs misst mittels einer Drehmomenterfassung zum einen

die Leistung, welche vom Fahrer über die Pedale erbracht wird, zum anderen die Leistung des Elektromotors. In Abbildung 5 sieht man den zeitlichen Verlauf der drei Beschleunigungsvorgänge. Deutlich zu erkennen ist der Anstieg der elektromotorischen Leistung und somit auch der errechneten Gesamtleistung über die drei Fahrmodi von links nach rechts.

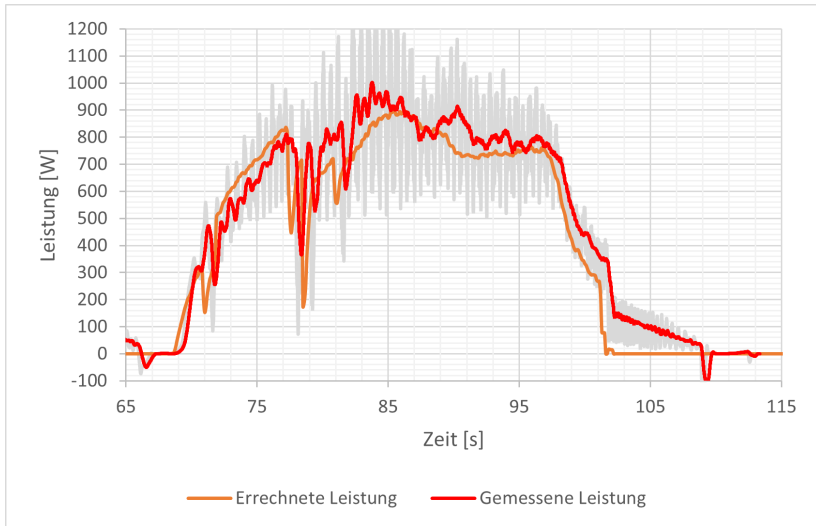


Abbildung 7. Modellierter Gesamtleistung sowie die gemittelte Radleistung während des Beschleunigungsvorgangs im Betriebsmodus Turbo

Abbildung 6 vergleicht die in der Steuerung des Pedelecs bestimmte Gesamtleistung mit der am Prüfstand erfassten Leistung am Hinterrad. Die beiden Verläufe stimmen weitestgehend überein. Auch die durch Drehschwingung hervorgerufenen Leistungsspitzen während der Beschleunigungsphase werden von beiden Mess-, bzw. Modellwerten wiedergegeben.

Im zweiten Versuch wird eine Konstant-Fahrt bei normalen Straßenbedingungen simuliert. Die Aufzeichnung der Zugkraft sowie Fahrzeuggeschwindigkeit erfolgen hierbei mit 500 Hz. Dies erlaubt es, den Zugkraftverlauf über eine Kurbelumdrehung genau auflösen zu können. Abbildung 7 zeigt eine Kurbelumdrehungen bei einer Trittfrequenz von einem Herz. Die maximale Zugkraft ergibt sich kinematikbedingt bei einer waagrechten Kurbelstellung. Die leichte Oberschwingung der Zugkraft wird durch die Regeleingriffe der Straßenlastsimulation generiert.

B. Bremsversuche

Die zweite Versuchsreihe beschäftigt sich mit dem Brems- und Temperaturverhalten von Fahrradbremsen. Zunächst wird die Hinterrad-Bremse einer E-Rikscha während

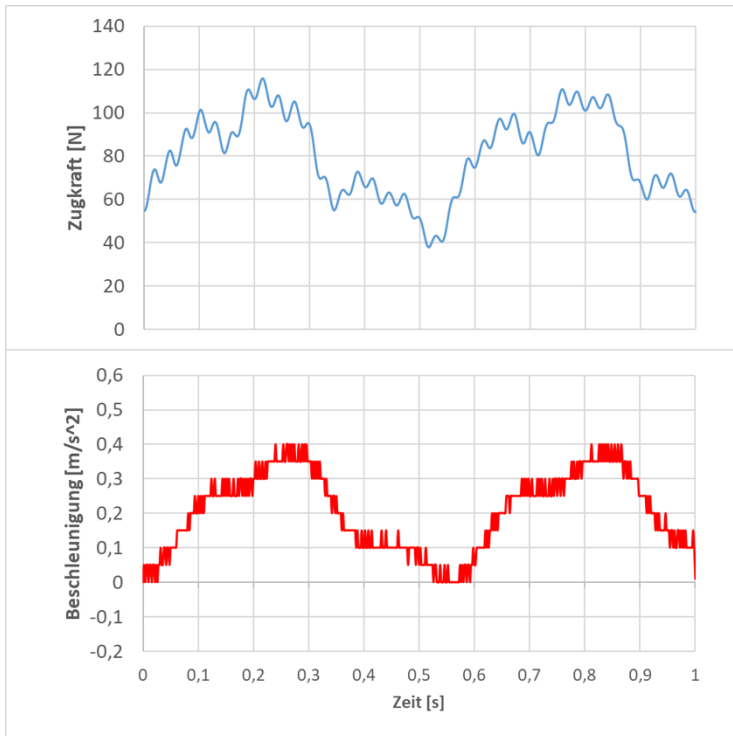


Abbildung 8. Zugkraft und Beschleunigung während einer Konstant-Fahrt mit einer Trittfrequenz von 1 Hz

eines Bremsvorgangs mittels einer Wärmebildkamera sowie Temperatursensoren auf einem Bremssattel untersucht.

In Abbildung 8 ist der Versuchsaufbau zu sehen. Das Vorderrad der E-Rikscha wird mittels eines Gestells und Spanngurten fixiert. Vor der Rikscha ist das Geschwindigkeitsabhängige Fahrtwindgebläse zu sehen. Über den Monitor kann der Fahrer alle aktuellen Messwerte überblicken und mittels Funktastatur den Prüfstand steuern. Im Vordergrund erkennt man Wärmebildkamera und den Rechner zur Aufzeichnung.

Der Prüfling wird zunächst auf eine Vorgabe-Geschwindigkeit geschleppt, anschließend wird die Straßensimulation eingeschaltet. Danach betätigt der Fahrer die Bremse und verzögert das Fahrzeug bis zum Stillstand. Mittels der Prüfstands-Datenerfassung werden Zugkraft, Geschwindigkeit, Bremssatteltemperatur und die zurückgelegte Wegstrecke aufgezeichnet. Abbildung 9 zeigt einen Bremsvorgang aus 40 km/h heraus bis zum Stillstand. Zusätzlich wurde hier ein Gefälle von 8 Prozent

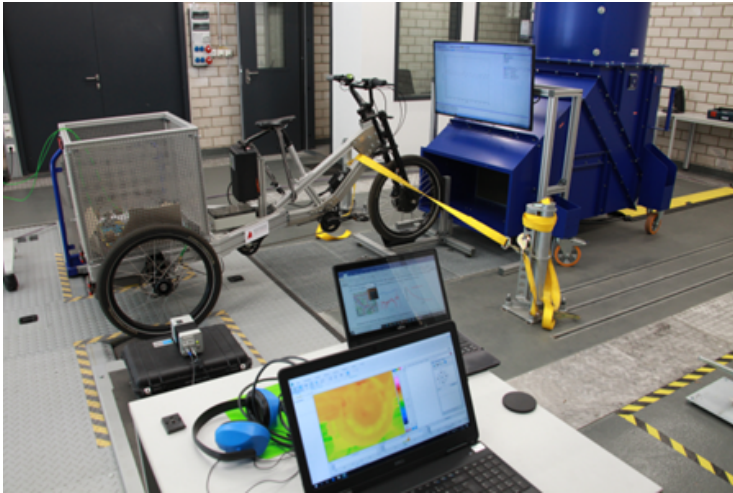


Abbildung 9. Versuchsaufbau mit E-Rikscha und Wärmebildkamera.

simuliert. Die Bilder der Wärmebildkamera zeigen die Oberflächentemperatur der rechten Brems Scheibe und des Brems sattsels.

Im zweiten Teil der Bremsversuchsreihe wird von Studierenden des Experimentierlabors im ersten Semester des Studiengangs Fahrzeugtechnologie, der Einfluss von Nässe auf das Bremsverhalten einer Fahrradscheibenbremse (hier: Hinterrad) untersucht. Das Fahrrad wird durch den Fahrer im Betriebsmodus Straßenlastsimulation zunächst mit einer trockenen Brems Scheibe auf 25 km/h beschleunigt und anschließend mit maximaler Bremskraft (ohne Blockieren) bis zum Stillstand verzögert. Für die zweite Messung wird der Vorgang wiederholt, allerdings wird kurz vor dem Verzögern mittels einer Sprühflasche ein leichter Wassernebel auf die Brems Scheibe aufgebracht. Auch in dieser Messung wird das Hauptaugenmerk auf die gemessene Zugkraft gerichtet. In Abbildung 10 sind Zugkraft und Fahrgeschwindigkeit für beide Bremsfälle über der Zeit aufgetragen. Für den Fall mit der nassen Brems Scheibe ist ein deutlicher Verlust von ca. 100 N Bremskraft zu erkennen. Im Gegensatz zur trockenen Bremsung ist eine Vergrößerung der Bremskraft über die Zeit erkennbar, welche auf ein Abtrocknen der Brems Scheibe zurückzuführen ist. Die Bremskraft von 250 N aus Messung 1 mit trockener Scheibe kann bis zum Ende des Verzögerns nicht erreicht werden.

III. Fazit

Die vorgestellten Versuche zeigen eindeutig auf, dass der AVL Rollenprüfstand der HKA neben der klassischen Untersuchung von PKWs auch zur Untersuchung an leichten Fahrzeugen wie normalen Fahrrädern, Pedelecs und Lastenfahrrädern

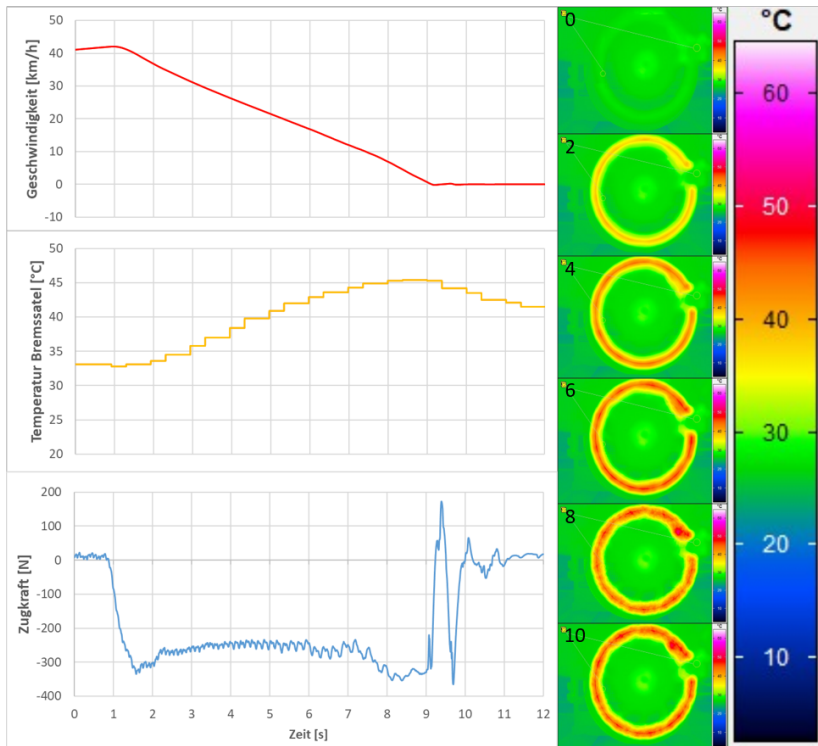


Abbildung 10. Bremsvorgang E-Rikscha 8 Prozent Gefälle aus 40km/h.

geeignet ist. Die Messtechnik erlaubt es Vorgänge in Zugkraftbereichen kleiner 100 N in ausreichender Präzision zu erfassen. Die drei Betriebsarten Konstantgeschwindigkeit, Konstantkraft und Straßenlastsimulation bieten die Möglichkeit Messungen, welche beispielsweise ein hohes Maß an Equipment erfordern am stehenden Fahrzeug in geschützter Atmosphäre durchzuführen. Gerade bei Fahrzeugen geringer Leistungsklasse haben Fahrwiderstände und somit Umgebungs- und Umweltbedingungen einen erheblichen Einfluss auf das Fahrverhalten. Alle Fahrwiderstände und andere Randbedingungen können auf dem Prüfstand beliebig und wiederholgenau simuliert werden, was die Aufzeichnung von reproduzierbaren Messungen ermöglicht. Ein umfangreiches Sicherheitskonzept trägt dazu bei, dass ein Aufenthalt im nächsten Umfeld zu Prüfling gefahrlos möglich ist.

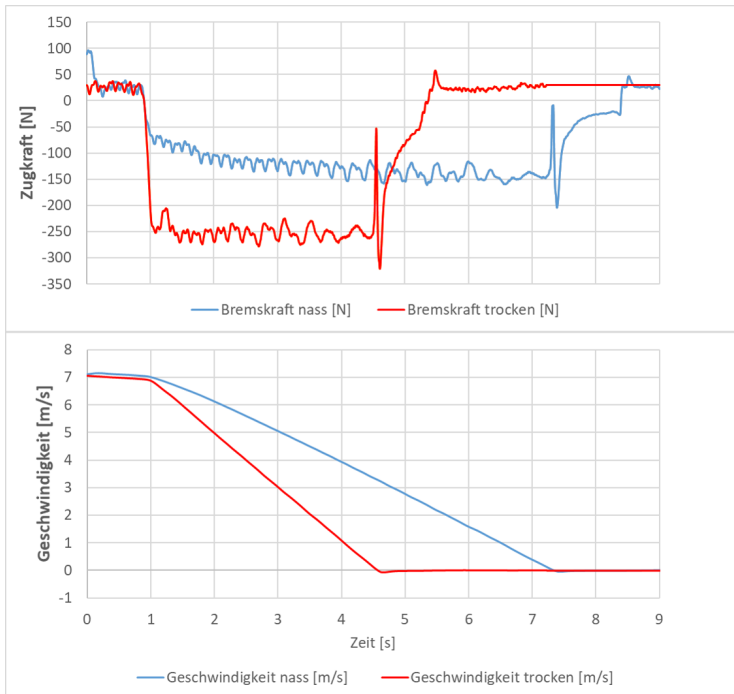


Abbildung 11. Vergleich eines Bremsvorgang mit trockener Bremsscheibe zu einem Bremsvorgang mit nasser Bremsscheibe.

IV. Danksagung

Ein großer Dank geht an Herrn Prof. Jürgen Walter für die Bereitstellung seiner E-Rikscha sowie für die Aufzeichnung von hervorragendem Bild- und Videomaterial während der Messungen. Unter folgendem Link ist ein kurzer Einblick in die Arbeit am Rollenprüfstand zu finden: https://www.youtube.com/watch?v=uRsnID_5yDw

Literatur

- [1] Okan Uyar, Mehmet Çunkaş, Hulusi Karaca, Enhanced intelligent control with adaptive system for electrically assisted bicycle, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 30, 2022, 101047, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.08.004>.
- [2] Clemens Oertel, Heinz Neuburger, Anton Sabo, Construction of a test bench for bicycle rim and disc brakes, Procedia Engineering, Volume 2, Issue 2, 2010, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.092>.
- [3] Vanwalleghem, J., De Baere, I., Loccufier, M. et al. Development of a test rig and a testing procedure for bicycle frame stiffness measurements. Sports Eng 21, 75-84 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12283-017-0248-8>
- [4] <https://www.velomobil.ch/ch/de/rollenpruefstand>
- [5] <https://phyphox.org/>
- [6] Oliver Maier, Benedikt Györfi, Jürgen Wrede, Timo Arnold, Alessandro Moia, In-depth analysis of bicycle hydraulic disc brakes, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 95, 2017, Pages 310-323, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.03.044>.

Energie- und Reichweitenvorhersage für E-Bikes

Yannick Rauch

Institut für Energieeffiziente Mobilität

Hochschule Karlsruhe

yannick.rauch@h-ka.de

Zusammenfassung

Wie für jedes andere E-Fahrzeug auch, stellt sich den Nutzern von E-Bikes die Frage der Reichweite. Diese wird bislang durch die Angabe generischer Streckenwerte beantwortet, welche sich üblicherweise auf eine spezifische Unterstützungsintensität beziehen. Allerdings weisen diese Reichweitenangaben keinen Bezug zu spezifischen, durch den Nutzer geplanten Fahrstrecken auf. Zudem wird dabei nicht berücksichtigt, dass je nach Streckenbedingungen verschiedene Unterstützungsintensität durch den Fahrer verwendet werden. Ob die vorhandene Akkuladung für die geplante Fahrstrecke ausreichend ist, kann mit den aktuellen Reichweitenangaben somit nicht zuverlässig beurteilt werden. In diesem Beitrag wird deshalb ein Konzept für eine spezifisch für E-Bikes entwickelte Energie- und Reichweitenvorhersage vorgestellt. Diese generiert Daten zur geplanten Strecke und berechnet mit diesen die E-Bike Fahrt mit konstanter sowie wechselnder Verwendung der Unterstützungsintensität, sodass E-Bike Fahrer über den voraussichtlichen Energiebedarf für die Fahrt informiert werden können.

Schlüsselbegriffe

Pedelec/E-Bike, Routenberechnung, Reichweitenvorhersage, Energie- und Dynamikprädiktion

1. Einführung

Das Nutzen eines E-Bikes ermöglicht es durch Verminderung der notwendigen Anstrengung für das Fahrradfahren sich schneller und unabhängiger von geographischen und meteorologischen Barrieren fortzubewegen [1]. Dies zeigt sich in den Gründen zur Anschaffung eines E-Bikes, welche das Erhöhen der fahrbaren Strecken und Höhendifferenzen, weniger Anstrengung und Steigerung der eigenen Fitness beinhalten [2]. Dementsprechend steigt die Verbreitung von E-Bikes in Deutschland kontinuierlich an. Allein im Jahr 2021 ist der E-Bike Bestand um weitere 2 Millionen auf insgesamt 8,5 Millionen E-Bikes gestiegen [3]. Damit ist bereits jedes zehnte Fahrrad in Deutschland ein E-Bike, welche sowohl im Alltag als auch für Freizeitaktivitäten oder sportliche Aktivitäten genutzt werden [2].

Allerdings ergibt sich vor dem Antritt von E-Bike Fahrten, wie für Fahrten mit anderen E-Fahrzeugen auch, die Frage nach der verbleibenden Reichweite. Während diese im Alltag auf Grund eigener Erfahrung gut eingeschätzt werden kann, stellt dies im Freizeitbereich vor allem für längere und gegebenenfalls unbekannte Strecken eine Herausforderung dar. So muss beurteilt werden, ob die vorhandene

Akkuladung ausreichend für das Fahren der geplanten Strecke ist, beziehungsweise das gewünschte Ziel erreicht werden kann. Dafür stehen E-Bike Fahrern aktuell lediglich Angaben zur noch möglichen Reichweite als Streckenwerte mit Bezug auf eine spezifische Unterstützungsintensität zur Verfügung. Diese werden beispielsweise durch den Bordcomputer des E-Bikes basierend auf dem bisherigen Energieverbrauch oder anhand generischer Streckenbedingungen berechnet. Dabei werden streckenspezifische Einflüsse auf den Energieverbrauch während der Fahrt sowie die streckenbedingte Verwendung verschiedener Unterstützungsintensitäten von E-Bike Fahrern nicht berücksichtigt.

Damit stehen für E-Bikes aktuell nur einfache Reichweitenangaben zur Verfügung, während für E-Fahrzeuge bereits wesentlich bessere Methoden für die Reichweitenberechnung existieren, mit denen abgeschätzt werden kann, wie viel Energie für geplante Strecken aufgewendet werden muss und ob das gewünschte Ziel mit der vorhandenen Akkuladung erreicht werden kann [4]. Im Rahmen dieser Ansätze erfolgt basierend auf den Eigenschaften der definierten Strecke eine Vorhersage des Dynamikverhaltens und des Energiebedarfs anhand einer Modellierung der Fahrwiderstände und des Fahrzeugs. Diese Methodik soll auf E-Bike Fahrten übertragen werden, sodass für das Fahren einer definierten Strecke eine Vorhersage über den elektrische Energiebedarf erfolgen kann. Zusätzlich muss für eine realitätsnahe Berechnung der voraussichtlich notwendigen Akkuladung anhand der Streckeneigenschaften die Verwendung der zur Verfügung stehenden Unterstützungsintensität vorhergesagt werden. Damit sollen E-Bike Fahrer bereits bei der Planung von Fahrten durch Angabe des voraussichtlichen elektrischen Energiebedarfs unterstützt werden, um damit potenzielle Sorgen bezüglich der Reichweitenfähigkeiten des E-Bikes vorzubeugen.

II. Reichweitenangaben für E-Bikes

Der Begriff der Reichweite lässt sich für E-Bikes nicht auf die gleiche Art anwenden wie für andere E-Fahrzeuge. Dafür ausschlaggebend ist, dass der Antrieb eines E-Bikes primär durch den Fahrer erfolgt und durch das E-Bike System, bestehend aus Motor und Akku, verstärkt werden kann. Dabei darf der Motor nur dann eine Antriebsleistung aufbringen, wenn der Fahrer das E-Bike durch Abgabe von Trittleistung aktiv antreibt und dies auch nur bis zu einer Geschwindigkeit von bis zu 25 km/h [5]. Dementsprechend zeigt Abbildung 1, dass sich die Antriebsleistung eines E-Bikes immer aus der Trittleistung des Fahrers und der Antriebsleistung des E-Bike Antriebssystems, beziehungsweise des Motors zusammensetzt. Der Motor wird dafür vom Akku mit elektrischer Leistung gespeist, welche solange abgegeben werden kann, wie der Ladezustand (*State of Charge* – SoC) des Akkus größer null Prozent beträgt. Sobald der Akku vollständig entladen ist, kann keine elektrische Leistung mehr abgegeben werden. Die Fortbewegung mit dem E-Bike bleibt weiterhin möglich, da lediglich der Antrieb durch das E-Bike Antriebssystem entfällt, der Fahrer das E-Bike allerdings eigenständig antreiben kann. Damit ist die maximale Reichweite eines E-Bikes unabhängig vom E-Bike Antriebssystem und bestimmt sich anhand der Fitness und Ausdauerfähigkeit des Fahrers.

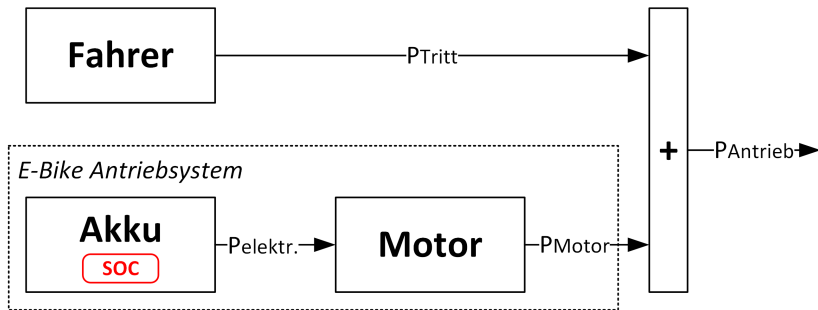


Abbildung 1: Funktionale Übersicht der mechanischen und elektrischen Leistungen für den Antrieb eines E-Bikes

Die üblicherweise verwendete Angabe der Reichweite beziehen sich auf die noch fahrbare Distanz mit aktivem E-Bike Antriebssystem und der dauerhaften Nutzung einer definierten Unterstützungsintensität und werden basierend auf dem bisherigen Energieverbrauch oder pauschal für eine Auswahl generischer Streckeneigenschaften berechnet. Diese Reichweitenangaben dienen vor allem als Anhaltspunkte für eine grobe Abschätzung der Reichweitenfähigkeiten des E-Bikes. Allerdings mit der Einschränkung, dass diese sich nicht auf eine definierte Strecke anwenden lassen, da spezifische Streckeneigenschaften nicht berücksichtigt werden. Zudem beziehen sich die angegebenen Distanzen nur auf eine definierte Unterstützungsintensität, während E-Bike Fahrer die Unterstützungsintensität üblicherweise den Streckenbedingungen anpassen oder gegebenenfalls überhaupt nicht benötigen. So werden Streckenabschnitte, auf denen die Unterstützung nicht verwendet wird, beispielsweise während Bergabfahrten von bestehenden Reichweiteninformationen nicht berücksichtigt. Mit den aktuellen Angaben über noch fahrbare Distanzen lässt sich somit nur ungenau beurteilen, ob eine spezifische Strecke gefahren oder ein gewünschtes Ziel erreicht werden kann.

