

Modelo-Rad

Entwicklung eines **Modellierungstools** zur Mikrosimulation bestehender und zu planender **Radverkehrsinfrastruktur**

Vorhabenbeschreibung

Ziele

Gesamtziel des Vorhabens

Sowohl für den Kraftfahrzeug-Verkehr als auch für den Fußverkehr existieren geeignete Tools zur Simulation des Fahrt- und Bewegungsvorgangs, die für die Planung und Evaluation von Infrastruktur genutzt werden. Der Kfz-Verkehr und der Fußverkehr werden beide wesentlich durch die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern geprägt. Beim Kfz-Verkehr werden zudem Verkehrsregelungen wie die zulässige Höchstgeschwindigkeit, Vorfahrtregelungen usw. berücksichtigt. Der Fahrtvorgang von Radfahrenden wird zusätzlich zur Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern durch die biomechanischen Prozesse des Fahrtvorgangs, beispielsweise die individuelle Antriebsleistung, beeinflusst. Auch Merkmale der Radinfrastruktur (Steigung, Kurvenradius, Belag, Breite, Engstellen, Kanten, Führungsformen usw.) haben Einfluss auf den Fahrtvorgang von Radfahrenden. Ein Simulationsansatz, welcher diese Spezifika des Radfahrens vollumfänglich abbildet, existiert gegenwärtig nicht.

Das Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines Tools zur hochauflösenden, strecken- und radfahrtypenabhängigen Simulation für den Radverkehr. Dieses soll eine detaillierte Beurteilung der Qualität von Fahrvorgängen für bestehende und zukünftige Radverkehrsinfrastruktur/-routen ermöglichen. Das Simulationstool baut auf der physikalischen Modellierung von Fahrradfahrten auf und bezieht biomechanische Aspekte und Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern ein. Der biomechanischen Modellierung des Fahrrad-Antriebs liege individuelle Radfahrende zugrunde. In Abhängigkeit der Eigenschaften der Fahrstrecke wird die zu erwartende Geschwindigkeit errechnet. Die Identifikation der für die Radfahrt relevanten Streckeneigenschaften findet mithilfe von physikalischen Gesetzmäßigkeiten statt. Die so identifizierten Faktoren werden durch eine empirische Erhebung überprüft. Diese Eigenschaften dienen als Basis zur Modellierung des Verhaltens von Radfahrenden. Für eine repräsentative Darstellung wird eine Flotte verschiedener Radfahrtypen berücksichtigt. Die Modellierung wird anhand von Realdaten validiert. Somit stellt die Simulation die Fahrt einer Strecke aus der Perspektive von Radfahrenden dar und ermöglicht die Bewertung relevanter Größen (z.B. Geschwindigkeit, Fahrtzeit, benötigte Antriebsleistung, aufgebrachte Anstrengung usw.) für bestehende und zu planende Radinfrastruktur.

Das Simulationstool richtet sich an die kommunale Verwaltung, Ingenieurbüros sowie alle Akteure, welche in die Radverkehrsplanung und Radverkehrsförderung involviert sind. Es kann die Radverkehrsplanung und Radverkehrsförderung bei nachfolgenden Aufgaben unterstützen:

- Entscheidungsunterstützung für in Planung befindliche Trassenvarianten für Radrouten/Infrastruktur (Identifikation der Variante zur Minimierung von Reisezeit, Leistungsbedarf usw.),
- Identifikation von Optimierungsbedarf an bestehenden und zu planenden Radrouten/Infrastrukturen im Hinblick auf Zeitverluste, Leistung und Sicherheit,

- Gebietsweite Evaluation der Radverkehrsinfrastruktur und Identifikation von Abschnitten mit Verbesserungspotenzial (hoher Leistungsbedarf, große Reisezeitverluste usw.),
- Abschätzung der Reisezeiten im Radverkehr für Reisezeitvergleiche mit anderen Verkehrsmitteln,
- Ermittlung der Wirkung von Lückenschlüssen und Ausbaumaßnahmen im Radverkehrsnetz auf Reisezeit und Leistungsbedarf als Basis für Kosten-Nutzen-Betrachtungen.

Durch die Simulation kann die Sichtweise von Radfahrenden eine Qualitätsgüte bei der Planung und Bewertung von Radverkehrsinfrastruktur darstellen. Das Tool ist flexibel für bereits bestehende oder zukünftige Infrastruktur einsetzbar und kann zur Betrachtung von einzelnen Infrastrukturelementen bis hin zu kommunalen und überregionalen Radverkehrsnetzen genutzt werden. Des Weiteren wird eine Standardisierung der Planungsprozesse auf Basis der durch das Tool bereitgestellten einheitlichen Wirkungsgrößen des Radverkehrs möglich.

Beitrag des Projektes zur Umsetzung des NRVP

Das Projekt adressiert das Ziel des *NRVP 3.0*, die Verkehrsverhältnisse für den Radverkehr in Deutschland zu verbessern. Das Simulationstool ermöglicht eine Mikrosimulation des Radverkehrs aus dem Blickwinkel der Radfahrenden in Hinblick auf: Leistung, Geschwindigkeit, Reisezeit, Interaktion mit Verkehrsteilnehmern, Komfort usw. Damit ermöglicht es eine integrierte und strategische Planung von Radinfrastruktur. Aufgrund der bislang fehlenden Möglichkeiten zur Mikrosimulation des Radverkehrs sind bisherige Planungen nicht das Ergebnis einer integrierten und strategischen Planung, sondern oftmals lediglich ein Resultat vorgegebener Mittel, Flächen und Möglichkeiten. Das Tool ermöglicht es, die Radverkehrsinfrastruktur vor der realen Umsetzung virtuell in Ihrer Wirkung zu bewerten und eröffnet damit einen bisher ungenutzten Gestaltungs- und Optimierungsspielraum. So kann die Wirkung unterschiedlicher Gestaltungslösungen auf den Fahrtvorgang modelliert und bewertet werden. Im Ergebnis kann die Qualität der Radverkehrsinfrastruktur unter Berücksichtigung der Perspektive der Radfahrenden gesteigert werden. Radverkehrsrouten und die zugehörige Infrastruktur können somit aus Perspektive der Radfahrenden für diese selbst attraktiver gemacht werden und einen wesentlichen Beitrag zur Förderung des Radverkehrs zu leisten.

Das Tool kann zudem die Entwicklung und Umsetzung bundeseinheitlicher Qualitätsstandards für Radinfrastruktur von kommunalen Radrouten bis hin zu Radschnellverbindungen fördern. Durch die Abschätzung und Bewertung der Wirkung verschiedener Varianten der Radverkehrsinfrastruktur bereits in der Planungsphase wird systematische Radnetzplanung mit einheitlichen Qualitätsmaßstäben möglich. Im Ergebnis unterstützt das Tool Planungsprozesse für Radverkehrsinfrastruktur, reduziert die erforderlichen personellen und finanziellen Planungsressourcen und hilft damit, vorhandene Umsetzungsbarrieren der Kommunen abzubauen. Die Fördermittel des Bundes für die Radverkehrsinfrastruktur können somit schneller und effektiver eingesetzt werden.

Stand der Wissenschaft und Technik, bisherige Arbeiten

Stand der Wissenschaft und Technik (Informationsrecherchen, einschließlich alternativer Lösungen, der Ergebnisverwertung entgegenstehende Rechte usw.)

Fahrverhalten von Radfahrenden

Radfahrende sind eine höchst heterogene Gruppe. Neben den üblichen sozio-demographischen Eigenschaften (z.B. Alter und Geschlecht), die genutzt werden um Unterschiede zwischen verschiedenen Nutzer:innengruppen zu erklären, sind beim Radfahren auch Erfahrung, Leistungsfähigkeit und subjektives Sicherheitsempfinden von großer Bedeutung für das zu erwartende und zu approximierende Fahrverhalten.

Bisher werden verschiedene Typen von Radfahrenden nach Fahrvermögen, subjektivem Sicherheitsempfinden, Regeltreue oder Motivation zum Radfahren unterschieden (Geller 2009; Dill und McNeil 2013; Mekuria et al. 2012; Jensen 1999). Zudem wurden mehrdimensionale Typisierungen entwickelt (Francke et al. 2019; Damant-Sirois et al. 2014). Diese Typisierungen ermöglichen unterschiedliche Anforderungen an die Radinfrastruktur zu erkennen oder Ansätze für eine Förderung des Fahrrads als Verkehrsmittel für den Alltagsverkehr zu finden. Diese Klassifizierungen sind für die geplante Entwicklung einer Mikrosimulation des Radverkehrs nur bedingt hilfreich. Ziel des Projektes ist es, das Radfahren aus der Perspektive von Radfahrenden zu modellieren. Somit rückt die körperliche Praxis selbst in den Fokus der Untersuchung. Notwendig ist hierfür eine Typisierung von Radfahrenden nach ihrer Leistungsfähigkeit sowie ihrem Fahrverhalten (Kurvenfahrten, Beschleunigen und Abbremsen), den Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmenden und dem Verhalten an Knotenpunkten. Mit Sicht auf die Infrastruktur sind Fragen nach dem Kraftaufwand auf unterschiedlichen Führungsformen, zu erwartenden Stopps sowie entsprechend der Führungsform abzusehende Überholabstände entscheidend. Diese Faktoren wurden in den bisher angewandten Klassifikationen von Radfahrenden nur unvollständig und getrennt voneinander erhoben. Ein Modell, welches die unterschiedlichen Faktoren in Relation zueinander setzt, existiert aktuell nicht.

Verkehrssimulation von Radfahrenden

Für die Verkehrssimulation ist die Unterscheidung in drei verschiedene Betrachtungsebenen gebräuchlich (Dallmeyer 2014). Makroskopische Modelle stellen große Verkehrsströme dar und ermitteln gemittelte Kenngrößen anhand von Parametern der Verkehrsnachfrage und der Verkehrsinfrastruktur. Mikroskopische Modelle beschreiben hingegen detailliert das Verhalten von einzelnen Verkehrsteilnehmern und betrachten spezifische Verkehrsräume. Die Reaktion jedes Verkehrsteilnehmers geht dabei rückkoppelnd aus dem individuellen Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer sowie der Verkehrsinfrastruktur hervor. Die Ergebnisse der Mikrosimulation ergeben sich damit aus der Interaktion der einzelnen Verkehrsteilnehmer. Zudem gibt es mesoskopische Verkehrsmodelle, welche eine Kombination beider Ansätze verfolgen.

Für die Darstellung, Analyse und Bewertung der Interaktion unterschiedlicher Typen von Verkehrsteilnehmern stehen verschiedene Ansätze der mikroskopischen Simulation zur Verfügung (Twaddle et al. 2014). Bestehende Modelle zur Mikrosimulation des Kfz-Verkehrs (Daiheng Ni 2016) basieren meist auf Fahrzeugfolgmodellen, bei welchen die Verkehrsteilnehmer einem auf der gleichen Spur vorausfahrenden Führungsfahrzeug folgen. So berücksichtigt das Wahrnehmungsmodell nach *Wiedemann* (Wiedemann 1974) die Fahrzeugfolge basierend auf der Wunschgeschwindigkeit oder dem Wunschabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Eine Berücksichtigung von spezifischen Fahrzeugeigenschaften, wie z.B. der Brems- und Beschleunigungseigenschaften erfolgt häufig nicht, sodass die technischen Betriebsgrenzen eines realistischen Fahrzeugs nicht immer eingehalten werden. Die Interaktion mit der Infrastruktur folgt prinzipiell den geltenden Verkehrsregeln, kann aber

randomisierte Abweichungen enthalten. Die Darstellung von Spurwechseln, also die Interaktion entlang der Querachse, kann durch regelbasierte Modelle oder die Verwendung von Zellulären Automaten wie z.B. dem *Nagel-Schreckenberg-Modell* (Nagel und Schreckenberg 1992) erfolgen. Für die Darstellung von Fußgänger:innen werden zudem Social-Force Modelle eingesetzt, welche nicht an eine Hauptbewegungsrichtung gebunden sind. Die Bewegung der zu Fuß Gehenden in Personenstromsimulationen ergibt sich dabei aus der „*Anziehungskraft*“ zum Ziel sowie der gleichzeitig wirkenden „*Ablenkung*“ durch Hindernisse und anderen zu Fußgänger:innen.