Zur Beurteilung der Reichweitenfähigkeit von E-Bikes für spezifische Strecken ist hingegen die Information über den voraussichtlichen elektrischen Energiebedarf, beziehungsweise die voraussichtlich benötigte Akkuladung relevant. Diese können für die geplante Fahrt anhand der spezifischen Streckenbedingungen berechnet werden und sich sowohl auf die konstante Verwendung einer einzigen Unterstützungsintensität als auch auf die Nutzung mehrerer Unterstützungsintensitäten beziehen. Durch diese Reichweiteninformation werden zudem auch Streckenabschnitte berücksichtigt, auf denen die Unterstützung nicht benötigt wird, beispielsweise auf Bergabfahrten oder wenn der Fahrer aus eigener Kraft schneller als 25 km/h fahren kann. Somit ermöglichen Vorhersagen über den voraussichtlichen Energiebedarf für geplante Fahrten den E-Bike Fahrern eine genauere Beurteilung, ob die vorhandene Akkuladung ausreicht, um die geplante Strecke mit angemessener Unterstützung fahren zu können.

III. Energie- und Reichweitenvorhersage

Der Algorithmus zur Energie- und Reichweitenvorhersage soll E-Bike Fahrer bei der Planung von Routen oder Touren durch Bereitstellung von Energie- und Dynamikinformatoren unterstützen, beispielsweise durch Angabe des voraussichtlichen elektrischen Energiebedarfs, beziehungsweise der notwendigen Akkuladung. Damit die Vorhersage spezifisch für die vorgegebene Route erstellt wird, muss diese mindestens durch Start- und Zielpunkte sowie beliebig viele weitere Wegpunkte definiert sein. Anhand dieser Definition werden der vollständige Routenverlauf und alle weiteren relevanten Streckeneigenschaften berechnet, welche als Routeninformationen zur Ausgabe bereitgestellt werden können. Für eine detaillierte Vorhersage des Energieverbrauchs werden zudem die Eigenschaften des E-Bikes, des E-Bike Antriebssystems sowie des E-Bike Fahrers benötigt. Zusätzlich kann für jede Fahrt das Gewicht der Zuladung angegeben werden sowie die gewünschte Anstrengung, um zwischen sportlich ambitionierten und alltäglichen Fahrten unterscheiden zu können. Dementsprechend ergibt sich für den Algorithmus die in Abbildung 2 dargestellte Blackbox.

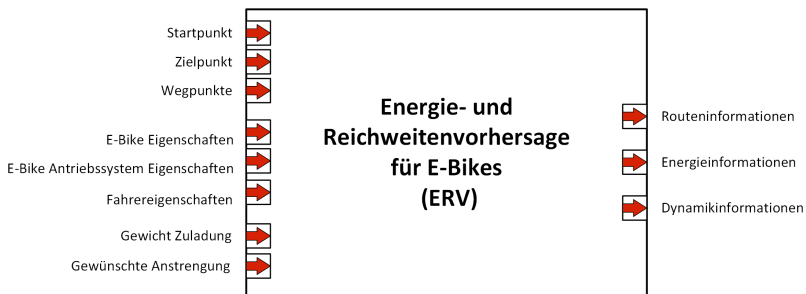


Abbildung 2: Blackbox des Algorithmus zur Energie- und Reichweitenvorhersage für E-Bikes

Die Energie- und Reichweitenvorhersage besteht aus vier Subsystemen, wie in Abbildung 3 dargestellt. Die Unterstützungsprädiktion (*PRE-U*) berechnet die voraussichtliche Verwendung der Unterstützung basierend auf den Ergebnissen der Energie- und Dynamikprädiktion (*PRE-E&D*). Diese wiederum ist auf die Ergebnisse der Fahrzeugdatengenerierung (*FDG*) und der Routendatengenerierung (*RDG*) angewiesen.

Abbildung 4 zeigt die Architektur der Energie- und Reichweitenvorhersage. Die Routendatengenerierung bestimmt dabei aus der gegebenen Routendefinition den Routenverlauf und ermittelt die für die Energie- und Dynamikprädiktion relevanten Streckeneigenschaften und gewinnt aus diesen die Routeninformationen. Die Fahrzeugdatengenerierung führt die Eigenschaften von Fahrer und E-Bike zusammen, sodass die Fahrzeugeigenschaften den auf dem E-Bike sitzenden Fahrer darstellen.

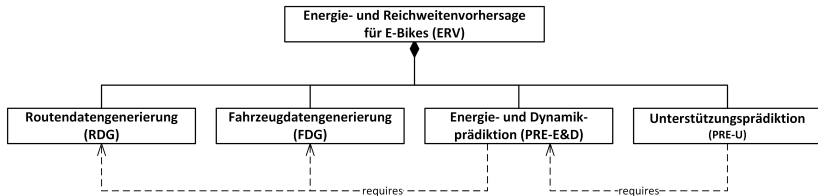


Abbildung 3: Definition der Subsysteme für den Algorithmus zur Energie- und Reichweitenvorhersage für E-Bikes

Anhand der Fahrzeug-, Fahrer-, E-Bike Antriebssystem und Streckeneigenschaften kann das Energie- und Dynamikverhalten mit Bezug auf eine definierte Unterstützungsfunktion vorhergesagt werden. Die Unterstützungsprädiktion nutzt die Energie- und Dynamikprädiktionsdaten, die Fahrereigenschaften sowie die gegebene gewünschte Anstrengung, um die den Streckenbedingungen angepasste Unterstützung und die zugehörigen Energie- und Dynamikgrößen zu berechnen.

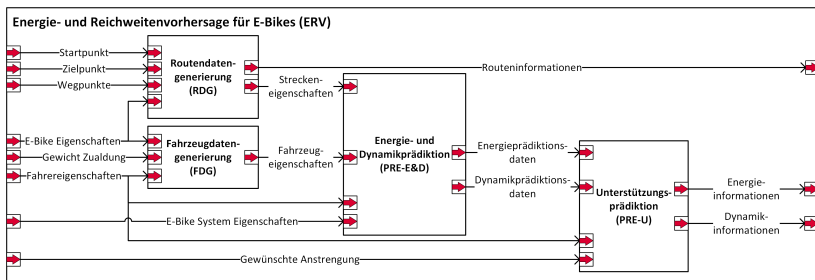


Abbildung 4: Definition der Architektur für den Algorithmus zur Energie- und Reichweitenvorhersage für E-Bikes

Zusammengefasst leistet die Energie- und Reichweitenvorhersage eine Schätzung der Dynamik und des Energiebedarfs einer E-Bike Fahrt auf einer zuvor bestimmten Strecke. Diese Vorhersage kann dabei nicht nur für die Verwendung einer einzigen Unterstützungsfunktion/-intensität erfolgen, sondern insbesondere auch für eine im Streckenverlauf wechselnde Verwendung der Unterstützung durch den E-Bike Fahrer.

IV. Energie- und Dynamikprädiktion für E-Bikes

Die Energie- und Dynamikprädiktion soll den voraussichtlichen Verlauf der E-Bike Fahrt beschreiben und damit die Datengrundlage für die Energie- und Reichweitenvorhersage legen. Die dafür zu berücksichtigenden Einflüsse auf das Dynamik- und Energieverhalten lassen sich in die Kategorien *Umwelt*, *Strecke*, *Fahrer* und

E-Bike sowie E-Bike (Antriebs-) System unterteilen, wie in Abbildung 5 dargestellt. Die Umwelt- und Streckeneinflüsse werden für jede spezifische Strecke durch die Routendatengenerierung bestimmt und enthalten Informationen zu Wind/Wetter, der Routenführung, dem Höhenprofil und dem Untergrund. Die Dynamik der E-Bike Fahrt, dem daraus folgenden elektrischen Energiebedarf und die Anstrengung für den Fahrer werden dabei in Abhängigkeit der durch das E-Bike Antriebssystem bereitgestellten Unterstützung berechnet.

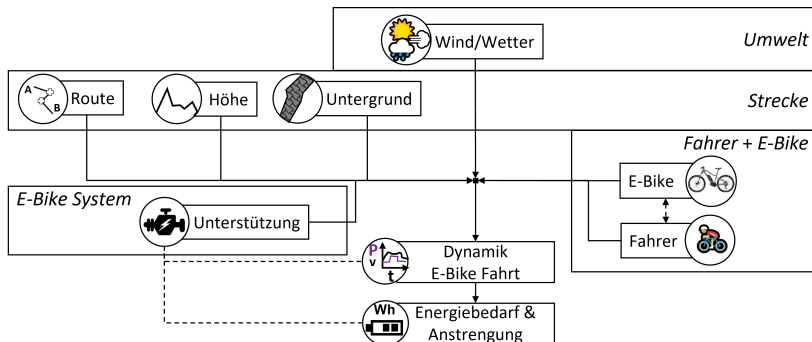


Abbildung 5: Einflussfaktoren für die Energie- und Dynamikprädiktion einer E-Bike Fahrt

Während sich die resultierende Dynamik für elektrische Fahrzeuge üblicherweise basierend auf externen Faktoren [4] wie beispielsweise Geschwindigkeitsbeschränkungen vergleichsweise einfach berechnen lässt, muss für die Darstellung von Fahrrad und E-Bike-Fahrten ein anderer Ansatz gewählt werden. Für die Berechnung der Dynamik einer E-Bike Fahrt sind dabei vor allem der Fahrer und dessen physischen Möglichkeiten entscheidend. Zudem ist die Unterstützung aktueller E-Bikes vom Antriebsverhalten des Fahrers abhängig und hat somit einen weiteren signifikanten Einfluss auf die resultierende Dynamik des E-Bikes, die Anstrengung des Fahrers sowie den elektrischen Energiebedarf des E-Bike Antriebssystems. Dementsprechend ergibt sich die Dynamikprädiktion als Vorhersage des individuellen Antriebsverhaltens des Fahrers unter Berücksichtigung der Unterstützungsfunktion und der resultierenden Längsdynamik auf der definierten Route. Basierend auf der Vorhersage des Antriebs durch den Fahrer kann anhand der Eigenschaften des E-Bikes und E-Bike Antriebssystems die Funktion des Antriebsstrangs berechnet werden. Die Bewegung des E-Bikes auf der Strecke ergibt sich damit aus der Betrachtung der Längsdynamik, welche anhand der Fahrwiderstände [6] berechnet werden kann. Mit den errechneten Dynamikinformationen kann dann abschließend die Berechnung der Anstrengung für den Fahrer sowie des elektrischen Energiebedarfs erfolgen.

V. Funktionsdemonstrator

Die Umsetzung der Energie- und Reichweitenvorhersage erfolgt durch einen Funktionsdemonstrator, welcher als Web-Applikation aufgebaut wird. Die für die Berechnungen der Energie- und Reichweitenvorhersage, beziehungsweise der Energie- und Dynamikprädiktion benötigten Streckeneigenschaften erfolgt durch die Nutzung von Web-APIs. Für die Berechnung der Route inklusive der Bereitstellung von Höhen- und Untergrunddaten wird die *Openrouteservice* API genutzt [7]. Die Daten zu Umwelteinflüssen werden von der *OpenWeatherMap*-API [8] abgerufen. Die benötigten Fahrer, E-Bike und E-Bike Antriebssystem Eigenschaften müssen über die Weboberfläche eingegeben und für weitere Aufrufe gespeichert werden. Zusätzlich kann angegeben werden, wie viel Zusatzgewicht durch Gepäck mitgeführt wird und wie anstrengend die Fahrt durch angepasste Verwendung der Unterstützung werden soll. Anhand dieser Eigenschaften sowie der Routendefinition berechnet die Energie- und Reichweitenvorhersage dann den voraussichtlichen elektrischen Energiebedarf sowie die Fahrzeit für die konstante und wechselnde Verwendung der zur Verfügung stehenden Unterstützungsintensitäten.

A. Fahrer und E-Bike Konfiguration

Damit eine individuelle Energie- und Reichweitenvorhersage erstellt werden kann, müssen die Fahrer und E-Bike Eigenschaften jedes Nutzers bekannt sein. Diese Daten werden dem Nutzerprofil zugeordnet und in einer Datenbank gespeichert, sodass die Eingaben bei mehrfacher Nutzung nicht erneut erfolgen müssen.

Konfiguration des Fahrers

Name: E-Bike Fahrer

Gewicht: 90 kg

Größe: 1.8 m

Trittleistung: Manuelle Eingabe 220 W

Trittfrequenz: Schnell 80 rpm

SPEICHERN ABBRECHEN

Konfiguration des E-Bikes

Name: Generic-MTB

E-Bike-Typ: Mountainbike

Reifentyp: Mountainbike-Reifen

Reifengröße: 29 Zoll

Akku-Energieinhalt: 490 Wh

Antrieb:

Schaltung: 12 Antriebs-Gänge Hersteller

SPEICHERN ABBRECHEN

(a) (b)

Abbildung 6: Konfiguration des Fahrers und des E-Bikes im Online E-Bike Planner

Die Konfiguration des Fahrers, wie in Abbildung 6a dargestellt, umfasst die Angabe des Gewichts, der Körpergröße sowie der Fitness durch Angabe einer Trittleistung und Trittfrequenz, welche anhand voreingestellter Werte ausgewählt werden können. So ist die Auswahl der Trittleistung von „Untrainiert“ bis „Profi“ und der Trittfrequenz von „Sehr Langsam“ bis „Sehr Schnell“ möglich. Alternativ besteht zudem die Möglichkeit, die Werte manuell einzugeben.

Die Konfiguration des E-Bikes inklusive des E-Bike Antriebssystems, wie in Abbildung 6b dargestellt, umfasst verschiedene Auswahlmöglichkeiten und manuelle Eingaben. So kann für den Fahrrad/E-Bike Typ zwischen „Mountainbike“, „Trekkingrad“, „Citybike“ und „Rennrad“ ausgewählt werden. Für den Reifentyp besteht die entsprechende Auswahl zwischen einem „Mountainbike“- , „Standard“- oder „Rennrad“-Reifen, während die Reifengröße in Zoll manuell eingegeben werden muss. Die Konfiguration der Schaltung erfolgt anhand von hinterlegten Datensätzen für die Übersetzungen verschiedener typischer Gangschaltungsvarianten zweier Hersteller von Schaltkomponenten. Somit muss lediglich angegeben werden, von welchem Hersteller die Schaltung stammt und wie viel Gänge am E-Bike zur Verfügung stehen. Zur Einstellung des E-Bike Antriebs stehen Datensätze von verschiedenen Antrieben diverser Hersteller zur Auswahl. Diese Datensätze enthalten die spezifischen Eigenschaften, welche für die Berechnung der Energie- und Reichweitenvorhersage benötigt werden. Abschließend muss der maximale Energieinhalt des Akkus angegeben werden. Diese Eingabe erfolgt manuell, sodass alle möglichen Akkuvarianten der verschiedenen Hersteller berücksichtigt werden und eine durch Alterung verminderte Kapazität ebenfalls berücksichtigt werden kann.

B. Online E-Bike Planner

Abbildung 7 zeigt den aktuellen Stand des *Online E-Bike Planners*. Basierend auf der Konfiguration des Fahrers und des E-Bikes sowie der geplanten Route werden die ermittelten Daten zur Strecke (Distanz, Gesamtanstieg- und Abstieg sowie das Höhenprofil) angezeigt. Zudem erfolgt die Ausgabe der Ergebnisse der Energie- und Reichweitenvorhersage in Form der voraussichtlichen Fahrzeit und des voraussichtlichen Akkuverbrauchs in %-SoC. Standardmäßig wird das Ergebnis für die Verwendung einer den Streckenbedingungen angepassten Unterstützung zum Erreichen eines normalen Anstrengungsniveaus angezeigt. Die gewünschte Anstrengung kann dabei von „Sehr Einfach“ bis „Herausfordernd“ variiert werden, sodass sich ein höherer, beziehungsweise niedrigerer Energiebedarf für die Fahrt ergeben kann. Des Weiteren ist es möglich, den voraussichtlichen Akkuverbrauch der Fahrt für die Verwendung einer einzigen Unterstützungsintensität anzuzeigen.

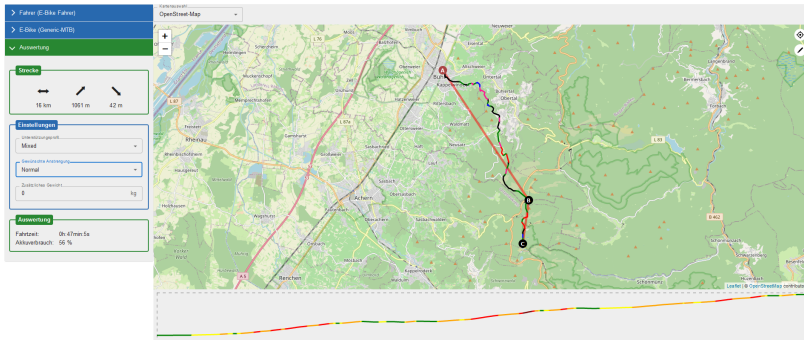


Abbildung 7: Aktueller Stand des Funktionsdemonstrators zur Energie- und Reichweitenvorhersage "Online E-Bike Planner"

VI. Zusammenfassung und Ausblick

Die Energie- und Reichweitenvorhersage für E-Bikes ermöglicht präzisere Angaben über die Reichweitenfähigkeit für spezifische Strecken. So muss die Reichweite nicht mehr anhand generische Distanzwerte abgeschätzt werden, welche sich lediglich auf eine spezifische Unterstützungsintensität beziehen. Dabei werden die Distanzwerte zum einen durch Angabe über den voraussichtlichen elektrischen Energiebedarf, beziehungsweise die voraussichtlich benötigte Akkuladung für das Fahren der spezifizierten Strecke ersetzt. Zum anderen ermöglicht die Energie- und Reichweitenvorhersage die Darstellung einer den Streckenbedingungen angepassten Verwendung der Unterstützung zum Erreichen einer gewünschten Anstrengung durch den Fahrer. Anhand dieser Auswahl kann die realistische Verwendung mehrerer Unterstützungsintensitäten auf einer Strecke dargestellt werden und ein entsprechend realitätsnaher Energiebedarf in %-SoC berechnet werden. Die Funktion der Energie- und Reichweitenvorhersage ist aktuell mittels einer Web-Applikation, dem *Online E-Bike Planner*, umgesetzt und bietet damit das Potenzial für eine verbesserte Tourenplanung von E-Bike Fahrten.

Neben der Vorhersage bietet der bestehende Algorithmus Möglichkeiten für weitere Entwicklungen und Funktionen. So kann E-Bike Fahrern die ohnehin berechnete, den Streckenbedingungen angepasste Unterstützungsauswahl während der Fahrt angezeigt werden, sodass die Unterstützung bedarfsgerecht und zielgerichtet eingesetzt werden kann und damit ein verbessertes Fahrgefühl ermöglicht wird. Zudem wird die Weiterentwicklung zu einem vorausschauenden Energie- und Reichweitenmanagement angestrebt, welches zusätzlich den aktuellen Akkuladestand des E-Bikes und damit die für die E-Bike Fahrt zur Verfügung stehenden Energie berücksichtigen soll. Dabei soll vor und während der Fahrt geprüft werden, ob die vorhandenen Akkuladung für die geplante Fahrt ausreicht. Ist dies nicht der Fall, soll die Verwendung der Unterstützung im Fahrtverlauf angepasst werden, sodass die

E-Bike Fahrer mit der zur Verfügung stehenden elektrischen Energie gezielt und vor allem angemessen unterstützt werden. Die Auswahl der Unterstützungsintensität kann dann während der Fahrt manuell durch den Fahrer oder automatisiert durch das E-Bike Antriebssystem erfolgen.

Mitwirkende

Der Aufbau des Funktionsdemonstrators *Online E-Bike Planner* ist im Rahmen einer Projektarbeit am Institut für Energieeffiziente Mobilität (IEEM) der Hochschule Karlsruhe durch Manuell Gass und Philipp Merz erfolgt [9]. Die darauf aufbauende Weiterentwicklung, welche zum aktuellen Stand der Web-Applikation geführt hat, erfolgt durch Frank May, welcher als Mitarbeiter am IEEM tätig ist.

Literatur

- [1] P. A. Plazier, G. Weitkamp, and A. E. van den Berg, "‘Cycling was never so easy!’ An analysis of E-Bike commuters’ motives, travel behaviour and experiences using GPS-tracking and interviews", *Journal of Transport Geography* 65, 2017.
- [2] Shimano Europe, State of the Nation report - "Examining attitudes towards E-Bike usage in 11 European countries", Eindhoven, 07/2020. Online verfügbar unter: <https://www.shimano-steps.com/e-bikes/europe/en/state-of-the-nation-report>.
- [3] Zweirad-Industrie-Verband, "Marktdaten Fahrräder und E-Bikes 2021", 03/2022. Online verfügbar unter: https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/ZIV_Marktdatenpraesentation_2022_fuer_Geschaeftsjahr_2021.pdf.
- [4] K. Kruppok, C. Gutenkunst, R. Kriesten, E. Sax, "Prediction of energy consumption for an automatic ancillary unit regulation", 17. Internationales Stuttgarter Symposium, Proceedings, 2017.
- [5] Bundesamt für Justiz, "Straßenverkehrsgesetz (StVG) §1, Abs. 3", Berlin, 2021.
- [6] S. Breuer, A. Rohrbach-Kerl, "Fahrzeugdynamik Mechanik des bewegten Fahrzeugs - Kapitel 3", Springer Vieweg, 2015.
- [7] HeiGIT gGmbH, "Openrouteservice API", Online verfügbar unter: <https://openrouteservice.org/>
- [8] OpenWeather, "OpenWeatherMap-API", Online verfügbar unter: <https://openweathermap.org/>
- [9] M. Gass, P. Merz, "Projektarbeit: Aufbau eines Online-Reichweitenplaners für E-Bikes", Karlsruhe, 2022.

Fahrradtachometer an Nabendynamo

Markus Knoch
Masterstudiengang Elektrotechnik
Hochschule Karlsruhe
Karlsruhe
knma1032@h-ka.de

Nils Schlegelmilch
Masterstudiengang Elektrotechnik
Hochschule Karlsruhe
Karlsruhe
scni1083@h-ka.de

Klaus Wolfrum
Fakultät für Elektro- und Informations-
technik
Hochschule Karlsruhe
Karlsruhe
klaus.wolfrum@h-ka.de

Zusammenfassung

Alltagsfahrräder verfügen in der Regel über einen Nabendynamo für die Beleuchtung. Da die Frequenz der erzeugten Wechselspannung von der Fahrgeschwindigkeit abhängig ist, kann der Dynamo auch als Tachogenerator verwendet werden. Die Realisierung eines vom Nabendynamo gespeisten Fahrradcomputers mit USB-Ladefunktion ist dadurch möglich. Mit einer Mikrocontrollerschaltung wird aus der Frequenz der nicht gleichgerichteten Dynamospannung die Geschwindigkeit ermittelt und angezeigt. Zur Energieversorgung wird die Dynamospannung gleichgerichtet und speist ein Powerbank-Modul zur Ladung eines integrierten Lithium-Akkus und wahlweise auch extern angeschlossene USB-Geräte. Wie bei Fahrradtachometern üblich, können neben der Geschwindigkeit auch Werte wie z. B. Tageskilometer, Temperatur etc. angezeigt werden.