Erste Ansätze zur Modellierung des Radverkehrs (Twaddle et al. 2014) basieren auf einer Kombination von Fahrzeugfolgmodellen und *Social-Force* Modellen für den Fuß- und Fahrzeugverkehr und deren Anpassung für den Radverkehr. Der Radverkehr folgt, abweichend zum Fußverkehr, deutlich stärker einer Bewegung in Längsrichtung, ist aber bezüglich seitlicher Bewegung deutlich flexibler als der Kfz-Verkehr. Zudem folgen die Interaktionen der Radfahrenden mit anderen Verkehrsteilnehmern anderen Regeln. So erfordern Überholvorgänge bei Radfahrenden nicht immer ein vollständiges Ausweichen auf die benachbarte Fahrspur. Der Betrachtungsfokus dieser Ansätze der Mikrosimulation des Radverkehrs liegt hauptsächlich auf der Interaktion von Radfahrenden mit anderen Verkehrsteilnehmern. Die bisherigen Modelle bilden das fahrdynamische Verhalten der Radfahrenden im Längsverkehr ohne oder nur mit geringen Verkehrs-Interaktionen ab. Dieser Fahrtvorgang im Längsverkehr ist jedoch für die Fahrtzeit, den Leistungsbedarf und Komfort der meisten Fahrradfahrten prägend. Dabei ist eine Berücksichtigung von Radfahrtypen mit unterschiedlichem körperlichem Leistungsvermögen (z.B. unsportlich, normal, sportlich) erforderlich, die in den bisherigen Modellen nicht erfolgt. Zudem sind fahrdynamische Modelle, die den Einfluss der Radverkehrsinfrastruktur (z.B. Breite, Fahrbahnbelag, Kurvenradien, Steigungen, Schwellen, Störungen aus den Seitenraum) auf Geschwindigkeit, Leistungsbedarf und Komfort einer Fahrradfahrt geben, nicht Bestandteil aktueller Modelle.

Simulationssoftware-Programmen wie PTV Vissim, SUMO oder Vector DYNA4 (ehem. Tesis) ermöglichen es, den Radverkehr in Übertragung von Ansätzen aus dem Kfz-Verkehr zu simulieren. Die spezifischen Eigenschaften der Radfahrenden werden dabei mit Hilfsgrößen abgebildet, die für den Radverkehr angepasst werden. Die Darstellung basiert dabei ausschließlich auf einer heuristischen Verhaltensbeschreibung der Radfahrenden, zum Beispiel durch eine durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit und Beschleunigungswerte für das Bremsen und Beschleunigen. Eine Darstellung des Radfahrens im Verkehr und auf verschiedenen Infrastrukturen unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des Fahrtvorgangs von Radfahrenden ist mit aktuellen Simulationsprogrammen nicht möglich oder vorgesehen.

Fahrdynamische Modelle bieten die Möglichkeit, technische Systeme, Funktionen und die physikalische Interaktion von Verkehrsteilnehmern mit der Umgebung darzustellen und zu simulieren. Eine Modellierung des Radfahrens mit einer Führungsgeschwindigkeit wie in einer dynamischen Kfz-Simulation steht hingegen vor der Grundproblematik, dass die Endgeschwindigkeit von Radfahrenden sowie der Beschleunigungsvorgang abhängig von Pedaltritt und -kraft sind. Dafür ist ein entsprechender biomechanischer Modellierungsansatz für die Darstellung des Antriebs- und Bremsverhalten notwendig. Solche Ansätze finden sich in der Forschung bisher lediglich in rudimentärer Form und bilden das biomechanische Verhalten von Radfahrenden noch nicht vollständig ab. Basierend auf Vorarbeiten an der Hochschule zum Leistungsbedarf und Fahrverhalten von Radfahrenden für verschiedene Routen (Rauch und Hinger 2020) sowie Infrastrukturelemente (Eckart und Merk 2021) wird ein ganzheitlicher Ansatz zur Mikrosimulation des Radverkehrs entwickelt. Das speziell auf Radfahrende zugeschnittene, ganzheitliche, biomechanische Modell ermöglicht, die wesentlichen empirisch beobachteten Variablen des Fahrtvorgangs abzubilden.

Aktuelle Forschungsprojekte und -ansätze

An dieser Stelle werden die wichtigsten aktuellen Forschungsansätze und -projekte zur Modellierung und Simulation von Radverkehr bzw. des Verhaltens von Radfahrenden betrachtet und hervorgehoben, wie sich diese von dem hier beschriebenen Vorhaben unterscheiden. Berücksichtigt werden jene Projekte mit der größten inhaltlichen Nähe zum geplanten Projekt.

Das Projekt „*RadVerS*“ (Francke et al. 2017b) untersucht das Verhalten von Radfahrenden und nimmt eine Typologisierung in verschiedene sozio-ökonomischen Gruppen vor. Es wird unter anderem analysiert, welche Routen- und Umweltfaktoren für die Radfahrenden relevant sind. Hierzu wird auf durch Smartphones generierte Daten zurückgegriffen. Konkret werden GPS-Daten der App „*Strava*“ verwendet. Ziel ist es, grundlegende Faktoren für die Radverkehrsplanung zu ermitteln. Der Aufbau der entsprechenden Datengenerierung erfolgte im Vorgängerprojekt „*Mit Smartphones generierte Verhaltensdaten im Radverkehr*“ (Francke et al. 2017a). Diese Daten ermöglichen eine umfangreiche Erfassung der Ist-Situation und gestatten der Verkehrsplanung so eine nachfrageorientierte Arbeitsweise. Die Darstellung der erzielten Ergebnisse und die Schaffung einer einheitlichen Darstellung der Datengrundlage für die Radverkehrsplanung erfolgt mit dem Projekt „*MOVEBIS*“ (BMVI 2021). Dafür werden aus den gesammelten Daten relevante Verkehrskenngrößen ermittelt und als Sachdaten, z.B. in Form thematischer Karten, Kommunen zur Verfügung gestellt. Vergleichbare Ziele zur Generierung von Daten für den Radverkehr mittels GPS-Daten verfolgt das Vorhaben „*GPS-Daten im Radverkehr*“ (TU Dresden 2018). Die genannten Projekte untersuchen jeweils die Ist-Situation des Radfahrens basierend auf Erfahrungswerten hinsichtlich einer gegebenen, lokalen Radinfrastruktur und leiten daraus Erkenntnissen für die Radverkehrsplanung ab. Systematische Vorhersagen für die Beurteilung zukünftige Radverkehrsinfrastruktur lassen sich damit nicht oder nur unvollständig gewinnen.

Das Projekt „*SuSi3D*“ (Friel et al. 2020) betrachtet die Interaktion von Radfahrenden mit anderen Verkehrsteilnehmer:innen an Kreuzungen und Kreisverkehren und legt hierbei den Fokus auf das subjektive Sicherheitsgefühl. Dafür werden 3D-Simulationen und qualitative Interviews genutzt und der Einfluss unterschiedlicher Gestaltungsvarianten nach gängigen Regelwerken oder von „*protected bike lanes*“ untersucht. Anhand dieser Analysen sollen Gestaltungsempfehlungen für Knotenpunkte abgeleitet werden. Jedoch erfolgt in diesem Projekt die Betrachtung einzelner Verkehrssituationen, ohne Bezug zu einer vollständigen Fahrradfahrt, sowie ohne Nutzung der Ergebnisse für eine systematische Prognose des Verhaltens auf Infrastruktur.

Im Rahmen des Projekts „*RASCH*“ (Kaths 2017) soll ein Leitfaden für die Gestaltung von Radschnellwegen entstehen. Hierfür werden die verkehrlichen Eigenschaften von Radschnellwegen und die Schnittstellen dieser zur übrigen Infrastruktur analysiert. Dabei wird das Verhalten von Radfahrenden untersucht, welche in einem Fahrradsimulator eine virtuelle Nachbildung eines Radschnellwegs abfahren. Der Fokus liegt auf der Analyse einer bestehenden Infrastruktur. Die Verwendung eines Fahrradsimulators erlaubt zwar die Erprobung von zukünftigen Streckenvarianten, allerdings benötigt die Durchführung von Testfahrten mit Radfahrenden gegenüber einer vollständigen Simulation deutlich mehr Zeit. Zudem muss eine sorgfältige Auswahl der Radfahrenden getroffen werden, damit diese repräsentative Ergebnisse erzielen.

Das Projekt „*CapeReviso*“ (Drescher et al. 2020) verfolgt eine ähnliche Zielsetzung wie die zuvor genannten Projekte und untersucht die Verbesserung von Knotenpunkten und Führungsformen an der Schnittstelle zwischen Rad- und Fußverkehr. Dafür werden auch mobilitätsbedingte Emotionen auf Basis von Abstands- und Stressmessungen erfasst und mittels GPS-Tracking auf Heat-Maps dargestellt. Anhand dieser Darstellung werden Reibungspunkte identifiziert, welche als digitaler Zwilling virtuell nachgebildet werden und eine Umgebungssimulation zur Analyse von Lösungsmöglichkeiten schaffen.

Diese Lösungsmöglichkeiten sollen abschließend realisiert und bewertet werden. Dabei werden in dem Projekt einzelne Verkehrssituationen in Bezug auf die Interaktion mit Fußgänger:innen betrachtet. Der Fokus des Projekts liegt, wie bei „SuSi3D“, auf der Untersuchung von Konflikten in spezifischen Verkehrssituationen. Der Einfluss dieser Konflikte auf die gesamte Fahrradfahrt, bzw. die gesamte Streckenführung, werden nicht betrachtet.

Darüber hinaus existiert noch eine ganze Reihe weiterer Projekte, die sich isoliert mit einzelnen Aspekten des geplanten Vorhabens befassen. Hierzu zählen unter anderem die Simulationsansätze „BikeSim“ (TU Dresden 2021) der TU Dresden (aktuell in der Durchführung befindlich) sowie das Bereits im Jahr 2015 durch ein Netzwerk internationaler Projektpartner fertiggestellte Tool zur Nachhaltigkeitsbewertung von Mobilitätsprojekten „NISTO“ (Breda University of Applied Sciences et al. 2015) und die Simulation des Radfahrens in der „Virtual Cycling Environment“-Umgebung (TU Berlin 2021). Die Projekte „EcoSense“ der Universität Oldenburg (Universität Oldenburg et al. 2020) und „senseBox“ der Universität Münster (Universität Münster 2021) zielen jeweils darauf ab, mithilfe von speziell entwickelten Sensoren, Daten zum Verhalten Radfahrender zu erheben. Auf eine tiefer gehende Auseinandersetzung mit diesen Projekten wird an dieser Stelle verzichtet, die Erkenntnisse werden jedoch bei der Durchführung des geplanten Projektes berücksichtigt.