Index Terms

Unterbrechungsfreie Stromversorgung, Nabendynamo, Fahrradtachometer

I. Einleitung

Konventionelle Fahrradtachometer erhalten ihre Geschwindigkeitsinformation in der Regel durch einen Gebermagnet, der an einer Speiche des Vorderrads angebracht ist. Weiterhin ist an der Gabel ein passend ausgerichteter Reed-Kontakt erforderlich, der vom Gebermagnet bei Drehung des Vorderrads betätigt wird. Dieses Gebersignal wird über Kabel oder bei manchen Ausführungen auch drahtlos zum Tachometer am Lenker weitergeleitet. Zur Stromversorgung des Tachometers dient üblicherweise eine Knopfzelle, bei drahtloser Ausführung wird eine zusätzliche Batterieversorgung des Gebers an der Gabel benötigt. Die Ausrichtung des Gebermagneten ist recht störanfällig, ebenso wie die zusätzlich erforderliche Verkabelung. Ein meist einmal jährlich erforderlicher Batteriewechsel erfordert zusätzlichen Aufwand.

Gegenüber diesen konventionellen Lösungen soll ein Fahrradcomputer vorgestellt werden, der sowohl seine Energieversorgung als auch das Geschwindigkeitssignal aus der Wechselspannung des Nabendynamos ableitet und darüber hinaus noch als

USB-Spannungsversorgung zum Aufladen bzw. Betrieb weiterer Geräte verwendet werden kann. Hierbei muss beachtet werden, dass nicht nur die Frequenz der vom Nabendynamo gelieferten Spannung sondern auch deren Amplitude von der Geschwindigkeit abhängt. Daher sind Vorkehrungen zum Überspannungsschutz der elektronischen Komponenten des Fahrradcomputers erforderlich.

Um den zur Stromversorgung während Stillstandsphasen erforderlichen Lithium-Akku nicht unnötig zu belasten, ist eine möglichst geringe Stromaufnahme der Hardware zwingend notwendig. Daher muss bei der Auswahl des zu verwendenden Mikrocontrollers besonders auf einen sparsamen Ruhemodus geachtet werden. Selbstverständlich soll der Fahrradcomputer alle üblichen Diagnosefunktionen eines herkömmlichen Fahrradtachometers aufweisen. So sind Durchschnittsgeschwindigkeit, die Tageskilometeranzahl, die gesamte gefahrene Strecke, Temperatur sowie Uhrzeit und Datum abrufbar und werden wahlweise auf der Anzeige dargestellt. Der Gesamtaufbau ist modular gestaltet, so dass einzelne Komponenten einfach modifiziert werden können.

II. Grundkonzeption

A. Anforderungen an die Funktionsweise

Der Nabendynamo soll in mehrfacher Weise genutzt werden, so dass sich für den Fahrradcomputer ein hoher Gebrauchsnutzen ergibt. Daraus ergeben sich die folgenden Anforderungen:

- Stromversorgung durch Nabendynamo
- Überspannungsschutz bei hoher Fahrgeschwindigkeit
- Ableiten des Tachogebersignals aus der Dynamospannung
- unterbrechungsfreie Stromversorgung anschließbarer USB-Verbraucher
- geringstmögliche Stromaufnahme bei Stillstand des Fahrrads
- automatische Aktivierung beim Bewegen des Fahrrads
- spritzwassergeschütztes Gehäuse mit einfacher Montagemöglichkeit an Fahrradlenker oder Vorbau
- intuitive Bedienung zur Parametereinstellung
- einfacher Nachbau

B. Überblick über die Funktionsblöcke

Abbildung 1 gibt einen Überblick über die erforderlichen Funktionsblöcke. Die vom Nabendynamo erzeugte Spannung wird über ein Leistungsmodul einem Lithium-Akku zugeführt. Das Leistungsmodul besteht aus einem Brückengleichrichter mit Überspannungsschutz und einem Tiefsetzsteller. Die gleichgerichtete und gesiebte Wechselspannung, deren Wert je nach Geschwindigkeit stark schwanken kann, wird vom Tiefsetzsteller auf den konstanten Wert von 5 V herabgesetzt. Damit wird ein Lithium-Akku geladen, der zur Stromversorgung des Fahrradcomputers sowie weiterer externer USB-Verbraucher genutzt wird.

Parallel dazu wird die nicht gleichgerichtete, näherungsweise sinusförmige Spannung des Nabendynamos im Steuermodul von einer Triggerschaltung erfasst und

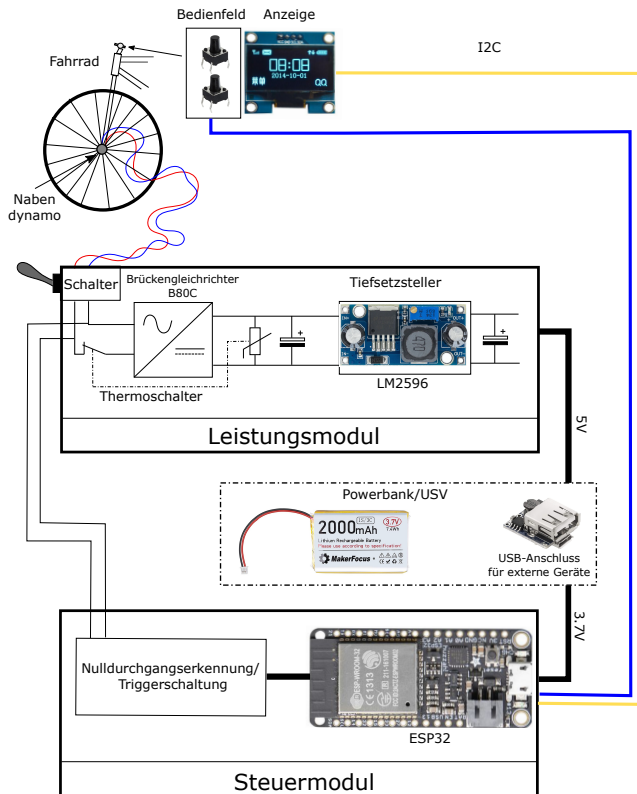


Abbildung 1: Übersicht über die Funktionsblöcke und deren Verschaltung: Bedienfeld und Anzeige, Leistungspfad mit Leistungsmodul und Powerbank zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV), Signalpfad zum Steuermodul mit Triggerschaltung zur Nulldurchgangserkennung und Mikrocontroller ESP32

in eine Rechteckspannung umgewandelt. So kann die Geschwindigkeit des Fahrrads aus der Frequenz der Spannung bestimmt werden. Die logische Verarbeitung der Signale sowie die Ein- und Ausgabe wird dabei von einem Mikrocontroller übernommen.

C. Auswahl der Komponenten

Die Auswahl der Komponenten erfolgt unter den Gesichtspunkten Handhabbarkeit, Baugröße und Stromaufnahme. Vor allem während der möglicherweise recht lan-

gen Stillstandsphasen des Fahrrads muss ein Betriebsmodus realisiert werden, der alle Daten und Parameter behält, aber dennoch eine sehr kleine Stromaufnahme aufweist.

1) *Mikrocontroller*: Bei der Auswahl des Mikrocontrollers ist neben der Leistungsfähigkeit vor allem die Stromaufnahme im inaktiven Ruhemodus, dem sogenannten Sleep-Modus wichtig. Da ein Fahrrad die meiste Zeit nicht bewegt wird, sondern ungenutzt abgestellt ist, muss der Mikrocontroller in dieser Phase eine möglichst geringe Stromaufnahme aufweisen. Die interne Uhr (real time clock RTC) muss dabei weiterlaufen und die gespeicherten Daten müssen erhalten bleiben. Damit das Projekt auch von Laien nachgebaut werden kann, wurden lediglich Mikrocontroller verglichen, die als fertiges Entwicklungsboard zur Verfügung stehen, da andernfalls die Montage ohne professionelle Lötausrüstung nicht möglich wäre. In Tabelle I werden die relevanten Daten einiger gängiger Mikrocontroller-Plattformen verglichen. Dabei zeigen sich große Unterschiede in der Stromaufnahme.

Tabelle I: Vergleich verschiedener Mikrocontroller-Plattformen

Mikrocontroller	ESP32 FireBeetle [4]	PSoC CY8CKIT-059 [5]	Arduino Nano [6]	STM32 M3 [7]
Baugröße in mm	58x29	110x25	45x18	52x22
RTC im Sleep-Modus	✓	-	✓	-
Strom in Sleep-Modus	11 μA	2 μA	3000 μA	-
Multitasking	✓	-	-	-
WLAN/Bluetooth	✓	-	-	-

Von vorneherein auszuschließen sind Modelle, die im Sleep-Modus keine RTC-Funktion ermöglichen. Damit sind PSoC CY8CKIT-059 und STM32 M3 nicht geeignet. Bei den verbleibenden Plattformen scheidet der Arduino Nano wegen der sehr hohen Stromaufnahme im Sleep-Modus aus. Die Wahl fällt daher auf den ESP32 der in der Version *FireBeetle ESP32* [4] als Entwicklungsboard verfügbar ist. Die äußerst geringe Stromaufnahme von nur 11 μA [3] im Sleep-Modus liegt in der Verwendung von Linearreglern zur Spannungsversorgung. Diese haben bei geringer Stromaufnahme eine höhere Effizienz als getaktete Wandler. Zudem bietet der *FireBeetle ESP32* den Vorteil, dass ein Lithium-Akku direkt an das Entwicklungsboard angeschlossen werden kann, wodurch keine weiteren externe Wandlungsverluste entstehen. Der ESP32 wurde speziell für Internet of Things (IoT)-Geräte entwickelt und verfügt über zwei Prozessorkerne, WLAN und Bluetooth. Damit ist gewährleistet, dass in zukünftigen Versionen auch eine drahtlose Synchronisation zwischen Smartphone und Fahrradcomputer implementiert werden kann.

2) *Anzeige*: Flüssigkeitskristallanzeigen (LCD) reagieren bei niedrigen Temperaturen sehr träge und sind bei Dunkelheit nur mit zusätzlicher Beleuchtung ablesbar. Aus diesem Grund wurde dieser Anzeigentyp von vorneherein ausgeschlossen. Es wurde eine Anzeige mit einer aktiven Matrix von organischen Leuchtdioden (OLED) ausgewählt. OLED Anzeigen haben zwar eine gegenüber LCD deutlich höhere Stromaufnahme, können aber auch im Dunkeln gut abgelesen werden. Da die Anzeige

lediglich während der Fahrt aktiv ist und einige Sekunden nach dem Stillstand des Fahrrads automatisch abgeschaltet wird, ist dieser erhöhte Stromverbrauch zu vernachlässigen. Angesteuert wird die Anzeige mit der Open-Source-Bibliothek `ssd1306` [12]. Für den Prototyp wurde eine 1,3 Zoll große Ausführung verwendet. Diese Wahl stellt einen guten Kompromiss zwischen Größe, Stromaufnahme und Kosten dar. Zukünftig wären auch Anzeigen mit 0,96 oder 2,5 Zoll einsetzbar. Die Preise der Anzeigen sowie deren Stromaufnahme werden in Tabelle II verglichen.

Tabelle II: Vergleich von OLED-Anzeigen hinsichtlich Preis und Stromaufnahme

	0.96 Zoll [9]	1,3 Zoll [10]	2.5 Zoll [11]
Preis in €	7	8	18
Stromaufnahme in mA	28	40	94

III. Beschreibung der Hardware

Die Wechselspannung des Nabendynamos wird als Tachosignal und zur Energieversorgung genutzt (vgl. Abbildung 1). Dazu wird die Wechselspannung einerseits ohne Gleichrichtung in den Signalpfad zur Verwendung als Tachogebersignal eingespeist. Andererseits erfolgt im Leistungspfad Gleichrichtung und Spannungsstabilisierung. Durch diese doppelte Nutzung besteht ein Problem bei der Wahl des Bezugspotentials. Es wird daher entweder für den Signalpfad oder den Leistungspfad eine galvanische Trennung benötigt. Wegen der leichteren Realisierbarkeit wird die galvanische Trennung im Signalpfad durchgeführt.

A. Umsetzung der Periodendauermessung in der Hardware

Für die Periodendauermessung wird der ausgewählte Mikrocontroller FireBeetle ESP32 mit seinen integrierten Zählern und Taktgeneratoren verwendet. Es ist zu beachten, dass an die Eingänge des Mikrocontroller nur kleine positive Spannungen angeschlossen werden dürfen. Daher ist eine Schaltung erforderlich, die die Spannung des Nabendynamos auf den zulässigen Pegel der Eingangsspannung begrenzt und aus den Nulldurchgängen saubere, möglichst steile Flanken erzeugt. Dazu sind verschiedene Ansätze möglich.

1) *Optokoppler*: Optokoppler ermöglichen eine galvanische Trennung zwischen Eingang und Ausgang, eine Überlastung des Mikrocontrollereingangs ist damit ausgeschlossen. Es muss allerdings sichergestellt sein, dass bereits bei langsamer Fahrt und damit geringer Spannung des Nabendynamos die Nulldurchgangserkennung für die Periodendauermessung sicher getriggert wird. Andererseits darf bei schneller Fahrt und entsprechend hoher Spannung der Optokoppler nicht überlastet werden. Für die zuverlässige Ansteuerung wäre daher eine Stromquellenschaltung erforderlich, die über einen weiten Spannungsbereich funktioniert. Wegen des zusätzlichen Bauteilaufwands und der Kosten wurde der Einsatz von Optokopplern nicht weiter verfolgt.

2) *Kapazitiv gekoppelte Transistorschaltung*: Die erforderliche galvanische Trennung kann auch durch kapazitive Kopplung realisiert werden. Die Schaltung zur Impulsformung muss in der Stillstandsphase eine Ausgangsspannung von 0 V aufweisen. Die in Abbildung 2 dargestellte Schaltung wird daher mit zwei Transistoren realisiert, die jeweils als Inverter arbeiten und damit am Ausgang ein nicht invertiertes Signal liefern.

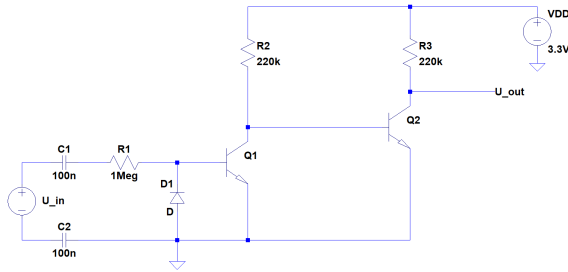


Abbildung 2: Triggerschaltung mit zweifacher Invertierung zur Erzeugung einer Rechteckspannung, wobei im Ruhezustand am Ausgang eine logische 0 anliegt

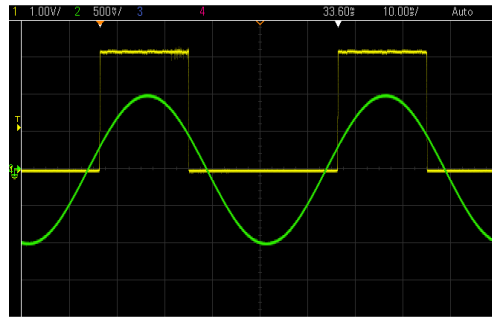


Abbildung 3: Oszilloskop-Darstellung der Eingangsspannung (Sinus) und Ausgangsspannung (Rechteck) der Triggerschaltung zur Nulldurchgangserkennung

Die Spannung des Nabendynamos wird über die Kondensatoren C_1 , C_2 kapazitiv in die Schaltung eingekoppelt. Widerstand R_1 ist so ausgelegt, dass die Schaltung bereits bei sehr kleiner Geschwindigkeit durch die positive Halbwelle zuverlässig getriggert und dennoch bei hoher Geschwindigkeit nicht überlastet wird. Diode D_1 schützt die Schaltung vor der negativen Halbwelle. Die resultierende Grenzfrequenz des durch C_1 , C_2 und R_1 gebildeten Hochpassfilters ist so niedrig, dass die Funktion auch bei sehr langsamer Fahrt gewährleistet ist. Die Schaltung liefert ein sauberes Rechtecksignal mit Flanken bei den jeweiligen Nulldurchgängen der

Dynamospannung, eine Messung mit dem Oszilloskop ist in Abbildung 3 gezeigt. Die Realisierung der Periodendauermessung im Programmcode wird in Unterabschnitt IV-B beschrieben.

B. Leistungsmodul

1) *Schutzbeschaltung und Spannungsanpassung*: Die Stromversorgung des Fahrradcomputers und die Aufladung des Pufferakkus wird im Leistungsmodul (vgl. Abbildung 1) realisiert. Da die Ausgangsspannung des Nabendynamos in Abhängigkeit von Belastung und Fahrgeschwindigkeit schwankt, ist nach der Gleichrichtung eine Schutzschaltung erforderlich. Der ungünstigste Fall tritt dann auf, wenn der Nabendynamo kaum belastet wird und die Geschwindigkeit sehr hoch ist, beispielsweise bei einer Bergabfahrt. Da der verwendete Tiefsetzsteller für einen Eingangsspannungsbereich bis maximal 40 V spezifiziert ist, muss die Spannung sicher auf einen geringeren Wert begrenzt werden. Dazu wird ein spannungsabhängiger Widerstand (Varistor) verwendet, der ab 35 V deutlich niederohmiger wird. Dadurch erhöht sich die Belastung des Nabendynamos und die Spannung wird begrenzt. Bei Einsatz des Varistor ist jedoch zu beachten, dass die an ihm anfallende Leistung in Wärme umgesetzt wird. Bei längerer Dauer einer Bergabfahrt kann daher der Varistor überlastet werden. Aus diesem Grund wird ein zusätzlicher Bimetallschalter verwendet, der thermisch mit dem Varistor gekoppelt ist. Steigt die Temperatur am Varistor über die Schalttemperatur des Bimetallschalters, so öffnet dieser den Stromkreis und der Leistungspfad ist geschützt.

Zur Anpassung der variablen Eingangsspannung dient ein Tiefsetzstellers (TSS) (vgl. Abbildung 1), der als getakteter Spannungswandler realisiert wird [14]. Zur Reduktion des Entwicklungsaufwands und um den Nachbau zu erleichtern wurde ein Modul mit dem Baustein LM2596 verwendet, das im Eingangsspannungsbereich bis 40 V eine konstante Ausgangsspannung von 5 V bereit stellt. Der Wirkungsgrad erreicht dabei Werte von über 80 % [13].

2) Powerbank zur unterbrechungsfreien Stromversorgung und USB-Modul:

Ein Lithium-Akku mit angeschlossenem Powerbank-Modul dient als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV, vgl. Abbildung 1). Nachdem das Fahrrad zum Stillstand gekommen ist, aktiviert die Firmware des Mikrocontrollers nach einigen Sekunden den *Deep-Sleep-Modus* und die OLED-Anzeige wird abgeschaltet. Um die gespeicherten Einstellungen sowie die Fahrtstatistiken nicht zu verlieren, wird der Mikrocontroller weiter von der USV versorgt.

Zum Lademanagement dient der USB-Anschluss, der einen integrierten Linearregler zur Herabsetzung der 5V-USB-Spannung auf die Ladespannung des Lithium Akkus beinhaltet. Zum Laden externer Geräte ist ein Hochsetzsteller integriert, mit dem die Akkuspannung auf 5V-USB-Spannung hochgesetzt wird. Bei drohender Tiefentladung werden externe Verbraucher automatisch abgeschaltet. Bei der Auswahl des Akkus wurde darauf geachtet, dass trotz beschränkter Baugröße genügend Kapazität für lange Standzeiten zur Verfügung steht und damit Einstellungen nicht verloren gehen und die Uhrzeit aktuell bleibt. Mit der gewählten Kapazität von 2000 mAh kann ein gewöhnliches Smartphone zu etwa 70% geladen werden.

C. Wirkungsgrad

Die möglichen Leistungsflüsse sind in Abbildung 4 dargestellt. Daraus ergeben sich je nach Nutzungsszenario unterschiedliche Wirkungsgrade.

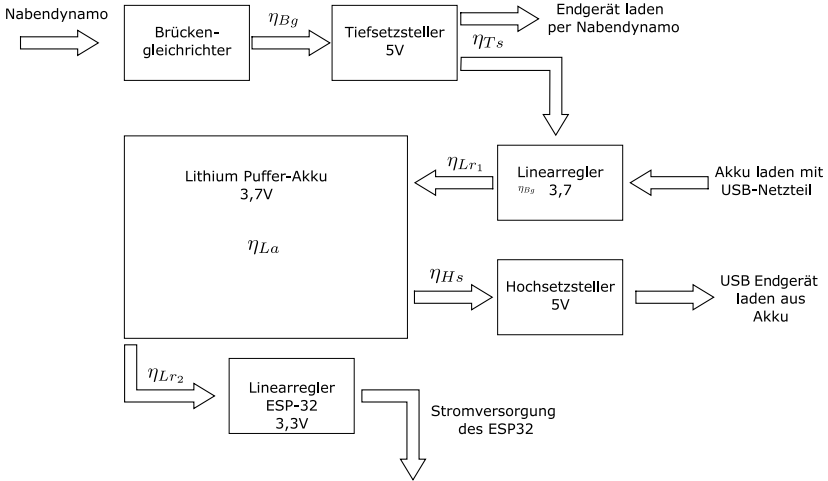


Abbildung 4: Blockschaltbild zur Wirkungsgradberechnung

Die folgenden Szenarien mit den zugehörigen Wirkungsgraden werden betrachtet:

- Endgerät wird direkt vom Nabendynamo geladen. Wirkungsgrad von Nabendynamo zu Endgerät η_{NE}

$$\eta_{NE} = \eta_{Bg} \cdot \eta_{Ts} \quad (1)$$

- Endgerät wird von Akku geladen, welcher zuvor vom Nabendynamo geladen wurde. Wirkungsgrad von Nabendynamo über Akku zum Endgerät η_{NAE}

$$\eta_{NAE} = \eta_{Bg} \cdot \eta_{Ts} \cdot \eta_{Lr1} \cdot \eta_{La} \cdot \eta_{Hs} \quad (2)$$

- Endgerät wird von Akku geladen, welcher zuvor von externem USB-Ladegerät geladen wurde. Wirkungsgrad von Ladegerät über Akku zu Endgerät η_{LAE}

$$\eta_{LAE} = \eta_{Lr1} \cdot \eta_{La} \cdot \eta_{Hs} \quad (3)$$

Die einzelnen Wirkungsgrade hängen vom Arbeitspunkt der jeweiligen Komponente ab, werden aber zur Vereinfachung hier als konstant angenähert und mit typischen Werten aus den Datenblättern angesetzt. Bei den verwendeten Linearreglern und dem Brückengleichrichter kann der Wirkungsgrad auch über die Spannungsabfälle ermittelt werden. Zur Berechnung wurden die folgenden Werte angenommen:

$$\begin{aligned}
\eta_{Bg} &= \frac{10-1,4}{10} = 0,86 & \eta_{La} &= 0,9 \\
\eta_{Ts} &= 0,8 & [13] \quad \eta_{Hs} &= 0,88 & [15] \\
\eta_{Lr1} &= \frac{3,7}{5} = 0,74 & \eta_{Lr2} &= \frac{3,3}{3,7} = 0,89
\end{aligned}$$

Es ergeben sich daraus die resultierenden Wirkungsgrade:

$$\eta_{NE} = 0,69 \quad \eta_{NAE} = 0,40 \quad \eta_{LAE} = 0,59$$

Es ist deutlich zu erkennen, dass der direkte Leistungsfluss vom Nabendynamo zum Endgerät mit dem Wirkungsgrad $\eta_{NE} = 0,69$ am effizientesten ist. Wird das Endgerät im Stillstand durch den Lithium-Akku betrieben der vorher durch den Nabendynamo aufgeladenen wurde, dann ist der Wirkungsgrad mit $\eta_{NAE} = 0,40$ deutlich geringer. Das Aufladen durch ein externes USB-Ladegerät sollte die Ausnahme sein und liegt mit der Effizienz von $\eta_{LAE} = 0,59$ zwischen den beiden am häufigsten anzutreffenden Szenarien.

IV. Mikrocontroller-Firmware

Zur Programmierung des Mikrocontrollers wird eine Entwicklungsumgebung (IDE) von Espressif Systems verwendet [1]. Eine ausführliche Anleitung zum Umgang mit der IDE findet sich unter [16]. Alle Funktionen des Fahrradcomputers werden in der Firmware des Mikrocontrollers implementiert. Dabei werden Menüführung und Geschwindigkeitsmessung in jeweils eigenen Prozessen ausgeführt, die auf unterschiedlichen Prozessorkernen unter Verwendung des Echtzeitbetriebssystems FreeRTOS laufen.