Aktuelle Forschungslücken

In der Wissenschaft und Technik fehlen aktuell Ansätze, um Fahrradfahrten auf bestehender und zukünftiger Radverkehrsinfrastruktur zu modellieren und zu bewerten. So können Mikrosimulationen die Interaktion von Radfahrenden mit anderen Verkehrsteilnehmern zwar detailliert betrachten (z.B. durch *Social-Force* Modelle oder Fahrzeugfolgemodelle), bieten allerdings keine Möglichkeit das dynamische Fahrverhalten und die körperliche Leistungsfähigkeit der Radfahrenden für Fahrten im Längsverkehr ohne oder mit nur geringen Beeinträchtigungen durch andere Verkehrsteilnehmer darzustellen. Es fehlt eine physikalische Modellierung der fahrdynamischen Zusammenhänge. Grundlage hierfür ist eine Modellierung des biomechanischen Vorgangs des Antriebs durch die Radfahrenden. Diese fahrdynamische Analyse ist für die Beurteilung von vollständigen Fahrradfahrten von zentraler Bedeutung. Damit fehlt eine Grundlage zur Beurteilung des Fahrkomforts, welche beispielsweise anhand der resultierenden Geschwindigkeit, Fahrtzeit oder nötigen Leistung erfolgen kann.

Die Abbildung der Einflussfaktoren auf das Radfahren und das Verhalten von Radfahrenden ist bereits in mehreren Projekten untersucht worden. Die bestehenden Ansätze beziehen sich dabei überwiegend auf die vorhandene Verkehrsinfrastruktur. Die Erkenntnisse zu den Einflussfaktoren und des Verhaltens von Radfahrenden werden bisher nicht systematisch für Vorhersagen für die Planung zukünftiger Radinfrastruktur oder Radverkehrsführung genutzt. Für die Analyse zukünftiger Verkehrssituationen werden Visualisierungen in Fahrradsimulatoren, z.B. als „*Digital-Twin*“, entwickelt. Der Fokus liegt dabei meist auf der Betrachtung der Interaktion zwischen Verkehrsteilnehmern auf bestehender Verkehrsinfrastruktur und der Identifikation von problematischen Streckenabschnitten. Die bisherigen Projekte konzentrieren sich größtenteils auf die Analyse einzelner besonders kritischer Verkehrssituationen, komplette Fahrradfahrten werden meist nicht betrachtet. Eine Visualisierung ganzer Streckenzüge durch Fahrradsimulatoren würde zwar ermöglichen, diese virtuell mit dem Fahrrad zu befahren, ist aber mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden.

Eine Darstellung zukünftiger Strecken ist mit dieser Vorgehensweise möglich, die Analyse ist durch die Abweichungen des Fahrverhaltens zwischen Simulation und Realität, der Beschränkung auf geringe Teilnehmer:innenzahlen sowie den hohen Arbeitsaufwand beschränkt. Eine Mikrosimulation des Radfahrens mittels eines ganzheitlichen biomechanischen Modells bietet die Möglichkeit,

verschiedene Radfahrtypen reproduzierbar und mit geringem Analyseaufwand abzubilden, um damit umfassendere Radverkehrsnetze abzubilden. Die Mikrosimulation ermöglicht auch den Vorgang einer Fahrradfahrt auf geplanter (aber noch nicht realisierter) Radverkehrsinfrastruktur virtuell durchzuspielen und zu evaluieren. Weiterhin kann die Mikrosimulation für retropektivische Analysen als Referenzmodellierung herangezogen werden. Dies ermöglicht eine schnelle, effiziente, realitätsnahe und prognosefähige Analyse des Fahrtvorgangs von Radfahrenden für vielfältige Infrastruktur.

Bisherige Arbeiten des Antragstellers:

Kompetenzen im Bereich Radverkehr

Die Hochschule Karlsruhe hat umfangreiche Kompetenzen im Bereich der Radverkehrsforschung. Diese beinhaltet die Dimensionen Radfahrende (Mensch), Fahrrad (Fahrzeug), bauliche Infrastruktur, digitale Infrastruktur und Radkultur. Diese Kompetenzen spiegeln sich in der interdisziplinären Kooperation des Institut für Verkehr und Infrastruktur (IVI) – mit umfassenden Erfahrungen in den Bereichen Radverkehrsförderung, Radverkehrsinfrastruktur und Verkehrssicherheit – mit dem Institut für Energieeffiziente Mobilität (IEEM) mit Kompetenzen im Bereich Energie- und Reichweitenmanagement für Fahrzeuge und physikalische Modellierung wider.

Modellierung des Antriebsverhaltens

Das Institut für Energieeffiziente Mobilität der HKA hat mit Prof. Dr.-Ing. Reiner Kriesten im Bereich Energie- und Reichweitenmanagement für Fahrzeuge bereits einige Projekte absolviert, wie z.B. „*PRE-E: E-Fahrzeuge* (2013-2016)“, „*Energiemanagement für Busse* (2016)“, „*E-Fahrzeuge – Erweitertes Energiemanagement* (2015-2020)“ (IEEM 2020). Dabei wurde das Projekt *PRE-E* vom BMBF als Projekt des Monats Februar im Jahre 2016 ausgezeichnet (BMBF 2016). Derzeit entwickelt Prof. Kriesten mit dem Projekt „*Easy E-Bike*“ (IEEM 2021) ein vorausschauendes Energiemanagementsystem für E-Bikes und weist damit eine sehr hohe Expertise in der Simulation der Dynamik von Fahrrädern und anderen Fahrzeugen auf.

Im Rahmen der Forschung an einer Energie- und Dynamikvorhersage für E-Bikes ist eine umfangreiche physikalische Modellierung der Längsdynamik einer E-Bike/Fahrrad-Fahrt entstanden. Diese beinhaltet Einflussfaktoren der Strecke und Umwelt auf die Fortbewegung des Fahrrads, vernachlässigt aktuell jedoch vollständig die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern oder der Infrastruktur, wie z.B. Ampeln oder Kreuzungen. Die Längsdynamik wird durch eine mathematische Modellierung der fahrphysikalischen Einflüsse dargestellt. Die Funktionsweise des Fahrrads/E-Bikes und des elektrischen Antriebssystems wird auf gleiche Weise dargestellt und basiert auf einer ausführlichen technischen Analyse. Der relevanteste Teil des Modells ist allerdings die Beschreibung und Modellierung des Antriebsverhaltens von Radfahrenden, welche den Pedaltritt sowie die Schaltungsbetätigung umfasst (Rauch und Hinger 2020). Um mit dem Simulationsmodell Fahrten auf beliebigen Strecken darzustellen, existiert zudem ein Entwicklungstool, welches die Routenplanung und Generierung der benötigten Streckeneigenschaften ermöglicht. So lassen sich E-Bike-Fahrten mit einem realistischen Geschwindigkeitsprofil sowie Leistungs-/Anstrengungsprofil des Radfahrenden erzeugen.

SensorBikes zur Erhebung Fahrverhalten von Radfahrenden

Das Institut für Verkehr und Infrastruktur der HKA verfügt mit dem Verkehrsökologen Prof. Dr. Jochen Eckart über umfangreiche Kompetenzen zur Verhaltensdynamik von Fußgänger:innen und Radfahrenden, zur effektiven Förderung des Fuß- und Radverkehrs, zur Planung und Dimensionierung von Radverkehrsanlagen sowie der Analyse der Verkehrssicherheit. Prof. Eckart war federführend an der erfolgreichen Einwerbung einer (von sieben) *BMVI*-Stiftungsprofessuren Radverkehr an der

Hochschule Karlsruhe beteiligt und vertritt diese gegenwärtig. Umfassende Expertise in der Gestaltung und Dimensionierung von gemeinsamer Infrastruktur für den Rad- und Fußverkehr wurden im F-E-Vorhaben „*Reallabor GO-Karlsruhe*“ (MWK BW) gesammelt (IVI 2020), welches im Jahr 2020 als Top 3 im Deutschen Nachhaltigkeitspreis Forschung sowie im Jahr 2019 mit dem Deutschen Ingenieurpreis Straße und Verkehr in der Kategorie „*Verkehr im Dialog*“ (BSVI 2019) ausgezeichnet wurde.

Um die notwendigen Daten zur Modellierung des Fahrverhaltens Radfahrender zu erheben, sind empirische Erhebungen notwendig. Das nötige Equipment hierfür wurde bereits im Projekt *SensorBike* am Institut für Verkehr und Infrastruktur an der Hochschule Karlsruhe entwickelt, welches durch die Carl-Zeiss-Stiftung und die Dr.- Schmidt-Stiftung für Verkehr und Umwelt gefördert wurde. Beim *SensorBike* handelt es sich um ein mit Messtechnik ausgestattetes Fahrrad, welches es ermöglicht, Radfahren aus Perspektive der Radfahrenden zu erforschen. Dies umfasst die Einflussgrößen, die sich auf den Energiebedarf beim Radfahren auswirken (Längsneigung, Windgeschwindigkeit, Fahrbahnoberfläche usw.), die Einflussgrößen, die den Fahrkomfort der Radfahrenden bestimmen (Witterung, Klima usw.), die Einflussgrößen der Verkehrssicherheit (Seitenabstände, Bremsbeschleunigungen, Bremssensor usw.) sowie die Wechselwirkungen zwischen Radfahrenden (Windschatten, Verkehrskonflikte usw.) und ermöglicht damit, das Verhalten der Radfahrenden zu erfassen und in Bezug auf die Umfeldbedingungen zu erklären. Die *SensorBikes* wurden bereits erfolgreich in Drittmittelvorhaben (Wissenschaftliche Begleitung SWR Mitmachaktion #besser Radfahren 2021) (SWR 2021) sowie für studentische Forschungsvorhaben und Abschlussarbeiten eingesetzt. Beispielsweise wurden der Energieaufwand und Geschwindigkeit auf unterschiedlichen Führungsformen des Radverkehrs (Hauenstein et al. 2019), das subjektive Sicherheitsempfinden der Radfahrenden in unterschiedlichen Verkehrssituationen (Merk 2019), ein Vergleich der Messung und Simulation des Leistungsbedarfs von Radfahrenden (Hafelder 2021) und die Feinstaubbelastung von Babys beim Transport auf dem Rad (Sommer et al. 2020) analysiert. Für die geplanten Erhebungen im Rahmen des Projektes *Modelo-Rad* ist mit den *SensorBikes* das erforderliche Messequipment vorhanden, welches sich im Einsatz bewährt hat.