A. Menüführung

Für die Parametrierung und zur Umschaltung der Anzeige weist der Fahrradcomputer eine benutzerfreundliche Menüführung auf, die durch die zur OLED-Anzeige gehörige Bibliothek `ssd1306` unterstützt wird. Zur Navigation werden drei Tasten verwendet, die übereinander angeordnet sind. Mit der oberen Taste (BT1) wird der Menücursor nach oben verschoben, mit der unteren Taste (BT3) entsprechend nach unten. Um den jeweiligen Menüpunkt auszuwählen muss der mittlere Taster (BT2) gedrückt werden. Beispielhaft für das Hauptmenü ist der Zustandsautomat der Menüführung in Abbildung 5 dargestellt.

Im Hauptmenü kann durch langes Drücken des mittleren Tasters der Mikrocontroller in den Sleep-Modus versetzt werden. Durch Drücken des oberen Tasters wird der Mikrocontroller wieder aktiviert, ebenso wenn beim Losfahren wieder Triggerereignisse von der Nulldurchgangserkennung eintreffen.

In dem Untermenü Einstellungen kann der Fahrradcomputer individuell auf das jeweilige Fahrrad angepasst werden, wobei die Parameter Polpaarzahl, Radumfang und Uhrzeit eingegeben werden können.

B. Geschwindigkeitsmessung

Der Zusammenhang zwischen Drehzahl des Nabendynamos und Frequenz der erzeugten Wechselspannung hängt von der Zahl der magnetischen Polpaare (Polpaarzahl) ab. Zur Umrechnung von Drehzahl in Geschwindigkeit muss der Abrollumfang

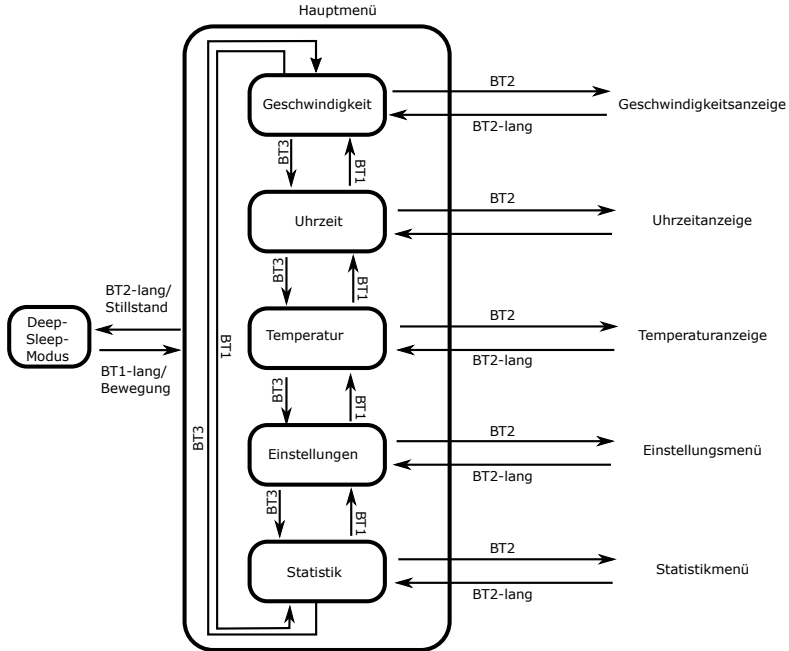


Abbildung 5: Zustandsautomat für das Hauptmenü

U des Laufrads bekannt sein. Da insbesondere bei langsamer Fahrt die für Nabendynamos typischen Frequenzen recht klein sind, ist die direkte Frequenzmessung zu ungenau. Es wird daher nicht die Frequenz f sondern die Periodendauer $T = \frac{1}{f}$ gemessen. Die Berechnung der Geschwindigkeit v erfolgt gemäß Gleichung 4.

$$v = \frac{U}{p \cdot T} \quad (4)$$

Bei extrem schneller Fahrt und sehr kleinen Laufrädern liegt die kürzeste auftretende Periodendauer im einstelligen Millisekundenbereich.

Die Funktion der Periodendauermessung läuft in einem eigenen Prozess, der parallel zum restlichen Programmcode ausgeführt wird. Die eigentliche Messung der Periodendauer erfolgt mit Hilfe eines Hardware Timers. Nach Umrechnung der Periodendauer in die Geschwindigkeit wird der Wert an den Prozess zur Anzeige weitergereicht. Wird die Periodendauermessung länger als eine Sekunde nicht getriggert, muss vom Stillstand des Fahrrads ausgegangen werden und die Anzeige wird auf Null gesetzt. Bei noch längerem Ausbleiben von Triggerimpulsen wird der Mikrocontroller in den Deep-Sleep-Modus versetzt.

C. Energiesparmodus (Deep-Sleep-Mode)

Damit der Fahrradcomputer eine möglichst lange Betriebszeit hat, ist die Implementierung eines Energiesparmodus notwendig, der als Deep-Sleep-Modus bezeichnet wird. Beim Aktivieren des Deep-Sleep-Modus wird die OLED-Anzeige ausgeschaltet. Zur weiteren Reduktion der Stromaufnahme ist die externe Beschaltung zur Nulldurchgangserkennung und Temperaturmessung sehr hochohmig ausgelegt. Während des Deep-Sleep-Modus sind auch Teile des RAM-Speichers abgeschaltet. Daher müssen Einstellungen und Statistikwerte in einem speziellen, weiterhin mit Strom versorgten Teil des RAMs abgelegt werden.

Im Deep-Sleep-Modus beträgt die Stromaufnahme der gesamten Schaltung ca. $110 \mu\text{A}$. Damit kann theoretisch eine Stillstandszeit von zwei Jahren überbrückt werden.

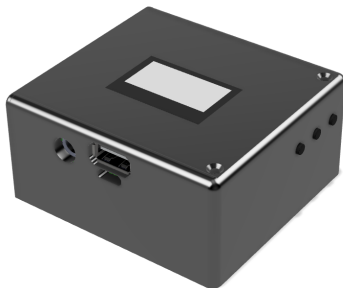
D. Statistik

Wie auch bei konventionellen Fahrradtachometern werden die Werte Maximalgeschwindigkeit, Durchschnittsgeschwindigkeit, Fahrtstrecke, Fahrzeit und gesamte Betriebszeit ermittelt, abgespeichert und können im Statistik-Untermenü aberufen werden.

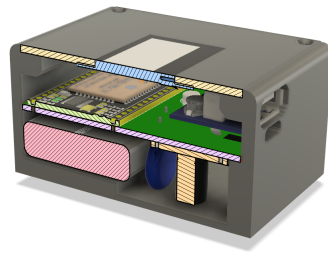
V. Praktische Umsetzung

A. Gehäuse

Für die Nutzung am Fahrrad ist ein Gehäuse erforderlich, das sich leicht an Lenker oder Vorbau anbringen lässt. Für kleine Stückzahlen bietet sich die Herstellung des Gehäuses im Fused Deposition Modeling-Verfahren (FDM) an, wodurch auch sehr geringe Stückzahlen wirtschaftlich gefertigt werden können. In Abbildung 6a und Abbildung 6b ist das 3D-Model des Gehäuses ohne Befestigungseinheit gezeigt.



(a) 3D-Model in Außenansicht



(b) Schnittdarstellung

Abbildung 6: Verschiedene Ansichten des Gehäuses

Für eine sichere und platzsparende Halterung wird ein Haltearm konstruiert, der in Abbildung 7 dargestellt ist. Die Schraubverbindung zwischen Fahrradcomputer und Haltearm dient gleichzeitig als Drehachse, so dass die Neigung der Anzeige eingestellt werden kann.



Abbildung 7: Gehäuse mit der zugehörigen Lenkerhalterung als 3D-Model aus verschiedenen Perspektiven

VI. Evaluation

Im Verlauf der Schaltungs- und Firmwareentwicklung wurde die Spannung des Nabendynamos zunächst mit einem Frequenzgenerator simuliert und die korrekte Umsetzung von Frequenz in Fahrgeschwindigkeit überprüft. Für realistischere Verhältnisse wurde im weiteren Verlauf ein motorisch angetriebener Nabendynamo verwendet. Abschließend wurde das realisierte Funktionsmuster auch im realen Fahrbetrieb am Fahrrad auf einwandfreie Funktion getestet.

Die reinen Materialkosten für alle elektronischen Bauteile inklusive Platine belaufen sich bei einer Einzelanfertigung auf ca. 50 €. Bei höheren Stückzahlen ist mit einer Halbierung der Kosten zu rechnen. Damit ist der hier vorgestellte Fahrradcomputer konkurrenzfähig mit kommerziell erhältlichen Fahrradtachometern und bietet dabei noch weitere nützliche Funktionen:

- Wegfall des Gebermagneten am Vorderrad
- unterbrechungsfreie Stromversorgung externer Geräte
- Ablesbarkeit der Anzeige bei Dunkelheit

VII. Zusammenfassung und Ausblick

Der Fokus der vorgestellten Entwicklung lag auf einer modularen Bauweise damit ein Nachbau möglichst einfach ist. Bauform und Baugröße wurden so gestaltet, dass

der Fahrradcomputer leicht am Lenker angebracht und zum Schutz vor Diebstahl auch ebenso leicht wieder abgenommen werden kann. Zudem ist es möglich den integrierten Lithium-Akku mit einem handelsüblichen USB-Ladegerät aufzuladen. Wird am Fahrrad ein Smartphone z. B. zur Navigation verwendet, dann kann dessen Energieversorgung während der Fahrt überwiegend durch die aus dem Nabendynamo gespeiste Powerbank-Funktion gewährleistet werden.

Das Gehäuse des Fahrradcomputers wurde in der aktuellen Version im FDM-Verfahren erstellt, wodurch keine absolute Wetterfestigkeit gegeben ist. Die Auswahl von am Markt verfügbaren Gehäusen mit Spritzwasserschutz in der erforderlichen Form und Größe ist leider sehr eingeschränkt. Daher erscheint bei einer möglichen Serienfertigung die Realisierung des Gehäuses als Sonderanfertigung sinnvoll.

Da der Fahrradcomputer mit einem leistungsstarken Mikrocontroller ausgestattet ist, lassen sich leicht weitere Funktionen ohne nennenswerte Veränderungen am Hardwarekonzept implementieren. Der ESP-32 verfügt sowohl über eine WLAN- als auch eine Bluetooth-Schnittstelle, wodurch die Anbindung eines Smartphones mit Hilfe einer App vorstellbar ist. Dadurch könnten erweiterte Funktionen implementiert werden, wie z. B. die Speicherung der Historie zurückliegender Fahrten.

Literatur

- [1] <https://dl.espressif.com/dl/esp-idf/>
- [2] <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/000500507DS01/datenblatt-500507-tdk-s14k25-scheiben-varistor-39-v-1-st.pdf>
- [3] <https://diyiOT.com/reduce-the-esp32-power-consumption/>
- [4] https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/DFR0478_Web.pdf
- [5] https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-CY8CKIT-059_PSoC_5LP_Prototyping_Kit_Guide-UserManual-v01_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7d0d8da4017d0ef981770f63
- [6] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>
- [7] <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00237391.pdf>
- [8] https://cdn.shopify.com/s/files/1/1509/1638/files/HD44780_1602_Blaues_LCD_Display_mit_Serielle_Schnittstelle_I2C_Bundle_Datenblatt_AZ-Delivery_Vertriebs_GmbH.pdf?v=1591601507
- [9] https://cdn.shopify.com/s/files/1/1509/1638/files/O_96_Zoll_Display_Datenblatt_AZ-Delivery_Vertriebs_GmbH_241c4223-c03f-4530-a8c0-f9ef2575872f.pdf?v=1622442722
- [10] https://cdn.shopify.com/s/files/1/1509/1638/files/1_3_Zoll_Display_Datenblatt_AZ-Delivery_Vertriebs_GmbH_rev.pdf?v=1606164520
- [11] <https://drive.google.com/file/d/13Im5G-Qq5yMSgdjmgW6BAxApm9EsB6n/view>
- [12] <https://github.com/lexus2k/ssd1306>
- [13] https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf?ts=1644899540773&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.co.za%252F
- [14] U. Tietze, C. Schenk, E. Gamm, Halbleiter-Schaltungstechnik, Springer, 2016,
- [15] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1140419/ASIC/TP5400.html>
- [16] <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/get-started/index.html>

E-Bikes als Potenzial der Verkehrsplanung

Jan Riel

*Institut für Verkehr und Infrastruktur
Hochschule Karlsruhe
Karlsruhe, Deutschland
jan.riel@h-ka.de*

Oliver Hochlehner

*Institut für Verkehr und Infrastruktur
Hochschule Karlsruhe
Karlsruhe, Deutschland
oliver.hochlehner@h-ka.de*

Zusammenfassung

Die Verlagerung von Kfz-Fahrten auf den Radverkehr ist eines DER Ziele vieler Kommunen. Während in den Städten solche Verlagerungen je nach politischem Willen mehr oder weniger erfolgreich gelingen, steht der ländliche vor größeren Herausforderungen. Dies rührt vor allem daher, dass Quellen und Ziele weiter auseinander liegen und daher schon allein aufgrund der großen Entfernungen Fuß- und Radverkehr als Verkehrsmittel ausscheiden. Zusammen mit einem dünnen ÖPNV-Angebot führt dies zu einer starken Dominanz des Kfz-Verkehrs im ländlichen Raum. E-Bikes dagegen dringen in Entfernungsbereiche vor, die bisher dem Kfz-Verkehr vorbehalten waren und haben daher das Potenzial, diesen Trend zu brechen. In der Gemeinde Baiersbrunn im Schwarzwald wurde die Aktion 'Tausche Autoschlüssel gegen E-Bike' wissenschaftlich begleitet und ein enormes Potenzial von E-Bikes für eine Verkehrswende gezeigt. Dieses gilt es in den nächsten Jahren effizient zu nutzen.

Index Terms

Verkehrsplanung, E-Bikes, Pedelecs, Verkehrswende

I. E-Bikes - und jetzt?

Bis vor einigen Jahren waren Fahrräder mit elektrisch unterstütztem Antrieb (Pedelecs) noch ein insbesondere bei Senior:innen beliebtes Nischenprodukt. Mit fortgeschrittener Technik und neuen, auf verschiedene Einsatzzwecke hin ausgerichteten Modellen, sind E-Bikes heute 'in'. Der Begriff E-Bike hat sich dabei im Sprachgebrauch sowohl für Pedelecs, als auch für Elektrofahrräder etabliert, die ohne Tretbewegung bzw. rein elektrisch fahren können [5].

Viele Nutzer:innen sind begeistert von Komfort und Geschwindigkeit der neuen Rad-Generation, was sich auch in den Verkaufszahlen niederschlägt: So wurden in den Jahren 2020 und 2021 laut dem Zweirad-Industrie-Verband ZIV ca. 4 Mio. E-Bikes verkauft – so viele wie noch nie zuvor. Schätzungen zufolge sind derzeit 8,5 Mio. E-Bikes auf deutschen Straßen unterwegs [2] und stellen damit ca. 10 % der Gesamtheit aller Fahrräder.

Dass sich dieser Trend eher noch verstärkt, scheint absehbar:

- Mit E-Bikes können weitere Strecken zurückgelegt werden, für die bislang nur der Pkw infrage kam. Zudem verlieren Hindernisse wie eine bewegte Topografie oder Gegenwind ihren Schrecken.

- Ein geringer Energieverbrauch und niedriger CO₂-Ausstoß gegenüber einem Pkw entsprechen dem Nachhaltigkeitsgedanken.
- E-Bikes werden häufiger genutzt als herkömmliche Fahrräder, was sich positiv auf die Gesundheit der Nutzerinnen und Nutzer auswirkt [5].
- Der durchschnittliche Neupreis eines E-Bikes lag im Jahr 2020 bei fast 3.000 €. Damit liegen E-Bikes in Anschaffung und Unterhalt zwar über einem 'normalen' Fahrrad, aber deutlich unter einem Pkw [1].

Aber welches Potenzial haben E-Bikes aus verkehrsplanerischer Sicht? Können Sie einen Beitrag zur Verkehrswende leisten oder sind sie nur ein weiteres Gerät für die Freizeitnutzung? Diese Frage konnte in einem Praxistest in der Gemeinde Baiersbronn im Schwarzwald ein Stück weit nachgegangen werden.

II. Reallabor in Baiersbronn

Im Rahmen der Aktion 'Tausche Autoschlüssel gegen E-Bike' hatten 120 Einwohnerinnen und Einwohner aus Baiersbronn die Gelegenheit, kostenlos für zehn Tage ein E-Bike zu testen. Im Gegenzug sollten sie das Auto in dieser Zeit möglichst nicht nutzen. Der Test wurde vom Institut für Verkehr und Infrastruktur (IVI) der Hochschule Karlsruhe wissenschaftlich begleitet.

In Baiersbronn, das wenige Kilometer nördlich von Freudenstadt liegt, leben etwa 15.000 Menschen. Die Gegend ist topografisch bewegt und ein beliebtes Ziel für Outdoor-Touristen sowie für Besucherinnen und Besucher der bekannten gehobenen Gastronomie.

Baiersbronn leidet aber auch unter viel Verkehr, der ca. zur Hälfte von den Bewohnenden selbst verursacht wird [3]. Im Rahmen der Aktion 'Tausche Autoschlüssel gegen E-Bike' sollte mit Hilfe der Begleituntersuchung herausgefunden werden, ob und wie viel Kfz-Verkehr sich im Alltag auf das E-Bike verlagern lässt.

120 Personen konnten von Mai bis August 2021 eines von verschiedenen aktuellen E-Bike-Modellen für zehn Tage kostenlos nutzen. Gleichzeitig sollten sie so wenige Wege wie möglich mit dem Pkw zurücklegen. Um einen Vergleich zwischen der 'normalen' Mobilität und der Testphase zu ermöglichen, wurde vor und während der Testphase eine Mobilitätsbefragung durchgeführt. Dazu zeichneten die Teilnehmenden jeweils über zwei Tage jeden ihrer Wege in einem Wegetagebuch auf (Wegezzweck, genutztes Verkehrsmittel, Start und Ziel, Distanz in Kilometer und Dauer in Minuten). Vor der Testphase gaben sie zudem eine Einschätzung ab, für welche Wege und Distanzen sie das E-Bike nutzen wollten.

Die Aktion 'Tausche Autoschlüssel gegen E-Bike' wurde von der Baiersbronn Touristik initiiert und von den Fahrradherstellern Scott und Bergamont, einem örtlichen Fahrradhändler, Bosch ebike Systems und dem Institut für Verkehr und Infrastruktur der Hochschule Karlsruhe unterstützt.

III. E-Bikes wurden für die meisten Wege genutzt

Die Testpersonen waren während der Testphase genauso mobil wie sonst auch. Sie legten ähnlich viele Wege am Tag zurück, wie zuvor – mit dem Unterschied,

dass nun für die Mehrheit der Wege das E-Bike genutzt wurde: Vor der Testphase legten die Teilnehmenden 72 % ihrer Wege mit dem Pkw zurück. Während des Tests dagegen dominierte das E-Bike mit über 67 % am Modal Split. Der Anteil der mit dem Pkw zurückgelegten Wege sank dagegen auf 18 % (siehe Abb. 1).

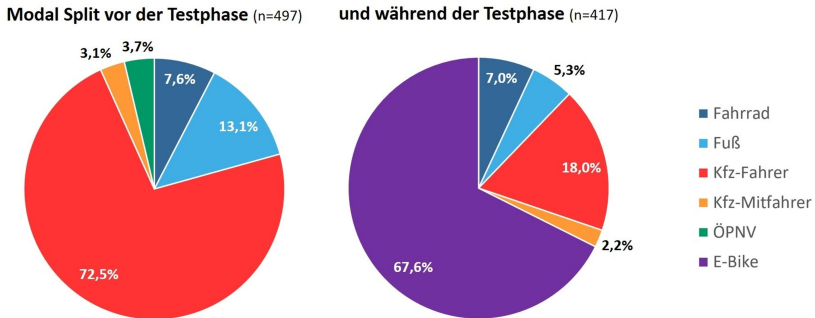


Abbildung 1. Modal Split vor und während der Testphase

Wege ab 5 km werden normalerweise vermehrt mit dem Pkw oder dem öffentlichen Nahverkehr zurückgelegt [4]. Während der Testphase wurden in Baiersbronn viele Wege mit Entfernungen von weit über 5 km mit dem E-Bike zurückgelegt (siehe Abb. 2).

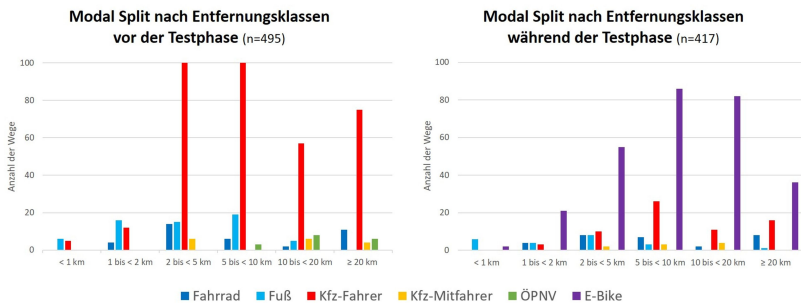


Abbildung 2. Modal Split nach Entfernungsklassen

IV. Ergebnisse

Vor der Testphase waren 73 % der mit dem Pkw zurückgelegten Wege nicht länger als 10 km und 83 % nicht länger als 20 km. Solche Entfernungen sind für ein E-Bike kein Problem, und die Ergebnisse des Tests zeigen, dass Pkw-Fahrten dieser Länge auch im Alltag durch E-Bike Fahrten ersetzt werden können. Dies spiegelte

sich auch in der Verkehrsleistung insgesamt wider: Vor der Testphase legten die Testerinnen und Tester 4.150 km mit dem Pkw zurück. Während der Testphase waren sie mit 4.030 km fast genauso mobil – dies aber zu 72 % (2.870 km) mit dem E-Bike.

Zudem zeigte sich noch ein weiterer Effekt: Die vor der Testphase geschätzten Wegelängen für die zukünftigen E-Bike-Fahrten lagen deutlich (teils mehr als die Hälfte) unter den in der Testphase tatsächlich zurückgelegten Wegelängen. Die Ergebnisse verdeutlichen somit, dass das Testen mit E-Bikes Sinn macht, da Entfernungen oftmals nur vom herkömmlichen Fahrrad bekannt sind und als zu weit eingeschätzt werden.

Der Erfolg der Aktion 'Tausche Autoschlüssel gegen E-Bike' lässt sich auch daran ablesen, dass 86 % der Tester:innen sich vorstellen können, infolge des Tests ein eigenes E-Bike anzuschaffen und im Alltag zu nutzen.

Einige Einschränkungen sollen vollständigkeithalber nicht unerwähnt bleiben: Die Probandinnen und Probanden hatten eine gewisse Affinität zum Thema E-Bike und entschlossen sich aktiv, an der Aktion teilzunehmen. Sie wurden zudem explizit darum gebeten, möglichst wenig Auto zu fahren. So konnte die Anzahl der Kfz-Fahrten um 75 % verringert werden. Bei starkem Niederschlag wurde das E-Bike deutlich weniger genutzt, in der 'nassen' Jahreszeit ist der Verlagerungseffekt vom Auto auf das E-Bike also vermutlich geringer. Außerdem wurden in der Testphase anteilig mehr Freizeitwege zurückgelegt als vorher. Bei keinem anderen Wegezweck lag der Anteil der E-Bike Fahrten mit über 70 % so hoch wie bei den Freizeitfahrten. Das E-Bike dient also sowohl als Verkehrsmittel, um im Alltag von A nach B zu kommen, als auch als Sportgerät.

Erfahrungen haben gezeigt, dass es von großer Bedeutung ist, Menschen den Test mit E-Bike zu ermöglichen, um das Fahrgefühl und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten selbst erleben zu können ('Aha-Effekt'). Bedenken, dass beispielsweise Entfernungen zu alltäglichen Zielen zu weit sind, können so ausgeräumt werden. Ebenso können Fragen wie 'Wie und wie oft muss ich laden?' oder 'Was kann ich alles transportieren?' geklärt werden und daraufhin ein passendes Modell für die jeweiligen Anforderungen gewählt werden.

Darüber hinaus muss weiterhin an den Rahmenbedingungen für den Radverkehr gearbeitet werden, insbesondere an sicheren und komfortablen Radwegen sowie an Lade- und Abstellmöglichkeiten. Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf zum Einsatz und Nutzen von E-Bikes. Deutlich wurde aber bereits durch diese eine Studie: Das E-Bike hat enormes Potenzial für Kommunen. Jetzt gilt es, dieses zu nutzen.

Literatur

- [1] e-bikes-news (2021): So angesagt ist E-Bike-Fahren: Die offiziellen Zahlen für 2020 sind da <https://ebike-news.de/so-angesagt-ist-e-bike-fahren-die-offiziellen-zahlen-fuer-2020-sind-da/196728/> (abgerufen am 11.05.2022)
- [2] e-bikes-news (2022): Ein absolutes Top-Jahr: Die offiziellen Zahlen zum E-Bike Markt sind da <https://ebike-news.de/ein-absolutes-top-jahr-die-offiziellen-zahlen-zum-e-bike-markt-sind-da/203398/> (abgerufen am 11.05.2022)

- [3] Ingenieurbüro Köhler und Leutwein (2015): Verkehrsgutachten Gemeinde Baiersbronn. Karlsruhe
- [4] Nobis, Claudia; Kuhnimhof, Tobias (2018): Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Hg. v. BMVI, infas, DLR, IVT, infas 360. Bonn, Berlin. Online verfügbar unter <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/>
- [5] Umweltbundesamt (2014): E-Rad macht mobil. Potenziale von Pedelecs und deren Umweltwirkung. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau.

Treibhausgasbilanz von Fahrrad, Pedelec und (E-)Pkw im Vergleich

Benedikt Prinzing
Fakultät für Informations-
management und Medien
Hochschule Karlsruhe
prbe1012@h-ka.de

Willy Dirnsteiner
Fakultät für Informations-
management und Medien
Hochschule Karlsruhe
diwi1014@h-ka.de

Zusammenfassung

Die Treibhausgasemissionen des Verkehrs müssen gesenkt werden. Eine Maßnahme, deren Wirksamkeit durch Klimabilanzen nachgewiesen wurde, ist die Elektrifizierung von Pkw. Eine andere Maßnahme ist die Verlagerung auf z.B. den Radverkehr. Umso bemerkenswerter ist es, dass gerade dort die Elektrifizierung boomt – in Gestalt des Pedelecs. Es stellt sich die Frage, wie klimaschonend das Pedelec im Vergleich zu anderen Fahrzeugen ist. Dieser Frage gingen Studierende nach. Ermittelt wurden Emissionen durch Herstellung, Transport und Entsorgung der Fahrzeuge. Der größte Teil der Arbeit entfiel auf Messungen und Berechnungen der Emissionen während der Nutzung. Das Ergebnis – Verkehrsmittelvergleich und Empfehlungen zur Senkung der Emissionen – hat Einschränkungen, doch die Tendenz ist eindeutig.

I. Einleitung

Jahrzehntelange Anstrengungen zur Einsparung der Emissionen von Treibhausgas (THG) aller – im Klimaschutzgesetz [1] definierten – Sektoren gingen an einem dieser Sektoren spurlos vorbei: am Verkehr [25]. Spätestens nach dem Karlsruher Urteil von 2021 [6] ist klar, dass dies geändert werden muss [26]. Begriffe wie *Elektromobilität* oder *Radverkehrsförderung* für eine sogenannte *Verkehrswende* haben Einklang in die öffentliche Debatte gefunden. In ebendieser öffentlichen Debatte wurde die Elektromobilität als Mittel zur THG-Einsparung oft kritisiert: Batterieelektrisch angetriebene Pkw (E-Pkw) seien nicht klimaschonender oder gar klimaschädlicher als solche mit Verbrennungsmotor. Durch das Instrument der Klima- bzw. THG-Bilanz wurde diese Behauptung widerlegt [14]. Allerdings sind E-Pkw immer noch selten. Der erhoffte Boom findet woanders statt: „Während es bei den Elektroautos trotz aller Subventionen und starker politischer Förderung bisher nicht gelang, nennenswerte Marktanteile zu erzielen, erwies sich das Pedelec als der ‚Renner‘ der Elektromobilität“ [18]. Auf den ersten Blick ist dies uneingeschränkt zu begrüßen, weil das Pedelec als elektrifiziertes Fahrrad die Konzepte der Elektromobilität und der Radverkehrsförderung zu vereinen scheint. Allerdings handelt es sich beim Pedelec – im Gegensatz zum E-Pkw – um ein Fahrzeug, welches offensichtlich energieintensiver ist als sein direktes Äquivalent: das herkömmliche Fahrrad. Vor diesem Hintergrund stellen sich folgende Fragen:

- 1) Wie viel THG wird durch das Pedelec emittiert? Dies ist insbesondere für den Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln wichtig. Ebenfalls interessant ist, welche Einflussfaktoren sich auf die THG-Emissionen des Pedelecs auswirken.

- 2) Was ändert das Pedelec am Mobilitätsverhalten? Für die Beurteilung von „innovativen Hoffnungsträgern“ in der Verkehrswende – z.B. Elektrokleinstfahrzeuge, Ridesharing oder Pedelecs – ist es beispielsweise essenziell, ob das Verkehrsmittel tatsächlich Verkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) reduziert oder ob es zur Kannibalisierung mit nachhaltigeren Verkehrsmitteln oder dem Fußverkehr kommt.

Die Antwort der ersten Frage ist Grundlage für die Relevanz der zweiten. Ein studentisches Projekt sollte ihr nachgehen.

II. Methode

THG-Emissionen eines Produkts werden mittels einer Klima- bzw. THG-Bilanz bestimmt, also einer Ökobilanz mit Betrachtung der THG-Emissionen. Andere Umweltfolgen der Verkehrsmittel wurden nicht berücksichtigt. Ökobilanzen werden nach der Norm DIN EN ISO 14044 [8] durchgeführt. Das Vorgehen orientierte sich an dieser Norm, wich aus pragmatischen Gründen jedoch in einigen Punkten ab.

A. Ziel und Untersuchungsrahmen

Ein zentraler Schritt der Ökobilanzierung ist, Ziel und Untersuchungsrahmen festzulegen [8]. Das Ziel war, vergleichbare THG-Emissionswerte für vergleichbare Verkehrsmittel – Fahrrad, Pedelec und (E-)Pkw – auf typischen Arbeitswegen im Stadtverkehr zu bestimmen. Für die (E-)Pkw sollte auf vorhandenes Wissen in Gestalt der Studie von Agora Verkehrswende [2] zurückgegriffen werden. Hinzu sollte die Ermittlung von Potenzialen zur Minderung der THG-Emissionen kommen.

Eine Literaturanalyse ergab, dass der Untersuchungsrahmen bei Ökobilanzen von Verkehrsmitteln variiert. Häufig enthalten sind Herstellung, Wartung und Entsorgung des Fahrzeugs. Denkbar ist, die Bereitstellung der nötigen Infrastruktur oder spezieller Kleidung miteinzubeziehen. Beim Betrieb eines motorisierten Fahrzeugs wandelt dieses Energie um, was direkt oder indirekt zu THG-Emissionen führt. Ein Fahrrad wird (außerdem oder ausschließlich) mit Körperenergie betrieben; die Folge sind Lebensmittelproduktion, Ausatmen von THG und evtl. höhere Hygieneanforderungen. Auch Unfälle mit einem Verkehrsmittel haben THG-Emissionen zur Folge, z.B. durch Krankenhausaufenthalte. Dass der Untersuchungsrahmen auf das Fahrzeug selbst beschränkt wurde, hat verschiedene Gründe:

- Der Untersuchungsrahmen sollte vergleichbar mit dem der Studie zu Pkw sein.
- Es sollten nur Aspekte beachtet werden, welche für Beurteilungen und Empfehlungen wertvoll sind.
- Viele der oben genannten Mechanismen sind kaum operationalisierbar.

Berücksichtigt wurden damit folgende Lebensabschnitte für das fertige Pedelec und seine, während des Fahrzeuglebens benötigten, Ersatzteile:

- Materialgewinnung: Gewinnung der Rohmaterialien, aus welchen die Fahrradteile gefertigt werden.
- Eigentlicher Bau: Zusammenbau und Fertigung der Teile aus den Rohmaterialien.

- Verpackung: Herstellung und Entsorgung/Recycling der Verpackung von Teilen bzw. dem Pedelec auf Transportwegen.
- Transport: Transport des Pedelecs und seiner Ersatzteile zur Kundschaft sowie von Teilen zwischen Fertigungsstätten.
- Betrieb: Nutzung als Verkehrsmittel.
- Recycling: Entsorgung am Lebensende. Durch Recycling können im Wirtschaftssystem an anderer Stelle THG-Emissionen eingespart werden. In der für die Pkw herangezogenen Studie werden bewusst keine Einsparungen durch Recycling angegeben, weshalb der Schritt beim direkten Vergleich entfällt.

Die Berechnung des Fahrzeug-Betriebs unterscheidet sich deutlich von der aller anderen Lebensabschnitte, welche gemeinsam die Fahrzeug-Bereitstellung bilden. Deshalb wurden Betrieb und Bereitstellung, als vergleichbar große Arbeitspakete, zunächst getrennt von zwei Studierenden bearbeitet.

B. Berechnung der Treibhausgasemissionen des Betriebs

Die Berechnung der THG-Emissionen des Betriebs basiert auf einer empirischen Erhebung. Der Energiebedarf der Fahrzeuge wurde auf Fahrten im Karlsruher Stadtgebiet, welche typische Arbeitswege darstellen sollten, gemessen. Als Pedelec wurde ein *SensorBike* [9] des Typs „Specialized Turbo Vado 3.0 Step-Through“ [23] der Hochschule Karlsruhe genutzt. Die Pkw waren zwei Kleinwagen mit Otto-Motor respektive Elektroantrieb. Sie stammten aus der Flotte des Carsharing-Anbieters „Stadtmobil“. Als E-Pkw wurde ein „Renault Zoe“ ausgewählt. Dies war das meist-verkaufte Elektroauto in Deutschland im Jahr 2020 [17] und ist häufig in Innenstädten anzutreffen. Beim Pkw mit Verbrennungsmotor sollte ebenfalls ein Kleinwagen – mit modernster Abgasnorm und Otto-Motor – ausgewählt werden. Die Wahl fiel auf einen „Opel Corsa“, der alle Kriterien erfüllte.

An fünf Tagen wurden Messfahrten mit einer Gesamtlänge von 984 km zurückgelegt (247 km Pedelec und 737 km Pkw). Neben dem Energiebedarf an sich wurden für parallele Arbeiten anderer Studierender Einflussfaktoren auf den Energiebedarf des Pedelecs sowie Reisezeiten verschiedener Verkehrsmodi(-Kombinationen) gemessen. Insgesamt waren sechs Studierende des Masterstudiengangs Verkehrssystemmanagement beteiligt.

Die THG-Emissionen aus dem Energiebedarf setzen sich wie folgt zusammen:

- 1) Unmittelbare THG-Emissionen durch die Energieumwandlung während der Fahrt: *Tank-to-wheel* (TTW).
- 2) THG-Emissionen durch die Vorkette, also die Bereitstellung der dem Fahrzeug zugeführten Energie: *Well-to-tank* (WTT).

Die Messung des Energiebedarfs (TTW) erfolgte nach einem detaillierten Messprotokoll, das auf Basis einer Literaturanalyse sowie durch Rücksprache mit Expert:inn:en der Fahrzeugtechnik entstand. Aspekte, die es zu berücksichtigen galt, waren z.B. der Umgang mit der Kaltstartphase, die Fahrweise sowie Positionierungsfahrten zwischen den Messungen. Grundlage der Bestimmung des Energiebedarfs (TTW) des Pedelecs sowie des E-Pkw war die Messung der Strommenge beim

Laden der Traktionsbatterie (inkl. Ladeverluste). Der Energiebedarf des Otto-Pkw wurde durch eine Kombination der Benzinzufuhr beim Betanken und der Angaben des Bordrechners bestimmt.

Das Ergebnis der Berechnung ist der Energiebedarf pro Fahrzeugkilometer, welcher auf Personenkilometer (Pkm) übertragen wurde. Hierfür wurde der durchschnittliche Besetzungsgrad von Arbeitsfahrten in Deutschland – 1,2 Personen je Pkw [19] – angesetzt. Für das Pedelec wurde ein Besetzungsgrad von 1,0 angenommen. Zwar besteht der persönliche Eindruck, dass der Besetzungsgrad durch die zunehmende Verbreitung von Fahrradanhängern, Lastenrädern etc. höher ausfällt, es war jedoch nicht möglich, fundierte Daten zu erheben.

Die TTW-Emissionen ergeben sich beim benzinbetriebenen Fahrzeug durch die Verbrennung des Treibstoffs, die WTT-Emissionen durch dessen Gewinnung. Die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge verursachen keine TTW-Emissionen (sie sind *lokal emissionsfrei*), die THG-Emissionen der Vorkette werden durch den Strommix bestimmt. Hiervon hängt auch der Primärenergiebedarf ab. Basis für beide Kennziffern ist der, durch die Messfahrten ermittelte, TTW-Energiebedarf. Für die Berechnungen waren Annahmen zu treffen, die in verschiedenen Varianten aufgeschlüsselt wurden. Jede Variante steht dabei für einen möglichen Strommix und verdeutlicht den Einfluss eines Strommix auf den Verkehrsmittelvergleich. Neben dem deutschen Durchschnitts-Strommix des Jahres 2018 wurden abweichende Varianten auf Grundlage der Angebote einiger Stromanbieter berücksichtigt. Diese stehen dabei stellvertretend für einen gewissen Strommix (z.B. hoher Anteil Kohlestrom). Die Tages- und Jahreszeitabhängigkeit der Strommixe blieb unberücksichtigt. Die THG-Intensität der Strommixe wurde mithilfe der Ökobilanz-Datenbank GEMIS [13] berechnet. Dort sind sowohl der Primärenergiebedarf als auch die Emissionen der Vorkette je Erzeugungsart detailliert aufgelistet.

C. Berechnung der Treibhausgasemissionen der Bereitstellung

Die Bereitstellung umfasst die Lebensabschnitte Materialgewinnung, eigentlicher Bau, Verpackung, Transport und Recycling.

Für (E-)Pkw wurden Angaben der Veröffentlichung von Agora Verkehrswende [2] herangezogen. Eine eigene Berechnung wurde nur für das Pedelec durchgeführt; das herkömmliche Fahrrad wurde, vereinfacht, als Pedelec ohne elektrischen Zusatzantrieb abgebildet.

Es handelte sich um einen Bottom-up-Ansatz, d.h. die THG-Emissionen der einzelnen Fertigungsschritte wurden gesammelt und summiert; bei einem Top-down-Ansatz wären die Gesamtemissionen eines Unternehmens auf das einzelne Produkt heruntergebrochen worden [2]. Der Bottom-up-Ansatz „führt zwar zu einem höheren Detaillierungsgrad, aber unter Umständen auch zur Unterschätzung des gesamten Energieverbrauches“ [2] und damit der THG-Emissionen.

Modelliert wurden verschiedene Pedelec-Varianten, um eine THG-Emissions-Spannbreite und Einsparpotenziale zu ermitteln. Die Basis bildete das „Riese & Müller Charger3 Mixte“ [22], über welches vergleichsweise viele Informationen recherchiert werden konnten. Dieses Pedelec ähnelt dem für die Messung des Energiebe-

darfs im Betrieb genutzten Typ. Fiktive Varianten wichen bei verschiedenen Punkten wie Recycling, Ausstattung und Material (Vorhandensein von Komponenten, Material des Rahmens etc.), Lebensdauer (des Fahrzeugs selbst und der Verschleißteile) sowie Lieferketten (Herstellungsländer und Transportmodus) ab.

Als Datenquellen dienten v.a. Ökobilanz-Datenbanken, Fachliteratur, Angaben von Herstellern und Verkäufer:inne:n von Fahrradteilen, Kund:inn:enberichte, Mitteilungen von Fachleuten sowie Routenplan-Software (für Transportwege). Es blieben Datenlücken bei allen Schritten des Lebenszyklus, insbesondere beim eigentlichen Bau und der Verpackung. Zudem war es nicht immer möglich, zwischen Materialgewinnung und eigentlichem Bau zu trennen.

Da die Datenlage zur Lebensfahrleistung von Fahrrädern und Pedelecs schlecht ist, wurde angenommen, dass die Lebensdauer eines Pedelecs von der seiner Traktionsbatterie abhängt. Berechnet wurde sie anhand des Energiebedarfs und der Anzahl möglicher Ladezyklen der Traktionsbatterie. Dabei ist zu beachten, dass die Traktionsbatterie nicht nur mit den Ladevorgängen, sondern auch mit der Zeit altert [16]. Die Lebensfahrleistung des Pedelecs wurde, vereinfachend, auf das herkömmliche Fahrrad übertragen.

Software kann die Ökobilanzierung erleichtern. Ein professionelles Produkt [20] war erst zu einem späten Zeitpunkt nutzbar. Die Berechnungen wurden stattdessen mittels Tabellenkalkulation durchgeführt, was forschungspragmatische Vorteile (z.B. keine Einarbeitung, Nutzung ohne zusätzliche Lizenz) hatte. Dadurch fielen allerdings Analysemöglichkeiten der Ökobilanz-Software weg. Überaus herausfordernd für das studentische Projekt war außerdem die notwendige Einarbeitung in die Theorie der Ökobilanzierung.

III. Ergebnisse

Die Ergebnisse bezüglich Betrieb und Bereitstellung dienen für sich allein dazu, Potenziale zur THG-Emissionsminderung aufzuzeigen. Wichtig für den Verkehrsmittelvergleich ist ihre anschließende Kombination.

A. Treibhausgasemissionen des Betriebs

Zunächst wurde der TTW-Energiebedarf der untersuchten Fahrzeuge, gemäß dem zuvor beschriebenen Messprotokoll, festgestellt (siehe Tabelle I). Die Ergebnisse liegen dabei im Erwartungsbereich der Literatur [4] [11] [15].

Tabelle I

Energiebedarf des Betriebs je Verkehrsmittel im Karlsruher Stadtverkehr [MJ/Pkm]

Verkehrsmittel	Durchschnittlicher Energiebedarf
Fahrrad	0
Pedelec	0,027
E-Pkw	0,43
Otto-Pkw	1,36

Im Anschluss wurden der Primärenergiebedarf sowie die THG-Emissionen für jede Variante, basierend auf dem jeweiligen Strommix, ermittelt. Für den Otto-Pkw wurde ein Festwert angenommen. Ein sinnvoller Vergleich des Primärenergiebedarfs kann nur gezogen werden, wenn die Verkehrsmittel in derselben Variante verglichen werden. Insofern bleibt das Verhältnis zwischen den Elektrofahrzeugen in dieser Betrachtung konstant. Der Primärenergiebedarf und die THG-Emissionen des E-Pkw betragen in jeder Variante das 16-Fache der Pedelec-Werte. Das Verhältnis zum Benzinfahrzeug variiert stark. Während die THG-Emissionen des Otto-Pkw konstant bei 115,61 CO₂-Äquivalenten/Pkm liegen, betragen die THG-Emissionen (Well-to-wheel; WTW) eines Pedelecs, abhängig vom Strommix, zwischen 0,02 g CO₂-Äq/Pkm bei überwiegend Wasserkraft und 3,38 g CO₂-Äq/Pkm bei einem großen Kohleanteil (Faktor 34–5823). Zugleich betragen die THG-Emissionen des E-Pkw zwischen 0,33–53,86 g CO₂-Äq/Pkm (Faktor 2,16–353). Die weiteren untersuchten Varianten befinden sich dazwischen.

Im Allgemeinen sind die Werte der Varianten mit einem großen Anteil an erneuerbaren Energien eher niedriger, während Varianten mit höherem Anteil konventioneller Erzeugungsmethoden eher höhere Werte aufweisen (siehe Abbildung 1).

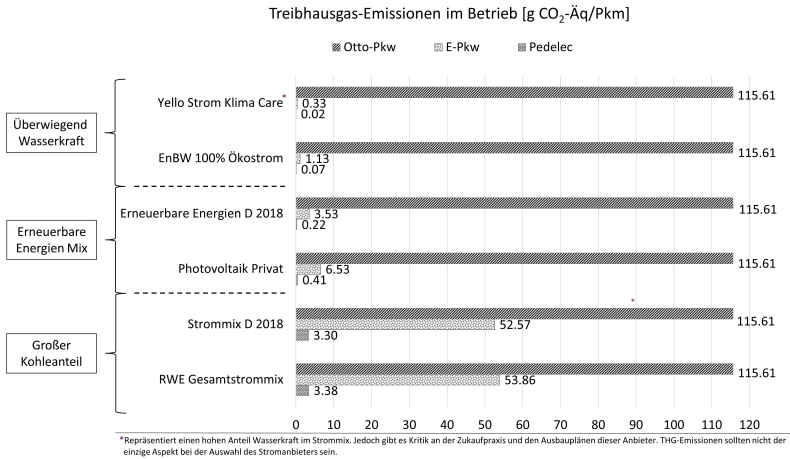


Abbildung 1. Varianten der THG-Emissionen des Betriebs

B. Treibhausgasemissionen der Bereitstellung

Die Berechnung der Lebensfahrleistung erbrachte für die Fahrräder ca. 60.000 km in der Basisvariante. Die Lebensfahrleistung der Pkw beträgt 100.000 km [2]. Für die Fahrräder ergeben sich die in Tabelle II aufgelisteten THG-Emissionen.

Tabelle II
THG-Emissionen durch die Bereitstellung [kg CO₂-Äq]

	Pedelec	Fahrrad
Materialgewinnung	355	277
Eigentlicher Bau	33	10
Verpackung	7	7
Transport	29	28
Recycling ^a	-229	-209
Summe	196	113

^aRecycling der Fahrradteile; bei der Verpackung ist es inbegriffen

Das Ergebnis von 196 kg CO₂-Äq ähnelt dem anderer Veröffentlichungen, welche – bei unterschiedlichen Annahmen und Detaillierungsgraden – ein Spektrum von 134–265 kg CO₂-Äq angeben [3] [5] [7] [10] [12] [16]. Ausgerechnet die Untersuchung eines Herstellers kommt zu einem deutlich höheren Wert: „Riese & Müller“ nennen 899 kg CO₂-Äq für ein Lasten-Pedelec [21]. Die Gründe des Unterschieds, der nicht allein durch die höhere Masse erklärt werden kann, sind unklar. Abbildung 2 zeigt die THG-Emissionen der Bereitstellung verschiedener Pedelec-Varianten, z.T. im Vergleich zum herkömmlichen Fahrrad.

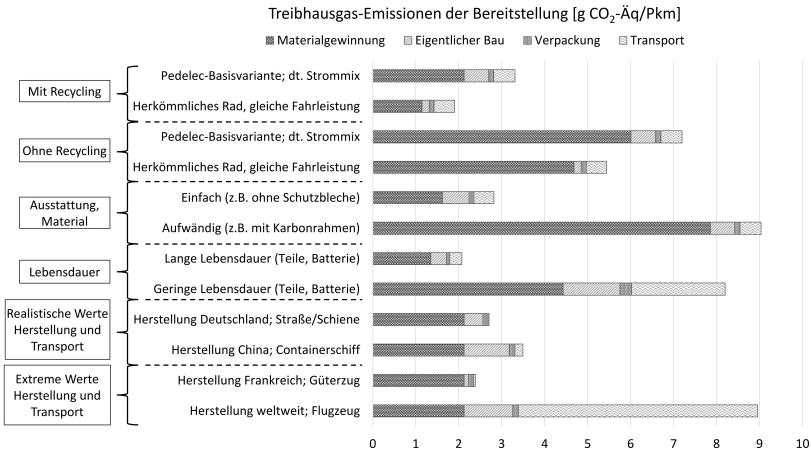


Abbildung 2. Varianten der THG-Emissionen der Bereitstellung

Durch den Variantenvergleich sind Einflüsse auf die THG-Emissionen erkennbar:

- Recycling kann die THG-Emissionen des Pedelecs um etwa die Hälfte senken. Beim Fahrrad, welches mit weniger aufwändig herzustellenden und zu recyceln-den Teilen und Materialien auskommt, ist der Effekt noch stärker.

- Luxuriöse Materialien wie Magnesium oder Karbon führen zu einer drastischen Steigerung der THG-Emissionen; Verzicht auf Schutzbleche und Verkehrstüchtigkeit oder Verwendung eines Bambusrahmens sorgen für geringe Einsparungen.
- Lange Haltbarkeit der Verschleißteile und der Traktionsbatterie halbieren die THG-Emissionen fast; geringe Haltbarkeit steigert sie um den Faktor 2,5.
- Mit großen Traktionsbatterien könnte die Lebensfahrleistung theoretisch auf bis zu 130.000 km steigen, was zu geringeren THG-Emissionen pro Kilometer führen würde. Da die Traktionsbatterien auch mit der Zeit altern, ist dies jedoch unrealistisch und wird hier nicht dargestellt. Bei geringer Fahrleistung ist eine kleine Traktionsbatterie günstig: Eine Kapazität von 300 Wh reicht rechnerisch für eine Lebensfahrleistung von 35.000 km.
- Die Herstellung der Traktionsbatterie ist besonders energieintensiv und sollte deshalb in einem Land mit THG-armen Strommix stattfinden. Ansonsten haben weltweite Lieferketten relativ geringe Auswirkungen – sofern auf die äußerst THG-intensive Luftfracht verzichtet wird.

C. Gesamte Treibhausgasemissionen

Werden die THG-Emissionswerte des Betriebs und der Bereitstellung kombiniert, ergeben sich die in Tabelle III angegebenen Werte. Für die Bereitstellung der Zweiräder wurde die Basisvariante gewählt, für den Betrieb der strombetriebenen Fahrzeuge der deutsche Durchschnitts-Strommix von 2019 (dem letzten Jahr vor der COVID-19-Pandemie) [24]. Beim Pedelec ist der Betrieb für 42% der THG-Emissionen verantwortlich.

Tabelle III

Gesamte THG-Emissionen der Fahrzeuge [g CO₂-Äq/Pkm]

Fahrzeug	THG-Emissionen ohne Recycling	THG-Emissionen mit Recycling
Fahrrad	5,4	1,9
Pedelec	10,3	6,4
E-Pkw	130	^a
Otto-Pkw	173	^a

^aKeine Werte in der Vergleichsstudie angegeben

Der Verkehrsmittelvergleich basiert auf der Verkehrsleistung. Dabei ist zu beachten, dass – für die gleiche Mobilität – aufgrund anderer Routenwahl die Verkehrsleistung der Verkehrsmodi MIV und Radverkehr unterschiedlich sein kann. Bei den Messfahrten in Karlsruhe waren, für die gleichen Verbindungen, die Routen des Radverkehrs um 20% kürzer als die des MIV.

IV. Diskussion

Die Varianten von Betrieb und Bereitstellung zeigen, dass ein Potenzial besteht, die THG-Emissionen des Pedelecs zu senken – oder sie zu steigern. Hersteller

und Nutzer:innen können in vielerlei Hinsicht die THG-Emissionen reduzieren und damit zu den Klimazielen beitragen. Allerdings gilt, dass das Pedelec in jedem Fall ein relativ klimaschonendes Fahrzeug ist. Für den Stadtverkehr wurden bei den Basisvarianten 13-mal weniger THG-Emissionen als beim E-Pkw und 17-mal weniger als beim Otto-Pkw berechnet. Noch klimaschonender ist das herkömmliche Fahrrad, welches – je nach Berechnungsansatz – etwa halb so viele THG-Emissionen verursacht wie ein Pedelec.

Die Erstellung einer THG-Bilanz ist eine komplexe Aufgabe, die großen Aufwand erfordert. Die Ergebnisse hängen stark von der Einarbeitung und dem Verständnis seitens der Projektbeteiligten ab. Durch den Rahmen eines studentischen Projekts resultieren Limitierungen. Dennoch konnten Ergebnisse erzielt werden, die eine Tendenz aufzeigen und an denen zukünftige Forschungsvorhaben ansetzen können. Die Ergebnisse sind ähnlich wie bei anderen Studien. Dass die von einem Hersteller für ein Lasten-Pedelec berechneten Werte um ein Vielfaches höher liegen, ist Grund zur Skepsis – allerdings nicht nur gegenüber diesem Projekt.

Sicher ist: Verkehr mit Otto-Pkw durch Verkehr mit E-Pkw zu ersetzen, ist eine sinnvolle Maßnahme zur Reduzierung der THG-Emissionen. MIV-Wege durch Radverkehrs-Wege zu ersetzen, ist für das Klima allerdings wesentlich sinnvoller – auch dann, wenn das Fahrrad ein Pedelec ist.

Author Contributions

In dem Projekt, welches zu dieser Arbeit führte, bearbeitete Benedikt Prinzing den Betrieb und Willy Dirnsteiner die Bereitstellung der Fahrzeuge. Das Projekt wurde betreut von Prof. Dr. Jochen Eckart (Professur für Verkehrsökologie), unter Mitarbeit von Dr. phil. Martin Temmen (akademischer Mitarbeiter Stiftungsprofessur Radverkehr).

Literatur

- [1] Bundes-Klimaschutzgesetz: KSG, 12.12.2019.
- [2] Agora Verkehrswende. Klimabilanz von Elektroautos: Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial.
- [3] Michel Allekotte, Fabian Bergk, Kirsten Biemann, Carolin Deregowski, Wolfram Knörr, Hans-Jörg Althaus, Daniel Sutter, and Thomas Bergmann. Ökologische Bewertung von Verkehrsarten: Abschlussbericht.
- [4] Patrícia Baptista, André Pina, Gonçalo Duarte, Catarina Rolim, Gonçalo Pereira, Carlos Silva, and Tiago Farias. From on-road trial evaluation of electric and conventional bicycles to comparison with other urban transport modes: Case study in the city of Lisbon, Portugal. *Energy Conversion and Management*, 92:10–18, 2015.
- [5] Benoît Blondel, Chloé Mispelon, and Julian Ferguson. Cycle more often 2 cool down the planet! Quantifying CO2 savings of Cycling.
- [6] Bundesverfassungsgericht. Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich: Pressemitteilung Nr. 31/2021 vom 29. April 2021: 1 BvR 2656/18, 1 BvR 288/20, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20, 29.4.2021.
- [7] Andrea Del Duce. Ökobilanzierung von Fahrrädern und Elektrofahrrädern, 2.9.2011.
- [8] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Umweltmanagement. Ökobilanz. Anforderungen und Anleitungen. Deutsche und Englische Fassung., Oktober 2006.

- [9] Jochen Eckart and Jule Merk. Die sensorbasierte Vermessung des Radverkehrs: Analyse des Radverkehrs mit einem SensorBike mit ubiquitären Sensoren. In Ralf Reussner, Anne Koziolek, and Robert Heinrich, editors, *INFORMATIK 2020, Lecture Notes in Informatics (LNI)*, pages 1137–1149. Bonn, 2021.
- [10] ecoinvent. Ecoinvent 3, 2021.
- [11] Ivan Evtimov, Rosen Ivanov, Gergana Staneva, and Georgi Kadikyanov. A study on electric bicycle energy efficiency. *Transport Problems*, 10(3):131–140, 2015.
- [12] Ingrid Hendriksen, Luuk Engbers, Jeroen Schrijver, René van Gijlswijk, Jesse Weltevreden, and Jaap Wiltling. Elektrisch Fietsen: Marktonderzoek en verkenning toekomstmogelijkheden.
- [13] IINAS. Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS): Version 4.95, 2021.
- [14] Claudia Kämper, Hinrich Helms, and Kirsten Biemann. Wie klimafreundlich sind Elektroautos? Update Bilanz 2020.
- [15] Claudia Kämper, Hinrich Helms, and Julius Jöhrens. Modal Shifting Effects and Climate Impacts through Electric Bicycle Use in Germany. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 6(4):331–345, 2016.
- [16] Martina Lienhop, Dirk Thomas, Alexander Brandies, Claudia Kämper, Julius Jöhrens, and Hinrich Helms. Pedelection: Verlagerungs- und Klimaeffekte durch Pedelec-Nutzung im Individualverkehr: Endbericht.
- [17] Manager Magazin. Tesla und die Verfolger: Die meistverkauften Elektroautos der Welt. *manager magazin*, 09.03.2021.
- [18] Heiner Monheim. *Wege zur Fahrradstadt: Analysen und Konzepte*, volume 1 of *Für eine zukunftsfähige Verkehrswende*. VAS-Verlag für Akademische Schriften, Bad Homburg, 2017.
- [19] Claudia Nobis and Tobias Kuhnimhof. Mobilität in Deutschland – MiD: Ergebnisbericht.
- [20] PRé Sustainability B.V. SimaPro, 2021.
- [21] Riese & Müller GmbH. Wir sind unterwegs: Verantwortungsbericht 01.
- [22] Riese & Müller GmbH. Das Charger3 Mixte. Die Leichtigkeit des Fahrens., 2021.
- [23] Specialized Bicycle Components. Turbo Vado 3.0 Step-Through, 2021.
- [24] UBA. Bilanz 2019: CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter: Deutschland verkauft mehr Strom ins Ausland als es importiert, 2020.
- [25] UBA. Emissionen des Verkehrs, 2020.
- [26] Michael Wendt. Paradigmenwechsel: Mobilitätswende? *stadtverkehr. Fachzeitschrift für den öffentlichen Personen-Nahverkehr auf Schiene und Straße*, 66(9):22–26, 2021.

Sichtfeld rechtsabbiegender Kraftfahrzeuge auf Radfahrende

Willy Dirnsteiner
Fakultät für Informations-
management und Medien
Hochschule Karlsruhe
diwi1014@h-ka.de

Zusammenfassung

Im Verkehr ist der Sehsinn die wichtigste Informationsquelle, weshalb Sichtverhältnisse äußerst wichtig sind. Die Regelwerke zum Straßenentwurf enthalten Sichtfelder für verschiedene Situationen, allerdings nicht für die Sicht rechtsabbiegender Kfz auf parallelen Radverkehr. Die Forschung zeigt, dass dies eine gefährliche Lücke ist. Es gibt Literatur mit Angaben zu Sichtfeldern, allerdings widersprüchliche und nicht immer anwendbare. In einer Bachelor-Thesis wird ein Berechnungsverfahren vorgeschlagen. Es berücksichtigt Fahrzeugklassen, Knotengeometrie, Fahrdynamik, Reaktion und Zeitlücken. Parameter stammen aus der Literatur und Messungen an Knotenpunkten. Das Ergebnis zeigt, dass heutige Regeln und Angaben zu Sichtfeldern oder die sogenannte *geschützte Kreuzung* nicht ausreichend sind.

I. Einleitung

Der Sehsinn ist für Kraftfahrende die bedeutendste Informationsquelle [70]. Sichtfelder gehören zu den wichtigsten Entwurfselementen an Stadtstraßen [44]. Diese werden in Deutschland nach den *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen* [19] entworfen. Darin gibt es Angaben zur Sicht an Querungsstellen, Strecken und Knotenpunkten. Letztere „müssen [...] so übersichtlich sein, dass zumindest alle Wartepflichtigen bei der Annäherung an einen Gefahrenpunkt die bevorrechtigten Verkehrsteilnehmer[:innen] rechtzeitig sehen können“ [19]. Nachzuweisen sind dabei Sichtfelder für querende Gehende [19] [25], einbiegende und kreuzende [19] sowie auf Fußgänger:innen:überwege zufahrende Fahrzeuge [24]. Es gibt allerdings ein weiteres Fahrmanöver, bei dem Fahrzeuge gegenüber anderen Verkehrsströmen untergeordnet sind: Das Abbiegen.

A. Notwendigkeit der (Rechts-)Abbiegesicht

Nach § 9 Abs. 3 Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) [2] sind Abbiegende gegenüber Verkehrsteilnehmenden des Gegen- und Mitverkehrs i.d.R. untergeordnet [1] [78]. Bei schlechter Sicht auf Bevorrechtigte müssen Abbiegende ihre Fahrweise anpassen [78] – ein eigenes Sichtfeld scheint somit theoretisch nicht notwendig.

„Niemand überrollt [beim Abbiegen] absichtlich einen Radfahrer“ [83]. Dennoch sind ein Fünftel aller Radverkehrsunfälle mit Personenschaden Abbiegeunfälle [50]. Verursacht werden sie meist von den Kraftfahrzeugen (Kfz) [50]. Das Verletzungsrisiko für Radfahrende ist dabei hoch [37] [50]. Bekannt sind die schweren Rechtsabbiegeunfälle zwischen Lastkraftwagen (Lkw) und Radfahrenden [8] [38] [50] [67]

[76]. Eine Rolle spielt dabei die – auch bei modernen Spiegeln – schlechte Sicht der Lkw-Fahrenden [62] [75]. Dennoch verursachen Lkw, entsprechend ihrer Anzahl, nicht mehr Rechtsabbiegeunfälle als Personenkraftwagen (Pkw) [36]. Das Unfallgeschehen zeigt, dass Sichthindernisse an Radwegen ein „wesentliches Problem“ [50] sind. Im Sinne der sogenannten *Vision Zero* (Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 1 StVO; Rn. 1 [1]) besteht Bedarf für die Rechtsabbiegesicht.

B. Stand der Regeln, Empfehlungen, Forderungen und Forschung

Laut Alrutz et al. [6] ist der Kenntnisstand hinsichtlich der Verhütung von Rechtsabbiegeunfällen hoch. Dennoch finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben zu Sichtfeldern und anderen Entwurfs-elementen wieder.

Die Erweiterung der Parkverbotszone nach § 12 Abs. 3 Nr. 1 StVO [2] von 5 m auf 8 m soll Rechtsabbiegeunfälle mit Radfahrenden vermeiden [10]. Es existieren zudem Forderungen nach 10–20 m großen Parkverbotszonen [49] [60] [63] [77].

Neben Regeln für die Verkehrsteilnehmenden liegen Empfehlungen für die Planenden vor. Im deutschsprachigen Raum wird meist eine fahrbahnseitige Führung oder die Heranführung des Radwegs an die Fahrbahn 10–30 m vor den Fahrbahnschnittkanten oder den Eckausrundungen empfohlen [4] [5] [6] [11] [17] [26] [44] [61] [84]. Allerdings gibt es auch Einsatzbereiche für weit abgesetzte Furten, z.T. mit Anrampung [17] [26]. Die Radverkehrsinfrastruktur der Niederlande und Dänemarks gilt als besonders sicher [40]; zunehmend werden auch die USA als Vorbild genannt. Deshalb sind Empfehlungen aus diesen Ländern von Interesse. Die dänischen [7] [58] und niederländischen [62] [64] Empfehlungen sind ähnlich wie die deutschen. Amerikanische Quellen [29] [28] [59] [66] empfehlen Sichtfelder von 6–18 m, allerdings bei verschiedenen Furtabsetzungen. Empfehlungen für Nebenstraßenzufahrten oder Zweirichtungsradwege ähneln den europäischen.

Ob weit abgesetzte Furten, zugunsten der direkten Sicht, grundsätzlich besser wären, wird – teils kontrovers – diskutiert [3] [12] [21] [30] [31] [32] [33] [35] [45] [47] [50] [51] [58] [59] [62] [64] [66] [67] [68] [69] [79] [80]. Auch zu Abbiegeradien ist die Literatur nicht einheitlich [19] [33] [50] [51] [59] [61] [62] [66] [67] [68].

Fazit der Literaturanalyse ist, dass es keine adäquaten Sichtfelder für rechtsabbiegende Kfz zu geben scheint. Ein Berechnungsverfahren ist notwendig, welches im Bestand variable und auch künftig variierende Gegebenheiten – wie Abbiegeradius, Absetzung der Furt und Anrampung der Fahrbahn – berücksichtigt.

II. Methode

Das vorgeschlagene Verfahren zur Bemessung des Rechtsabbiegesichtfelds basiert darauf, dass Kraftfahrende die Bevorrechtigten so früh sehen müssen, dass sie auch dann konfliktfrei anhalten können, wenn sie sich dem Konfliktpunkt mit der zulässigen bzw. der durch die Knotengeometrie möglichen Geschwindigkeit nähern. Dies ist im Regelwerk kein Novum [24]. Gängige Sichtfelder orientieren sich entweder an der Sicht anhand des Anhaltewegs (Haltesicht) oder der Sicht anhand einer erforderlichen Zeitlücke in übergeordneten Strömen (z.B. Anfahrsicht) [19]. Die Abbiegesicht erfordert eine Kombination dieser Herangehensweisen: Kraftfahrende

müssen die Radverkehrsströme beobachten können, um nötigenfalls aus der Fahrt heraus anzuhalten. Daraus folgt, dass das Sichtfeld zwei Seitenlängen hat, nämlich an der Bewegungslinie der Kfz und an der Bewegungslinie der Radfahrenden.

Bei der Anfahrtsicht auf Radfahrende gibt es einen Regel- und einen Mindestwert [19]. Diese Praxis wird im Berechnungsverfahren für die Abbiegesicht übernommen. Da Gehende ebenfalls durch Abbiegeunfälle infolge schlechter Sicht gefährdet sind [34] [54], gilt das Verfahren auch für sie.

Für die Berechnung relevante Parameter stammen aus der Literatur und von einer Verkehrsbeobachtung an zwei stark frequentierten Knotenpunkten – mit und ohne Lichtsignalanlage (LSA) – in Karlsruhe. Zum Einsatz kamen dabei Kameras (System „Miovision Scout“) des Instituts für Verkehr und Infrastruktur (IVI).

A. Seitenlänge an der Bewegungslinie der Kraftfahrzeuge

Die Seitenlänge an der Bewegungslinie der Kfz entspricht einer Haltesichtweite, besteht also aus dem Reaktionsweg und dem zum Anhalten und Warten (*Wartebremsen*) benötigten Bremsweg. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es meist ohnehin einen Bremsvorgang gibt, nämlich von der Freiflussgeschwindigkeit auf die Abbiegegeschwindigkeit (*Abbiegebremsen*). Lkw dürfen nur mit Schrittgeschwindigkeit – max. 10 km/h [78] – abbiegen (§ 9 Abs. 6 StVO [2]), Pkw können mit Anrampungen ebenfalls so weit abgebremst werden [19] [48]. Ansonsten wird die Abbiegegeschwindigkeit durch den Abbiegeradius bestimmt. Angaben der Literatur [43] [85] und Messungen im Zuge der Verkehrsbeobachtung lassen auf Seitenreibwerte in einem Spektrum von 0,20–0,45 schließen. Die Verzögerungswerte 1,1–3,0 m/s² – abhängig von Fahrzeugklasse, Bremsvorgang und Variante des Sichtfelds – orientieren sich an der Literatur [13] [14] [27] [41] [55] [71] [72] [74] [81] [82].

Der Abbiegeradius bestimmt – gemeinsam mit der Absetzung der Furt – die Länge des Wegs, welcher vom Kfz während der Kurvenfahrt zurückgelegt wird. Die Lage des tatsächlichen Konfliktpunkts wird durch die Fahrzeugabmessungen beeinflusst [18] [23]. Unterschiedliche Abbiegeradien und -geschwindigkeiten, zulässige Höchstgeschwindigkeiten und Furtabsetzungen führen zu drei möglichen Zeitpunkten, an denen das Wartebremsen beginnen kann:

- 1) Während der Kurvenfahrt.
- 2) Vor der Kurvenfahrt, während des Abbiegebremssens.
- 3) Während des Freiflusses, bevor Abbiegebremsen nötig wäre.

Fall 1 kann für Lkw-Fahrende aufgrund der schlechten indirekten Sicht während der Kurvenfahrt bei sich von hinten nähernden Radfahrenden unmöglich sein [15] [62]. Zweckmäßiger ist in diesem Fall die Sicht unmittelbar vor Kurvenbeginn.

Entsprechend der Fahrzustände ergeben sich verschiedene Fälle für den Reaktionsweg. Reaktions- und Sichtzeiten werden in der Literatur thematisiert [13] [43] [71] [74] [78] [81] [82] [86], teils speziell zu Rechtsabbiegevorgängen [45] [57] [62]. Einerseits entstehen durch Einschätzen der Geschwindigkeit [46] [57] und Schulter- bzw. Spiegelblick besondere Ansprüche, andererseits entfallen während des Abbiegebremssens (Fall 2) bremsbezogene Zeiten. Je nach Fall wird eine Reaktionszeit von 1,1–1,7 s angenommen.

B. Seitenlänge an der Bewegungslinie der Radfahrenden oder Gehenden

Die Seitenlänge an der Bewegungslinie der Radfahrenden oder Gehenden entspricht dem Weg, den diese während der erforderlichen Zeitlücke der Kfz zurücklegen. Die erforderliche Zeitlücke setzt sich aus folgenden Zeiten zusammen:

- 1) Dauer der unbehinderten Fahrt von dem Punkt, an dem spätestens Sicht auf Bevorrechtigte möglich sein muss, bis zum Konfliktpunkt.
- 2) Räumen der Konfliktfläche.
- 3) Post Encroachment Time (PET) zwischen dem Verlassen der Konfliktfläche durch das Kfz und dem Eintreffen der:des Bevorrechtigten.

Punkt 1 ist durch die oben erläuterten Mechanismen abgedeckt, für Punkt 2 kommen die Breite der Furt und die Länge des Kfz [18] [23] hinzu. Bei der PET ist zu beachten, welche Behinderung gebilligt wird [2] [19] [83]. Die entsprechend der Literatur [20] [50] durchgeführte Konfliktanalyse ergab, dass Radfahrende bei einer PET von 1 s nicht unvertretbar behindert werden.

Die Länge des Weges, den Bevorrechtigte während der erforderlichen Zeitlücke zurücklegen, folgt aus deren Geschwindigkeit. Je nach Verkehrsmodus und Längsneigung liegt diese bei 1,5–11,1 m/s [4] [5] [16] [17] [19] [22] [56] [61] [73].

C. Alternatives Verfahren

Das vorgeschlagene Sichtfeld kann nur dann seine Wirkung entfalten, wenn es von den Kraftfahrenden genutzt wird. Der Schulterblick ist Pflicht [78], doch ein Drittel der Kraftfahrenden verabsäumt ihn [50]. Wenn Radfahrende sich von hinten nähern, werden sie, laut einer amerikanischen Studie, weniger beachtet [46].

Vor diesem Hintergrund wurde ein weiteres Verfahren entwickelt, bei dem die:der Kraftfahrende die:den Radfahrende:n durch die Frontscheibe sieht, an ihr:ihm vorbeifährt und ausreichend weit vor ihr:ihm abbiegt. Zu den oben erläuterten Mechanismen kommen Sichtwinkel aus der Frontscheibe nach vorn [19] [42] [67] und Dauer des Sichtkontakts, welche auf 1,1 s festgelegt wird [42] [52] [53] [86], hinzu. Das Verfahren wäre v.a. für unsignalisierte Knotenpunkte interessant, da dort ein freier Fluss beider Ströme häufiger ist und weniger Kraftfahrende den Schulterblick durchführen [50]. Die Sichtfelder können sehr groß werden: Selbst bei Pkw, einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h und einer Geschwindigkeitsdifferenz von 20 km/h sind bis zu 260 m möglich. Dies wäre meist nur durch eine fahrbahnseitige Führung oder vollständigen Verzicht auf Parkstände möglich.

III. Ergebnisse

Wichtigstes Ergebnis eines Berechnungsverfahrens für ein Sichtfeld sind eine Tabelle und eine Anleitungsskizze für die Verwendung in der Planung. Da diese Materialien mehr der Planungspraxis als der wissenschaftlichen Diskussion dienen und die zugrundeliegenden Gleichungen viel Raum einnehmen, sind sie hier nicht enthalten. Ergebnisse des vorgeschlagenen Verfahrens zeigen sich anhand einiger typischer Knotenpunkte. Bei den Beispielen beträgt die Längsneigung in der Bewegungsrichtung der Bevorrechtigten 0% (Radfahr-Geschwindigkeit 30 km/h).

Die Parkverbotszone nach StVO [2] bezieht sich in der Praxis v.a. auf Knotenpunkte ohne LSA mit einem Radweg, welcher nicht an die Fahrbahn herangeführt wird. Auch bei Mindestwerten ergeben sich Parkverbote von ca. 32 m vor und 25 m hinter dem Knotenpunkt (siehe Abbildung 1). Für die Sicht auf Gehende (Straßenseite ohne Radweg) ergibt sich ein Parkverbot von 14 m vor dem Knotenpunkt.

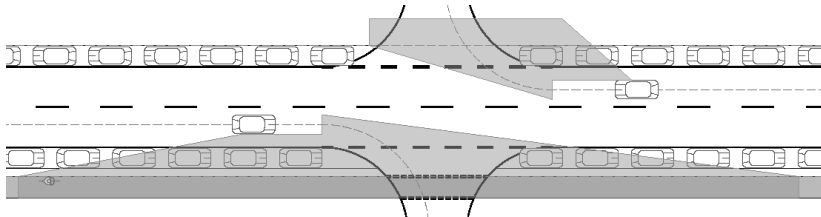


Abbildung 1. Vergleich StVO-konformen Parkens mit berechneten Rechtsabbiegesichtfeldern

Die Musterlösung „Anlage beidseitiger Radwege“ des Landes Baden-Württemberg [65] zeigt einen an die Fahrbahn herangeführten Radweg an einem Knotenpunkt ohne LSA mit engen Abbiegeradien. Bei Verwendung der Regelwerte wird das Parken 55 m vor dem Knotenpunkt unterbrochen und 35 m dahinter weitergeführt. Eine weite Furtabsetzung in Verbindung mit einer Anrampung (Radwegüberfahrt) an einem Knotenpunkt ohne LSA führt bei Mindestwerten dazu, dass abbiegende Kraftfahrende erst nach Kurvenbeginn freie Sicht benötigen. Die geringe Räumgeschwindigkeit führt allerdings auch dazu, dass der Radweg 40 m vor und hinter dem Knotenpunkt einsehbar sein muss.

Die drei Beispiele von Knotenpunkten ohne LSA zeigen große Sichtfelder. Der Flächenbedarf wird dadurch relativiert, dass die Anfansichtfelder für Fahrzeuge aus der Nebenstraße [19] bei Tempo 50 auf der Hauptstraße ähnlich groß sind.

Beschrieben seien Sichtfelder für zwei signalisierte Knotenpunkte mit an die Fahrbahn herangeführtem Radweg. Das Sichtfeld auf rechtsfahrende (von hinten kommende) Radfahrende nutzt Regelwerte, das auf regelwidrig linksfahrende (von vorn kommende) Radfahrende nutzt Mindestwerte. Der einzige Unterschied zwischen den Knotenpunkten ist der Abbiegeradius: Bei einem engen Radius (Hauptbogenradius 8 m) enden die Parkstände 80 m vor den Fahrbahnschnittkanten, da der Radweg – wegen der erforderlichen Sicht nach hinten – früh an die Fahrbahn herangeführt wird. Bei einem weiten Radius (Hauptbogenradius 12 m) ist die Abbiegegeschwindigkeit so hoch, dass einerseits früheres Bremsen nötig ist, andererseits Sicht nach vorn ausreicht, weshalb der freizuhaltende Bereich vor dem Knotenpunkt gleich ist. Lkw-Fahrenden ist Sicht nach hinten an beiden Knotenpunkten letztmalig vor der Kurvenfahrt möglich. Aufgrund der geringen Räumgeschwindigkeit und großen Abmessungen müssten sie Radfahrende registrieren, welche sich ca. 75 m hinter dem Lkw befinden. Wegen der Komplexität des Abbiegevorgangs ist es unwahrscheinlich, dass Lkw-Fahrende derart weit entfernte Personen bemerken würden.

Das letzte Beispiel ist eine sogenannte *geschützte Kreuzung*, deren Abmessungen deutscher Literatur [30] [35] entnommen wurden. Aufgrund der weiten Furtabsetzung legt das Kfz einen relativ langen Teil des Wegs zum Konfliktpunkt während der Kurvenfahrt zurück. Daraus folgt, dass es später bremsen muss, später Sicht nötig ist und eine kleinere Zeitlücke ausreicht. Folglich ist das Sichtfeld nur halb so groß wie bei den oben genannten (eher dem deutschen Standard entsprechenden) LSA-Knotenpunkten. Ein Vorteil der geschützten Kreuzung soll sein, dass vor der Furt wartende Pkw-Fahrende den Radverkehr besser im Blick haben [51] [59] [66]. Bei stehenden Pkw mag dies zutreffen, doch während der Fahrt geraten Radfahrende keineswegs automatisch rechtzeitig in das nach vorn ausgerichtete Blickfeld der Pkw-Fahrenden: Zügig abbiegende Pkw-Fahrende müssen noch vor Beginn der Kurvenfahrt Radfahrende sehen können, um konfliktfrei warten zu können. Ebenfalls zügig fahrende Radfahrende befinden sich zu diesem Zeitpunkt hinter dem Pkw.

IV. Diskussion

Das vorgeschlagene Berechnungsverfahren für das Sichtfeld rechtsabbiegender Kfz bildet einerseits nicht den mathematisch genauen Rechenweg ab, ist andererseits jedoch nicht als grobe Vereinfachung zu bezeichnen. Nicht alle Parameter beziehen sich eigens auf das abgebildete Fahrmanöver; hier könnte empirisch nachgebesert werden. Neben einer Überprüfung des Verfahrens ist eine Erweiterung auf Sichtfelder für linksabbiegender Kfz interessant [39]. In der jetzigen Form führt es zu deutlich größeren Rechtsabbiegesichtfeldern, als bisher verordnet, empfohlen oder gefordert wurde. Aufgrund von Überschneidungen mit Anfahrtsichtfeldern folgen daraus an Knotenpunkten ohne LSA nicht automatisch größere freizuhaltende Bereiche. Das Verfahren zeigt auch, dass Behinderungen schneller Radfahrender durch Lkw kaum zu vermeiden sind.

Für Sichtkontakt sind Sichtfelder notwendig, jedoch nicht hinreichend. Kraftfahrende müssen nicht nur Radfahrende sehen können, sondern es muss ihnen auch bewusst sein, dass sie sich nach diesen umschauchen müssen. Es bleibt dabei: „Besonders wichtig für die Anlage von Radwegen sind gute Sichtverhältnisse zwischen Radfahrer[:inne:]n und [...] abbiegenden Kraftfahrzeugen sowie die eindeutige Erkennbarkeit der Vorrangregelung“ [11]. Auch bei einer weiten Absetzung der Furt müssen sich Kraftfahrende aktiv nach Radfahrenden umschauchen.

Die getrennte Signalisierung [9] [21] kann nicht die einzige infrastrukturelle Antwort auf Rechtsabbiegeunfälle an Radwegen sein, da auch Knotenpunkte und Grundstückszufahrten ohne LSA Gefahrenstellen sein können. So lange im Stadtverkehr für Kraftfahrende ausreichende Sicht nötig ist, so lange muss sie auch gewährleistet werden.

Author Contributions

Die Bachelor-Thesis, welche zu dieser Arbeit führte, wurde betreut von Prof. Dr.-Ing. Christoph Hupfer (Professur für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik) und Prof. Dr. Jochen Eckart (Professur für Verkehrsökologie).

Literatur

- [1] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung: VwV-StVO.
- [2] Straßenverkehrs-Ordnung: StVO.
- [3] ADFC. Kritik an UDV-Untersuchungen zu geschützten Kreuzungen: ADFC-Stellungnahme.
- [4] Dankmar Alrutz, Wolfgang Bohle, Reinhold Maier, Markus Enke, Maria Pohle, Frank Zimmermann, Jörg Ortlepp, and Marcel Schreiber. *Einfluss von Radverkehrsaufkommen und Radverkehrsinfrastruktur auf das Unfallgeschehen*, volume 29 of *Forschungsbericht*. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Unfallforschung der Versicherer, Berlin, Januar 2015.
- [5] Dankmar Alrutz, Wolfgang Bohle, Holger Müller, Heike Prahlow, Ulrike Hacke, and Günter Lohmann. *Unfallrisiko und Regelakzeptanz von Fahrradfahrern: Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.262: Unfallrisiko, Konfliktpotenzial und Akzeptanz der Verkehrsregelungen von Fahrradfahrern*, volume 184 of *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik*. Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, Juni 2009.
- [6] Dankmar Alrutz, Stefanie Grüneberg, Juliane Krause, and Elke Wilhaus. Sicher geradeaus! Leitfaden zur Sicherung des Radverkehrs vor abbiegenden Kfz.
- [7] Troels Andersen, Frits Bredal, Marianne Weinrich, Niels Jensen, Morten Riisgaard Dam, and Malene Kofod Nielsen. *Collection of Cycle Concepts 2012*. Cycling Embassy of Denmark, Copenhagen (DK), 2012.
- [8] BAST. „Tote-Winkel“-Unfälle – Unfallgeschehen und Maßnahmen, 2017.
- [9] BMVI. Nationaler Radverkehrsplan 3.0: Fahrradland Deutschland 2030.
- [10] BMVI. Wir machen den Straßenverkehr noch sicherer, klimafreundlicher und gerechter: StVO-Novelle, 2020.
- [11] Wolfgang Bohle. Radverkehr. In Dirk Vallée, Barbara Engel, and Walter Vogt, editors, *Stadtverkehrsplanung Band 3*, pages 377–406. Springer-Verlag GmbH Deutschland, Berlin, 2021.
- [12] Siegfried Brockmann. „Geschützte Kreuzung“ – Sinn oder Unsinn?, 2020.
- [13] Fridolin Bühlmann, Hans Peter Lindenmann, and Peter Spacek. Sichtweiten: Überprüfen der Grundlagen zur VSS-Norm SN 640 090: Projektierungsgrundlagen, Sichtweiten.
- [14] Oussama Derbel, Tamas Peter, Hossni Zebiri, Benjamin Mourllion, and Michel Basset. Modified Intelligent Driver Model for driver safety and traffic stability improvement. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(21):734–739, 2013.
- [15] EG. Richtlinie 2003/97/EG: zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für die Typgenehmigung von Einrichtungen für indirekte Sicht und von mit solchen Einrichtungen ausgestatteten Fahrzeugen sowie zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG und zur Aufhebung der Richtlinie 71/127/EWG, 10.11.2003.
- [16] FGSV. *Richtlinien für Lichtsignalanlagen: RiLSA: Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr*, volume 321 of R 1. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2015 edition, August 2015.
- [17] FGSV. *Empfehlungen für Radverkehrsanlagen: ERA*, volume 284 of R 2. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2010 edition, Dezember 2010.
- [18] FGSV. *Richtlinien für Bemessungsfahrzeuge und Schleppkurven zur Überprüfung der Befahrbarkeit von Verkehrsflächen: RBSV*, volume 287 of R 1. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2020 edition, Dezember 2020.
- [19] FGSV. *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen: RASt O6*, volume 200 of R 1. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2006; korrigierter Nachdruck Januar 2009 edition, Januar 2009.
- [20] FGSV. *Empfehlungen für Verkehrserhebungen: EVE*, volume 125 of R 2. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2012 edition, Januar 2012.
- [21] FGSV. *Ad-hoc-Arbeitspapier zu sogenannten „geschützten Kreuzungen“*, volume 26501 of W 2. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2021 edition, Juni 2021.
- [22] FGSV. *Hinweise zur einheitlichen Bewertung von Radverkehrsanlagen: H EBRA*, volume 284/3 of W 1. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2021 edition, Juni 2021.

- [23] FGSV. *Bemessungsfahrzeuge und Schleppkurven zur Überprüfung der Befahrbarkeit von Verkehrsflächen*, volume 287 of R 2. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2001 edition, Mai 2001.
- [24] FGSV. *Richtlinien für die Anlage und Ausstattung von Fußgängerüberwegen: R-FGÜ 2001*, volume 252 of R 1. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2001 edition, Oktober 2001.
- [25] FGSV. *Empfehlungen für Fußgängerverkehrsanlagen*, volume 288 of R 2. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2002 edition, September 2002.
- [26] FGSV. *Hinweise zur Signalisierung des Radverkehrs: HSRa*, volume 256 of W 1. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2005 edition, September 2005.
- [27] FGSV. *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS*, volume 299 of R 1. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2015 edition, September 2015.
- [28] FHWA. *Bikeway Selection Guide*.
- [29] FHWA. *Separated Bike Lane Planning and Design Guide*.
- [30] Markus Franke and Jolasse Lampert. Geschützte Kreuzungen nach niederländischem Vorbild. *Straßenverkehrstechnik: Zeitschrift für Verkehrsplanung, Verkehrsmanagement, Verkehrssicherheit, Verkehrstechnik*, 64(5):313–319, Mai 2020.
- [31] Markus Franke und Jolasse Lampert. Geschützte Kreuzung – wie weiter? Mehr Sicherheit für Radfahrende. *mobilogisch! Zeitschrift für Ökologie, Politik und Bewegung*, 41(4):35–36, November 2020.
- [32] GDCI and NACTO. *Global Street Design Guide*. Island Press, Washington (US), 2016.
- [33] GDV. *Fahrversuche LKW – Protected Intersection*.
- [34] GDV. Innerörtliche Unfälle mit Fußgängern und Radfahrern.
- [35] GDV. Kritik an UDV-Untersuchungen zu geschützten Kreuzungen: ADFC-Stellungnahme, 19.10.2020: UDV-Stellungnahme.
- [36] GDV. Unfälle zwischen Kfz und Radfahrern beim Abbiegen.
- [37] GDV. Studie und Crashtests: Fahrradunfälle sind häufig, schwer und oft vermeidbar, 1.8.2013.
- [38] GDV. Unfälle zwischen schweren Lkw und Fußgängern, 7.11.2019.
- [39] Jürgen Gerlach. Verkehrssicherheit. In Dirk Vallée, Barbara Engel, and Walter Vogt, editors, *Stadtverkehrsplanung Band 3*, pages 407–441. Springer-Verlag GmbH Deutschland, Berlin, 2021.
- [40] Jürgen Gerlach, Isabelle Ork, Dominik Schmitt, Felix Franke, and Jean Emmanuel Bakaba. *Machbarkeit einer Vergleichsuntersuchung zur Radverkehrssicherheit in Deutschland, Niederlande und Dänemark*, volume 73 of *Forschungsbericht*. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Unfallforschung der Versicherer, Berlin, Dezember 2020.
- [41] Matthias Graichen. *Analyse des Fahrverhaltens bei der Annäherung an Knotenpunkte und personenspezifische Vorhersage von Abbiegemanövern*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, München, Juli 2019.
- [42] Werner Gratzner. Informationsaufnahme beim Kraftfahrer. In Heinz Burg and Andreas Moser, editors, *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, Praxis; ATZ/MTZ-Fachbuch, pages 234–250. Vieweg+Teubner — GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009.
- [43] Werner Gratzner and Manfred Becke. Kinematik. In Heinz Burg and Andreas Moser, editors, *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, Praxis; ATZ/MTZ-Fachbuch, pages 89–169. Vieweg+Teubner — GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009.
- [44] Wolfgang Haller and Sabrina Stieger. Strecken und Knotenpunkte im Straßenverkehr. In Dirk Vallée, Barbara Engel, and Walter Vogt, editors, *Stadtverkehrsplanung Band 3*, pages 125–206. Springer-Verlag GmbH Deutschland, Berlin, 2021.
- [45] David S. Hurwitz, Mafruhatul Jannat, Jennifer Warner, Christopher M. Monsere, and Ali Razmpa. Towards Effective Design Treatment for Right Turns at Intersections with Bicycle Traffic: Final Report.
- [46] Mafruhatul Jannat, David S. Hurwitz, Christopher M. Monsere, and Kenneth H. Funk. The role of driver's situational awareness on right-hook bicycle-motor vehicle crashes. *Safety Science*, 110:92–101, 2018.

- [47] Heiko Johannsen, Dietmar Otte, and Martin Urban. Pre-Crash Analysis of accidents Involving Turning Trucks and Bicyclists. In International Research Council on Biomechanics of Injury, editor, *Proceedings of the IRCOBI Conference*, pages 750–766, September 2015.
- [48] Hermann Knoflacher. *Fußgeher- und Fahrradverkehr: Planungsprinzipien*. Böhlau Verlag, Wien (AT), Köln, Weimar, 1995.
- [49] Angela Kohls. Stellungnahme des ADFC zum Gesetzentwurf des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur: Entwurf einer XX. Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften, StV12/7332.5/6-2.
- [50] Harald Kolrep Rometsch, Rodney Leitner, Christina Platho, Thomas Richter, Annika Schreiber, Marcel Schreiber, and Petra Buterwegge. *Abbiegeunfälle Pkw/Lkw und Fahrrad*, volume 21 of *Forschungsbericht*. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Unfallforschung der Versicherer, Berlin, Juli 2013.
- [51] Timm Kress. Gestaltung von Knotenpunkten im Straßenverkehr in Deutschland. In ADFC, editor, *So geht Verkehrswende – Infrastrukturelemente für den Radverkehr*, pages 36–41. Berlin, Mai 2019.
- [52] Matthias Kühn, Arnd Rose, and Katharina Seifert. Untersuchung des Fußgänger-Fahrzeug-Unfalls hinsichtlich des Fahrverhaltens. *Mensch-Maschine-Interaktion Interaktiv*, (6):76–90, März 2003.
- [53] Bernhard J. Lachenmayr and Klaus Nitsche. Blickzuwendungszeit. In Heinz Burg and Andreas Moser, editors, *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, Praxis; ATZ/MTZ-Fachbuch, pages 894–896. Vieweg+Teubner — GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009.
- [54] Tobia Lakes. Eine räumlich differenzierte Analyse von Verkehrsunfällen mit Radfahrer- und Fußgängerbeteiligung in Berlin. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, 60(12):1328–1335, 23.10.2017.
- [55] Martin Liebner, Michael Baumann, Felix Klanner, and Christoph Stiller. Driver Intent Inference at Urban Intersections using the Intelligent Driver Model. In IEEE, editor, *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 1162–1167. IEEE, 2012.
- [56] Martina Lienhop, Dirk Thomas, Alexander Brandies, Claudia Kämper, Julius Jöhrens, and Hinrich Helms. Pedelec: Verlagerungs- und Klimaeffekte durch Pedelec-Nutzung im Individualverkehr: Endbericht.
- [57] Peipei Liu. *Study of Car-Bicycle Safety at Signalized Intersections from Multi-Aspects*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2019.
- [58] Tanja Kidholm Osmann Madsen and Harry Lahrman. Comparison of five bicycle facility designs in signalized intersections using traffic conflict studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 46:438–450, 2017.
- [59] MassDOT. Separated Bike Lane Planning & Designing Guide.
- [60] Anika Meenen. Die VCD-Bilanz zur neuen Straßenverkehrsordnung: VCD Verkehrswende Blog, 24.2.2020.
- [61] Michael Meschik. *Planungshandbuch Radverkehr*. Springer-Verlag, Wien (AT), 2008.
- [62] Janina-Charline Michel. *Toter Winkel – Herleitung von Problemfeldern und Entwicklung von Maßnahmen bei Unfällen mit rechtsabbiegenden Lkw und geradeaus fahrendem Radverkehr an unfallauffälligen Knotenpunkten in Berlin*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2019.
- [63] Heiner Monheim and Rita Monheim Dandorfer. *Straßen für alle: Analysen und Konzepte zum Stadtverkehr der Zukunft*. Rasch und Röhring Verlag, Hamburg, 1990.
- [64] Christopher M. Monsere, Nathan McNeil, Yi Wang, and Rebecca Sanders. Contextual Guidance at Intersections for Protected Bicycle Lanes.
- [65] MVBW. Musterlösungen für Radverkehrsanlagen in Baden-Württemberg.
- [66] NACTO. Don't Give Up at the Intersection: Designing All Ages and Abilities Bicycle Crossings.
- [67] Walter Niewöhner and F. Alexander Berg. *Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern an Kreuzungen durch rechts abbiegende Lkw: Bericht zum Forschungsprojekt*

82.171/2000: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern an Kreuzungen durch rechts abbiegende Lkw, volume 54 of *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F, Fahrzeugtechnik*. Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2004.

- [68] NYC DOT. Cycling at a Crossroads: The Design Future of New York City Intersections.
- [69] Jörg Ortlepp, Markus Franke, and Angela Kohls. Podiumsdiskussion: „Zeitgemäße und fehlerverzeihende Umgestaltung von Kreuzungsbereichen“.
- [70] Walter Piechulla. Blickbewegungsmaße als Indikatoren der Fahrerbeanspruchung, 2005.
- [71] Marina Plavšić. *Analysis and Modeling of Driver Behavior for Assistance Systems at Road Intersections*. Dissertation, Technische Universität München, München, 2010.
- [72] PTV. PTV Vissim 2020: Benutzerhandbuch.
- [73] Werner Schnabel, Thoralf Knotte, and Jochen Korn. Weitere wichtige Verkehrsanlagen. In Werner Schnabel and Dieter Lohse, editors, *Straßenverkehrstechnik*, Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, pages 435–518. Beuth Verlag GmbH and Kirschbaum Verlag GmbH, Berlin and Bonn, 2011.
- [74] Werner Schnabel and Lothar Lätzsch. Freie Strecke. In Werner Schnabel and Dieter Lohse, editors, *Straßenverkehrstechnik*, Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, pages 19–140. Beuth Verlag GmbH and Kirschbaum Verlag GmbH, Berlin and Bonn, 2011.
- [75] Benjamin Schreck. Cycling and designing for cyclists in Germany: Road safety, Guidelines and Research. *Transactions on Transport Sciences*, 8(1):44–57, 2017.
- [76] Benjamin Schreck-von Below and Angelika Reinartz. Radverkehr: Sicherheit, Forschung und Infrastrukturelle Maßnahmen. *Straßenverkehrstechnik: Zeitschrift für Verkehrsplanung, Verkehrsmanagement, Verkehrssicherheit, Verkehrstechnik*, 63(12):849–857, Dezember 2019.
- [77] Marcel Schreiber. Unfallrisiko Parken für Zu Fuß Gehende und Radfahrende: Legal und illegal abgestellte Fahrzeuge erhöhen Unfallrisiken. *mobilogisch! Zeitschrift für Ökologie, Politik und Bewegung*, 41(4):45–48, November 2020.
- [78] Roland Schurig. *Straßenverkehrs-Ordnung: StVO mit Anlagen zur StVO (jeweils bei den §§ 40 bis 43) und Allgemeiner Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO) sowie Zusatzzeichen nach VzKat (bei § 39)*. Verkehrsrecht. Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn, 16. Auflage edition, September 2018.
- [79] Arndt Schwab. Radwege und niederländische Kreuzungen: Keine Wunderlösung: Gefährdung von Fahrrädern durch rechtsabbiegende Kfz. *mobilogisch! Zeitschrift für Ökologie, Politik und Bewegung*, 40(2):25–30, 2019.
- [80] Timm Schwendy. Deutsche Vorurteile gegenüber niederländischen Schutzinselkreuzungen, 11.12.2019.
- [81] Martin Treiber, Ansgar Hennecke, and Dirk Helbing. Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations.
- [82] Martin Treiber and Arne Kesting. *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 2013.
- [83] VDP. Erläuterungen zur Straßenverkehrsordnung: Bu 8-2. In VDP, editor, *Polizei-Fach-Handbuch*, pages 61–110. Verlag deutsche Polizeiliteratur GmbH, Hilden, 1993.
- [84] Esther Walter, Mario Cavegn, Roland Allenbach, and Gianantonio Scaramuzza. Fahrradverkehr: Unfallgeschehen, Risikofaktoren und Prävention.
- [85] Fulu Wei, Yongqing Guo, Pan Liu, Zhenggan Cai, Qingyin Li, and Long Chen. Modeling Car-Following Behaviour of Turning Movements at Intersections with Consideration of Turning Radius: Research Article. *Journal of Advanced Transportation*, pages 1–9, 2020.
- [86] Henrik Zöller and Wolfgang Hugemann. Zur Problematik der Bremsreaktionszeit im Straßenverkehr. In BDP, editor, *37. BDP-Kongreß für Verkehrspsychologie*, 1998.

Nachhaltige Förderung des Radverkehrs im Winter durch optimierten Winterdienst (WinRad)

Tim Wiesler

*Institut für Verkehr und Infrastruktur
Hochschule Karlsruhe
tim.wiesler@h-ka.de*

Christian Holldorb

*Institut für Verkehr und Infrastruktur
Hochschule Karlsruhe
christian.holldorb@h-ka.de*

Jan Riel

*Institut für Verkehr und Infrastruktur
Hochschule Karlsruhe
jan.riel@h-ka.de*

Niklas März

*FITT - Institut für Technologietransfer an
der Hochschule für Technik und Wirt-
schaft des Saarlandes gem. GmbH
niklas.maerz@htwsaar.de*

Thorsten Cypra

*FITT - Institut für Technologietransfer an
der Hochschule für Technik und Wirt-
schaft des Saarlandes gem. GmbH
thorsten.cypra@htwsaar.de*

Zusammenfassung

Im Rahmen der Radverkehrsförderung muss das Fahrrad auch bei winterlicher Witterung problemlos nutzbar sein. Der Winterdienst räumt nicht nur Schnee, sondern schützt auch präventiv gegen Glätte. Auf Radwegeverbindungen bestehen hierbei Anforderungen, die sich von Fahrbahnen für den Kraftverkehr unterscheiden. Faktoren wie geringere Durchfahrtsbreiten oder Besonderheiten des Fahrrads hinsichtlich optimaler Streustoffe und deren Verteilung bedingen spezielle Räum- und Streutechnik, eine darauf abgestimmte Einsatzplanung und gute Koordination. Für viele Einsatzszenarien haben sich auf Radwegen die Räumung von Schnee mit einer Kehrwalze und die Ausbringung von reiner Sole (FS 100) als ideal erwiesen. Bei der Einsatz- und Routenplanung müssen durchgängige Radverkehrsverbindungen zugrunde gelegt werden, die auch wechselnde Führungsformen enthalten und Zuständigkeits- grenzen überschreiten können. Daher ist eine enge Zusammenarbeit aller Akteure wichtig, um eine durchgängig gute Befahrbarkeit zu garantieren. Die Ausweisung beschilderter Winterradnetze kann dabei helfen, Radfahrende über sicher befahrbare Routen zu informieren. Wichtige Radverkehrsverbindungen müssen dabei mindestens gleichzeitig mit den Verbindungen des Kraftverkehrs betreut werden. Ein enger Austausch des Betriebspersonals mit den Radfahrenden vor Ort, sowie die Einbeziehung dieser in das Qualitätsmanagement helfen, Verständnis für die Belange des jeweils anderen zu schaffen und einen nutzerorientierten Winterdienst zu ermöglichen.

Index Terms

Radverkehr, Winterdienst, Betriebsdienst

I. Einführung

Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hat die Hochschule Karlsruhe (HKA) und die Hochschule für Technik und Wirtschaft in Saarbrücken (htw saar) mit einem Forschungsprojekt zur nachhaltigen Förderung des Radverkehrs im Winter durch optimierten Winterdienst beauftragt. Das seit Jahren steigende Radverkehrsaufkommen in Deutschland rückt die Erfordernis einer ganzjährig gut und sicher befahrbaren Radverkehrsinfrastruktur in den Fokus der Öffentlichkeit. Bezogen auf den Winterdienst sind Radfahrende vielerorts mit Mängeln konfrontiert:

- unzuverlässige Betreuung selbst verkehrswichtiger Verbindungen,
- Unklarheit über die örtlichen Leistungen des Winterdienstes,
- deutliche Qualitätsunterschiede auf einer Verbindung,
- ineffektive Betreuung durch unpassende Betriebsmittel und Streustoffe.

In Deutschland ist ein starker Rückgang der Fahrradnutzung im Winter zu beobachten. Die Studie Mobilität in Deutschland 2017 beziffert den Radverkehrsanteil am Verkehrsaufkommen etwa im September mit 14 %, im Januar liegt dieser Wert jedoch nur bei 7 %. Zudem ist die durchschnittliche Wegelänge auf dem Fahrrad im Winter mit drei Kilometern deutlich kürzer als im Rest des Jahres. [1] Obwohl aufgrund des Klimawandels bundesweit mit einem mittleren Rückgang von Tagen mit Schneefall und überfrierender Nässe zu rechnen ist, stellen Glätteereignisse in der Winterperiode eine ernstzunehmende Gefährdung für den Radverkehr dar. Auch sind regional in unterschiedlicher Intensität weiterhin regelmäßig Räumeeinsätze notwendig, um das Fahrrad als witterungsunabhängiges Verkehrsmittel für Alltagswege zu etablieren. Ziel des Projektes ist es daher, umfassende Empfehlungen zur Förderung des Radverkehrs im Winter zu geben, die neben dem Winterdienst auch die Planung von Radverkehrsanlagen und Information/Kommunikation umfassen. Dabei wird der Fokus auf durchgängige Radwegeverbindungen gelegt. Da das laufende Forschungsprojekt noch nicht fertiggestellt wurde, werden in diesem Artikel nur einzelne Methoden und Zwischenergebnisse aufgegriffen und erläutert.

II. Grundlagen

Bei der Betreuung der Radwege werden hauptsächlich Kleinfahrzeuge, wie z. B. Schmalspurfahrzeuge (s. Abb. 1) oder Kleintraktoren verwendet. Schmalspurfahrzeuge sind deutlich kleinere Winterdienstfahrzeuge mit der gleichen Technik und Ausstattung wie Großfahrzeuge und aufgrund der deutlich kleineren Abmessungen und der geringeren Gesamtlast gut für Radwege geeignet. Bei einer Führung im Mischverkehr sowie teils auf markierten Führungsformen wird der Winterdienst mit dafür ausgerüsteten Großfahrzeugen durchgeführt. Schnee kann grundsätzlich auf zwei Arten geräumt werden, mit einem Schneepflug oder einem Kehrbesen/Kehrwalze. Letztere eignen sich bei geringeren Schneemengen besser, da ein saubereres Räumbild möglich ist.



Abbildung 1. Schmalspurfahrzeug mit Frontkehrbesen auf einem Radweg

Grundsätzlich existieren zwei Arten von Streustoffen, welche im Winterdienst auf Oberflächen aufgebracht werden können: Abstumpfende Streustoffe sowie auftauende Streustoffe. Abstumpfende Streustoffe sind meist Sand oder Splitt. Die erforderliche Streudichte ist weitaus höher als bei anderen Streustoffen, außerdem ist für eine bessere Wirkung theoretisch ein größerer Anteil an scharfkantigen Partikeln erforderlich. Die Nutzung solcher abstumpfenden, insbesondere scharfkantigen Streustoffe auf Radwegen wird nicht empfohlen. [2] Geeigneter sind dagegen Salze oder Salzlösungen, sogenannte auftauende Streustoffe, die den Gefrierpunkt herabsetzen. [3] [4] Dadurch soll vorhandenes gefrorenes Wasser in Form von Schnee oder Eis aufgetaut werden, vorhandene Feuchtigkeit wird am Gefrieren gehindert. Am preiswertesten und am häufigsten eingesetzt ist Natriumchlorid. Salz sollte zur Vermeidung von Wehverlusten bei der Streuung, zur Sicherstellung eines guten Streubildes und zur Optimierung der Wirksamkeit angefeuchtet ("Feuchtsalz") oder in ganz flüssiger Form (Sole) ausgebracht werden. Dabei sind geringere Mengen nötig, dies ist aus ökologischen, wirtschaftlichen und verkehrlichen Gründen vorteilhaft. Die Bezeichnung des Streustoffes erfolgt nach dem Masseverhältnis Salzlösung zu Trockensalz (Bei dem häufig eingesetzten FS 30 entspricht dies z.B. 30 % Salzlösung und 70 % Trockensalz). Im Vergleich zu Feuchtsalz bietet reine Sole (FS 100) eine gleichmäßigere Verteilung, insbesondere bei vorbeugender Streuung und geringen Taustoffmengen ist diese besonders geeignet. Sole ist sinnvoll bei nicht allzu tiefen Fahrbahntemperaturen ohne zu erwartende große Niederschlagsmengen und Temperaturstürze. Präventives Streuen kann bei Schneefall oder Eisregen das Festbacken von Schnee oder Eis auf der Oberfläche verhindern. [5] Die Kombination aus Besenräumung und Solesprühung hat sich positiv (in Bezug auf die Wirkung auf den Radverkehr und die Verkehrssicherheit) bewährt. Heute wird davon ausgegangen, dass bei maßvoller Dosierung und mit moderner und effizienter Streutechnik auftauende Streustoffe nicht umweltschädlicher sind als

abstumpfende Streustoffe. [3]

Neben einem regulären Radnetz haben einige Kommunen auch ein gesondertes Winterradnetz ausgewiesen. Die Stadt Karlsruhe beispielsweise bietet Radfahrenden etwa ein gesondertes Netz an Verbindungen, welche im Winter vorrangig geräumt und gestreut werden. [6]

III. Untersuchung des Winterdienstes auf Radwegeverbindungen in drei Kommunen

Exemplarisch wird im Rahmen des Forschungsprojekts der Winterdienst auf Radwegeverbindungen in den drei Kommunen Karlsruhe, Köln und München untersucht. Dabei werden neben der Winterdienstpraxis und eingesetzter Räum- und Streutechnik die Systematik ausgewiesener (Winter-) Radnetze und -routen betrachtet. Um die Befahrbarkeit von Radwegeverbindungen vor Ort bei winterlicher Witterung zu untersuchen, wurden in jeder Kommune mehrere Routen mit dem Fahrrad befahren. Die Routen sind typischen Alltagsrouten nachempfunden und führen jeweils von Vororten oder äußeren Stadtteilen ins Zentrum, meist auf wechselnden Führungsformen und teils über Gemarkungs- und Zuständigkeitsgrenzen hinweg. Die Befahrungen werden mit einer Kamera sowie GPS aufgezeichnet. In der Auswertung wurde die Befahrbarkeit der Route auf einer Skala von 1 (ohne Beeinträchtigung zu befahren) bis 5 (nicht befahrbar) abschnittsweise bewertet. Die klassifizierte Befahrbarkeit kann anschließend mit den Winterdienst-Einsatzdaten verglichen werden. Außerdem wird die jeweilige Führungsform beachtet. Dabei wird deutlich, wo Probleme in der Praxis liegen und wie dies die Befahrbarkeit für den Radverkehr beeinträchtigt. So sind zum Beispiel an Querungsstellen häufig Mängel erkennbar (s. Abb. 2). Hieraus lassen sich auch für bestimmte Querschnitte und Entwurfsэлеmente typische Risiken und Anforderungen herausarbeiten, die bei der Einsatzplanung und -durchführung beachtet werden müssen.



Abbildung 2. Schneeablagerung an Querungsstelle

Außerdem lässt sich feststellen, wie lange mit der lokal eingesetzten Räum- und Streutechnik je nach Witterung eine gute Befahrbarkeit gewährleistet werden kann. Teilweise wurden Routen hierfür auch an einem Tag mehrfach befahren. Zur Analyse des Winterdienstes auf Radwegen wurden mehrere Winterdienst-Einsätze in den Kommunen dokumentiert. Dazu wurden Winterdienstfahrzeuge mit Kameras ausgestattet und deren Einsätze gefilmt. Diese Videoaufzeichnungen geben Aufschluss über Problemstellen und -bereiche sowie vermeidbare Zeitverluste durch Hindernisse, wie z. B. Pfosten oder zu schmale Durchfahrtsbreiten. Hiermit werden Empfehlungen für einen verbesserten und optimierten Winterdienst entwickelt. Um Eindrücke über die Winterdienstpraxis auf Radwegeverbindungen aus erster Hand zu erhalten, wurden in Karlsruhe, München und Köln Workshops mit dem Einsatzpersonal sowie der Einsatz-/ Betriebsleitung durchgeführt, mit dem Ziel, Probleme und Lösungsansätze zu diskutieren.

IV. Internationale Experteninterviews

Auch im Ausland haben Städte und Regionen Erfahrungen mit der Radverkehrsförderung im Winter gemacht. Mit Vertretern aus Montreal, Kopenhagen, Wien und dem finnischen Oulu wurden Experteninterviews durchgeführt, bei welchen die dort angewandten Strategien und Methoden erläutert und diskutiert wurden. In Wien etwa wird zur Betreuung des umfangreichen Radnetzes auf mobile Streustoffsilos und semimobile Solemischanlagen zurückgegriffen, um den Winterdienst mit reduzierten Leerwegen zu optimieren. In Oulu und der angrenzenden Region werden wichtige Streckenbündel von den verschiedenen Aufgabenträgern gemeinsam vergeben. Die Dienstleister sind auch dazu verpflichtet, neben den Einsätzen selbst Aufklärungs- und Kommunikationsarbeit zu leisten, etwa mit Informationsständen für Radfahrende. Die erbrachte Leistung wird in Oulu, welches für seinen hohen Radverkehrsanteil im Winter bekannt ist, schließlich durch die Radfahrenden selbst kontrolliert.

V. Befragung von Radfahrenden aus Nutzersicht

Im Rahmen einer Umfrage mit 2.944 Teilnehmenden wurde unter anderem untersucht, welche Erfahrungen Radfahrende im Winter gemacht haben und wie sie bestimmte, typischerweise auftretende Zustände der Radinfrastruktur im Winter einschätzen. Hierfür wurden 8 Situationen beschrieben und mit einem Bild dargestellt. Diese sollten hinsichtlich ihrer Befahrbarkeit bewertet werden, außerdem wurde das individuelle Verhalten hinsichtlich Ausweichen und Abbremsen sowie der Einfluss auf die künftige Routenwahl abgefragt. Zudem wurden individuelle Merkmale wie die Nutzungserfahrung und -häufigkeit, die Art des am häufigsten genutzten Fahrrads sowie weitere demografische Daten erfasst. Ein weiterer Schwerpunkt waren die Kenntnis und Bewertung von Angeboten wie Winterradnetzen und Mängelmeldern sowie Zufriedenheit und Erfahrungen mit dem Winterdienst auf Radwegeverbindungen vor Ort allgemein. Insbesondere für erfahrene Radfahrende stellen schlechte Witterungsverhältnisse kaum ein Hemmnis

dar. Ein unzuverlässiger oder schlecht durchgeführter Winterdienst auf Radrouten kann hingegen dafür sorgen, dass Radfahrende sich erheblich eingeschränkt fühlen. Als besonders ärgerlich und gefährlich werden Schneeablagerungen auf Radfahr- und Schutzstreifen betrachtet, welche in der Praxis häufig durch einen schlecht getakteten Einsatz oder unzureichende Einsätze entstehen. Auch Eisglätte wird häufig als Grund betrachtet, lieber auf das Fahrrad zu verzichten (s. Abb. 3).

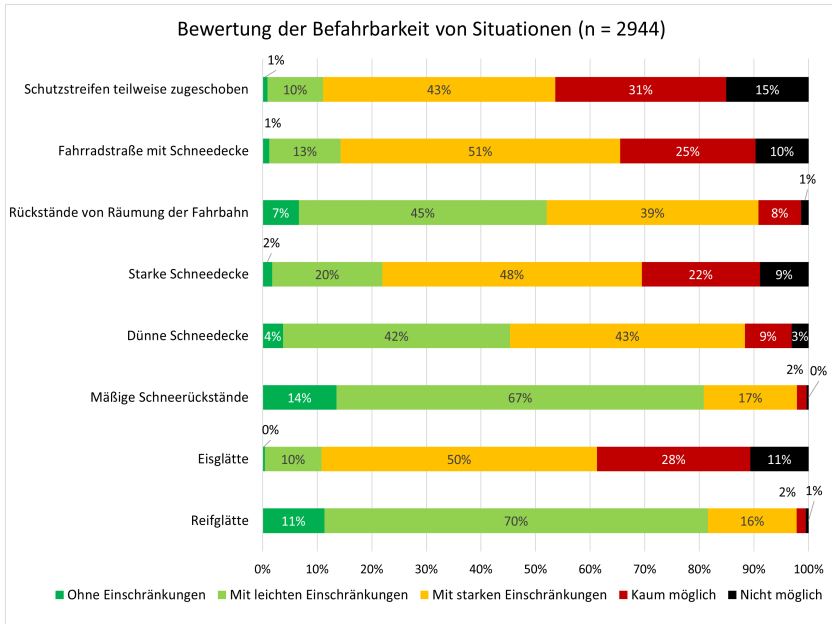


Abbildung 3. Bewertung der Befahrbarkeit bei bestimmten winterlichen Situationen

Bei den Nutzenden von Lastenrädern, Fahrrädern mit Anhänger sowie E-Bikes/ Pedelecs gibt es keine nennenswerten Abweichungen zum Gesamtteilnehmerfeld. Befragte der Altersgruppe über 60 Jahren geben in jeder Situation häufiger an, sich vorsichtiger zu verhalten. Die größten Unterschiede zum Gesamtteilnehmerfeld gibt es bei den Befragten, die das Fahrrad im Winter selten bis nie bzw. seltener als im restlichen Jahr nutzen. Beide Gruppen bewerten die Befahrbarkeit negativer, geben häufiger an, ihre Geschwindigkeit zu reduzieren und auszuweichen, und sehen häufiger einen Einfluss der Situationen auf eine kommende hypothetische Routenwahl. Insgesamt sind Befragte aus Karlsruhe deutlich zufriedener mit dem Zustand der Radwegeverbindungen im Winter als Befragte aus anderen Städten. Die Mehrheit der Befragten ist bereit, im Winter auf ein besonders großes Radnetz zu verzichten, solange es ausgewiesene und zuverlässig betreute Routen gibt, welche

bei jeder Witterung gefahrlos befahren werden können. Angebote wie ein eigenes Winterradnetz oder Mängelmelder sind jedoch selbst erfahrenen Radfahrenden noch oft unbekannt, werden jedoch von Nutzerinnen und Nutzern geschätzt. Ein zur Ausweisung eines Winterradnetzes vorgeschlagenes Piktogramm, welches zuvor im Rahmen eines Wettbewerbs unter Studierenden ausgewählt wurde, (s. Abb. 4) wird von fast allen Befragten mit der angedachten Bedeutung in Verbindung gebracht.



Abbildung 4. Piktogramm für ein Winterradnetz

Auch der Aspekt der Beleuchtung von Strecken spielt für das Sicherheitsgefühl vieler Radfahrenden im Winter eine große Rolle.

VI. Messungen zur Ausbringung von Streustoffen auf Radwegen

Zur Optimierung der Streustoffausbringung auf Radwegen wurden Messversuche der Streustoffverteilung und der Liegedauer von auftauenden Streustoffen (FS 0; FS 30; FS 100) auf Radwegen durchgeführt. Die Vorgehensweise der Messversuche orientierte sich dabei an den durch die BAST durchgeführten Messversuchen auf Fahrbahnen. [7] Gemessen wurde mit einem Spül-Saug-Gerät (s. Abb. 5) jeweils an vier gleichgroßen Feldern zu zuvor definierten Zeitintervallen.



Abbildung 5. Spül-Saug-Gerät

Dazu wurden eine Kontrollmessung vor der Ausbringung, eine Messung unmittelbar nach der Ausbringung und weitere Messungen nach 2, 6 und 24 Stunden durchgeführt. Bei den Messversuchen in Karlsruhe und in Köln zeigt sich die Tendenz, dass durch die Radfahrenden keine Verfrachtung der Streustoffe auf den Radwegen stattfindet und lange Liegedauern möglich sind.

Um die für die Tausalzausbringung relevanten Unterschiede zwischen Radweg und Fahrbahn zu untersuchen, wurden die Daten einer Straßenwetterstation mit Sensoren auf Fahrbahn und Radweg über die Dauer von zwei Wintern ausgewertet. Dabei wurden die Verläufe der Luft- und Oberflächentemperaturen sowie die Wasserfilmdicke und der Restsalzgehalt untersucht.

VII. Fazit

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen können zahlreiche Hinweise und Empfehlungen zur Optimierung des Winterdienstes, der winterdienstfreundlichen Planung von Radverkehrsanlagen und -netzen sowie zur Förderung des Radverkehrs im Winter allgemein gegeben werden. Diese gliedern sich in drei Cluster:

- Winterdienst: Maßnahmen zur Optimierung des Winterdienstes auf Radwegeverbindungen aus Sicht des Betriebsdienstes
- Planung, Ausführung und Ausstattung von Radverkehrsanlagen: Maßnahmen zur planerischen und baulichen Optimierung von Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung der Belange des Winterdienstes
- Radverkehr: Maßnahmen zur Bewerbung des Radverkehrs im Winter sowie für Aufklärungs- und Informationsarbeit

Ausgewählte Maßnahmen werden zusätzlich einer Kosten-Nutzen-Rechnung unterzogen. Die vollständigen Ergebnisse werden nach Abschluss des Forschungsprojek-

tes publiziert und bei der Aktualisierung der Regelwerke berücksichtigt. Grundsätzlich ist bei der Planung und Durchführung von Winterdienstleistungen auf Radwegeverbindungen der Aspekt der durchgehenden, nutzerorientierten Verbindungen in besonderem Maße zu beachten. Routen müssen daher unabhängig von Führungsform und Aufgabenträger möglichst durchgängig und einheitlich betreut werden. Verkehrswichtige Verbindung sollten außerdem als Winter Routen ausgewiesen und in einem ausgewiesenen Winterradnetz zusammengefasst werden. Für Städte mit vergleichsweise milden Wintern eignet sich die Ausbringung auftauender Streustoffe in Kombination mit einer Kehrwalze zur Räumung von Schnee am besten. Das Verständnis von Radfahrenden und Winterdienst für die Belange des jeweils anderen kann durch verschiedene Maßnahmen gefördert werden, etwa das Befahren von Strecken durch Betriebspersonal auf dem Fahrrad, der gezielte Dialog mit Radfahrenden vor Ort im Winter sowie die Einbindung der Radfahrenden ins Qualitätsmanagement. Gleichzeitig ist bei der Planung von Radverkehrsanlagen sowie bei dem Beschluss und der Durchsetzung von Ordnungs- und Verkehrsrecht (z.B. Durchfahrtsbreiten an Baustellen, Abstellen von Fahrrädern und E-Scootern) auf die Belange des Winterdienstes stärker Rücksicht zu nehmen.

Author Contributions

Projektleitung:

Prof. Dr.-Ing. Christian Holldorff (HKA)

Prof. Dr.-Ing. Jan Riel (HKA)

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Cypra (htw Saar)

Projektbearbeitung:

B.Sc. Tim Wiesler (HKA)

B.Eng. Niklas März (htw Saar)

Literatur

- [1] C. Nobis, Mobilität in Deutschland - MID: Analysen zum Radverkehr und Fußverkehr. Eine Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. FE-Nr. 70.904/15. Bonn, Berlin, 2019.
- [2] FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Empfehlungen für Radverkehrsanlagen - ERA: Ausgabe 2010 (FGSV 284) FGSV-Verlag. Köln, 2010.
- [3] H. Hanke, Winterdienst auf Radwegen: Herausforderungen und Lösungen. Kolloquium Straßenbetrieb 2019 (FGSV 002/126). Köln.
- [4] M. Wichmann (Hg.), Straßenreinigung und Winterdienst in der kommunalen Praxis: Rechtsgrundlagen - Organisation - Aufgaben, 8. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, (8. Aufl.) Erich Schmidt Verlag. Berlin, 2018.
- [5] FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Merkblatt für den Winterdienst auf Straßen: Ausgabe 2020 (FGSV 38416) FGSV-Verlag. Köln, 2020.
- [6] Stadt Karlsruhe. (2021) Das Radverkehrsnetz in Karlsruhe. Online verfügbar unter: <https://www.karlsruhe.de/b3/mobilitaet/radverkehr/radnetz.de>, abgerufen am: 26.05.2021.
- [7] G. Hausmann, Empfehlungen zum richtigen Aufbringen von Tausalzlösungen: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST. Heft V218. Bergisch-Gladbach, 2012. 1989.