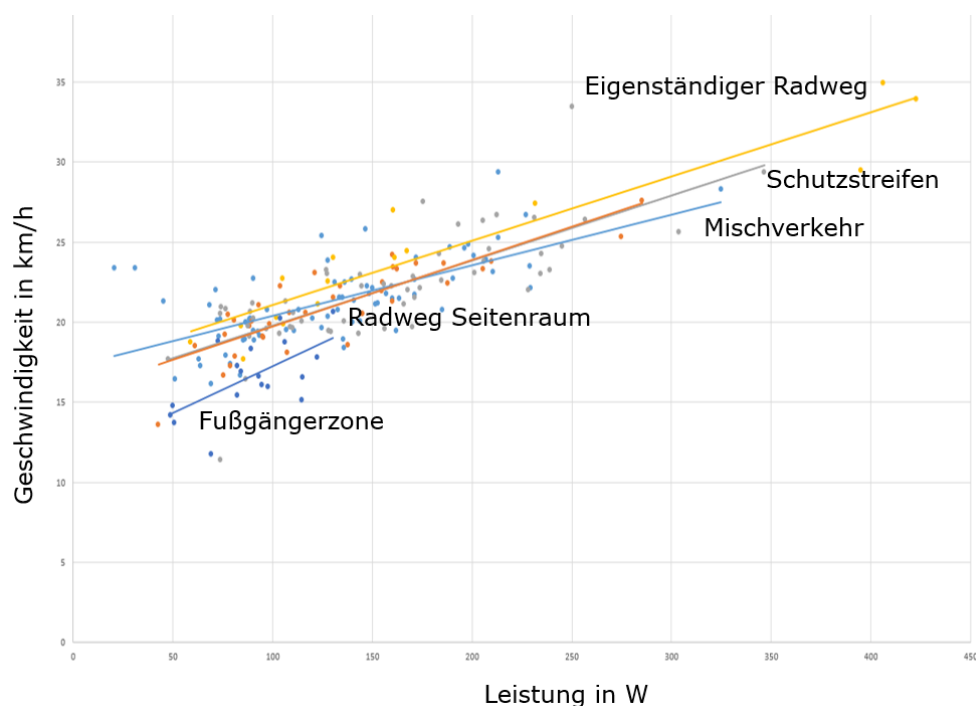


Abbildung 1: Mit dem *SensorBike* erhobener Energieaufwand auf unterschiedlichen Führungsformen (Hauenstein et al. 2019)

Ausführliche Beschreibung der Arbeitsplanung

Projektmanagement

Zu Beginn des Vorhabens werden die organisatorischen Strukturen für das Projektmanagement etabliert. Das Vorhaben wird durch eine Leitungsebene mit Mitgliedern des Instituts für Energieeffiziente Mobilität (*IEEM*) und des Instituts für Verkehr und Infrastruktur (*IVI*) gelenkt. Ansprechpartner des Gesamtprojekts ist Prof. Dr. Reiner Kriesten. Die Vertretung der Projektleitung hat Prof. Dr. Jochen Eckart inne. Die Mitglieder der Leitungsebene und weitere Mitarbeitende organisieren in der Projektlaufzeit alle ein bis zwei Monate (bzw. nach Bedarf auch häufiger) Projekttreffen. Der Leitungsebene untersteht das Monitoring des Arbeitsplans. Zudem werden die Zwischenberichte, die Meilensteine sowie der Endbericht durch die Leitungsebene gemeinsam abgenommen.





Die Entwicklungen und Arbeiten im Projekt erfolgen unter Anwendung agiler Methoden des Projektmanagements und mit einem iterativen Ansatz über alle Arbeitspakete hinweg und in enger Abstimmung der Projektpartner. Bei den regelmäßigen Projekttreffen erfolgt ein Review des Projektstandes, des Projektziels und der für das Projektziel notwendigen Anforderungen. Diese werden in feingranulare Aufgaben unterteilt, abgearbeitet und dokumentiert, so dass eine fortlaufende Überwachung des Projektstandes gewährleistet wird. Die verantwortliche Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete erfolgt durch die jeweils benannten Bearbeitenden. Weiterhin wird ein Risikomanagement durchgeführt.

Als assoziierte Praxispartner sind die Kommunen Karlsruhe, Lahr und Offenburg sowie die Arbeitsgemeinschaft Fahrrad- und Fußgängerfreundlicher Kommunen in Baden-Württemberg e. V. (*AGFK-BW*) über die gesamte Dauer des Projektes eingebunden. Die Praxispartner bieten Expertise in ausgewählten Themenfeldern und gewährleisten, dass der Praxisbezug aus vielfältigen Perspektiven gewahrt bleibt. Ein kontinuierlicher Austausch mit den begleitenden Praxispartnern wird durch halbjährliche Videokonferenzen sowie gezielte Einbindung in die Arbeitspakete zur Ermittlung der Anforderungen und Erhebungen. Die Arbeitsgemeinschaften Fahrrad- und Fußgängerfreundliche Kommunen Baden-Württemberg (*AGFK-BW*) hat zudem angeboten, das Projekt als Multiplikatorin für die Kommunen und Regionen in Baden-Württemberg zu begleiten und einen Austausch mit den AGFKs in den weiteren Bundesländern zu gewährleisten.




Zudem kann auf Wunsch des BAG ein fachlicher Begleitkreis eingerichtet werden, in dem weitere Forschungseinrichtungen eingebunden werden, die sich mit der Simulation des Radverkehrs befassen. Dieser soll das Vorhaben bei praktischen und inhaltlichen Herausforderungen in der Projektdurchführung unterstützen. Der Begleitkreis wird im Rahmen von (virtuellen) Treffen im Anschluss an die Meilensteine eingebunden. Bei Bedarf können Vorschläge für die ca. 6 bis 8 Mitglieder eines solchen Begleitkreises (z. B. Thomas Obst High Performance Computing Center (HLRS) University of Stuttgart (Open Bike Sensor), Ansprechpartner FGSV AK 2.5.1 z. B. Peter Gwiasda oder Jörg Thiemann-Linden, BMVI Stiftungsprofessuren Radverkehr Prof. Heather Caths Uni Wuppertal) unterbreitet werden.

Um eine enge Kommunikation mit dem Projektträger *BAG* und dem Fördermittelgeber BMVI zu gewährleisten, sind regelmäßige Treffen und Besprechungen vorgesehen. Zum Projektauftritt wird ein Auftaktgespräch mit den Projektbeteiligten dem *BAG* und dem BMVI als Treffen oder Videokonferenz durchgeführt. An diesem Termin wird der Projektablauf besprochen. Im Ergebnis des Auftakttreffens wird der vorliegende Arbeitsplan aktualisiert und konkretisiert. Im weiteren Projektverlauf erfolgen nach Abschluss der Meilensteine Projektbesprechungen, die je nach Bedarf als Treffen vor Ort oder als Video-/Telefonkonferenzen durchgeführt werden. Diese Treffen werden von der Projektleitung


vorbereitet, protokolliert und abgestimmt. Vorbehaltlich einer genaueren Terminierung sind folgende Besprechungen vorgesehen:

-  Auftakttreffen zum Projektablauf
-  Projektbesprechung Anforderungen Praxispartner und Einflussfaktoren Radfahrverhalten
-  2. Projektbesprechung zur Modellierung des Radverkehr und der Validierung
-  Abschlussbesprechung zur Anwendungsumgebung und Gesamtvorhaben

Das Projektmanagement umfasst ein detailliertes, umfangreiches Berichtswesen. Zwei Zwischenberichte dokumentieren den Projektverlauf, stellen die erarbeiteten Ergebnisse der Arbeitspakete und Meilensteine dar und dienen als Diskussionsgrundlage für Projekttreffen. Der Endbericht dokumentiert umfassend die Arbeitsschritte, stellt die Ergebnisse aller Arbeitspakete dar und dokumentiert das entwickelte Mikrosimulationstool. Ein Entwurf des Endberichts wird sechs Wochen vor Projektende und eine endgültige Version zum Projektende vorgelegt. Das Berichtswesen beinhaltet:

-  1. Zwischenbericht Anforderungen Praxispartner und Einflussfaktoren Radfahrverhalten
-  2. Zwischenbericht zur Modellierung des Radverkehr und der Validierung
-  Endbericht zum Gesamtvorhaben

Vorhabenbezogene Ressourcenplanung (Arbeitsplan)

Das Projekt hat eine Laufzeit von insgesamt drei Jahren. Es wird über die gesamte Projektlaufzeit von zwei wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen bearbeitet. Diese werden von wissenschaftlichen Hilfskräften mit Bachelorabschluss unterstützt. Das Projekt gliedert sich in sechs Arbeitspakete :

Arbeitspaket

AP 1: Identifikation der Anforderungen der Praxispartner

AP 2: Einflussfaktoren des Radfahrverhaltens

AP 3: Ganzheitliche Modellierung des Radfahrens

AP 4: Validierung des Simulationsmodells

AP 5: Entwicklung der Anwendungsumgebung

AP 6: Dokumentation, Webseite und Handbuch

Ablaufplanung/ggf. Meilensteinplanung

Um eine hohe Praxisrelevanz des Simulationstools sicherzustellen, wird eine enge Zusammenarbeit mit den Praxispartnern der Kommunen Karlsruhe, Lahr und Offenburg sowie der AGFK-BW angestrebt. So findet in Arbeitspaket 1 eine Identifikation der Anforderungen der Planungspraxis für die Mikrosimulation des Radverkehrs statt. Die Ergebnisse fließen in die weiteren Arbeitspakete ein.

Die zentralen Arbeitsschritte zur Entwicklung des Simulationstools sind die Arbeitspaket 2, 3 und 4. Dabei wird auf Basis empirischer Erhebungen der Einflussfaktoren für den Radverkehr (Arbeitspaket 2) eine ganzheitliche Modellierung des Radfahrens aus dem Blickwinkel der Radfahrenden entwickelt (Arbeitspaket 3). Während der Modellierungsaktivität erfolgt eine kontinuierliche Validierung und

Applikation des Modells (Arbeitspaket 4). Genutzt werden Methoden der agilen Entwicklung, sodass die Arbeitspakete 2, 3 und 4 parallel und zusammenhängend bearbeitet werden. Konkret werden die jeweiligen Einflussfaktor identifiziert, im Modell dargestellt und die Simulationsergebnisse validiert. Dieser Vorgang erfolgt zirkulär mit reziproker Bezugnahme auf Zusammenhänge.

Für die Anwendung als Simulationstool wird in Arbeitspaket 5 eine Anwendungsumgebung für die aufgebaute Modellierung erstellt. Bezüglich des Funktionsumfangs und der Bedienbarkeit des Tools fließt Feedback der Praxispartner aus Arbeitspaket 1 mit in die Entwicklung ein.

Über die gesamte Projektlaufzeit wird über eine Webseite sowie veröffentlichten Artikeln Öffentlichkeitsarbeit betrieben. Dies dient der Informationsbereitstellung und der Bewerbung des Projekts sowie als Plattform einer möglichen Verbreitung des Tools. Zudem wird ein Handbuch zur Benutzerführung für das Mikrosimulationstool erstellt.



Arbeitspaket 1: Identifikation der Anforderungen der Praxispartner (Monate 1-6; Lead IVI)

Um ein möglichst praxisnahes und vielseitig nutzbares Tool zu entwickeln, werden im ersten Arbeitspaket mit Hilfe der Praxispartner detaillierte und konkrete Anforderungen definiert. Hierzu werden Expert:inneninterviews durchgeführt, um zu identifizieren, welche Anforderungen das Mikrosimulationstool für den Radverkehr erfüllen sollte, damit es in Bezug auf Ergebnisse, Schnittstellen, Funktionen und Anwendungsszenarien die kommunale Planungspraxis der Radverkehrsförderung unterstützt.

Im Rahmen der Expert:inneninterviews werden die erforderlichen Schnittstellen und Funktionalitäten des Simulationstools betrachtet. Analysiert wird, wie das Simulationstool durch die zukünftigen Anwender:innen benutzt werden soll. Betrachtet werden die allgemeine Bedienbarkeit der Anwendung sowie die Visualisierungen der Ergebnisse. Zudem werden in den Expert:inneninterviews die bisher entwickelten Anwendungsszenarien verifiziert:

- Entscheidungsunterstützung für in Planung befindliche Trassenvarianten für Radrouten/Infrastruktur (Identifikation der Variante zur Minimierung von Reisezeit, Leistungsbedarf etc.),
- Identifikation des Optimierungsbedarfs bestehender und zu planender Radrouten/Infrastruktur im Hinblick auf Zeitverluste, Leistung und Sicherheit,
- Gebietsweite Evaluation der Radverkehrsinfrastruktur und Identifikation von Abschnitten mit Verbesserungspotenzial (hoher Leistungsbedarf, große Reisezeitverluste etc.),
- Abschätzung der Reisezeiten im Radverkehr für Reisezeitvergleiche mit anderen Verkehrsmitteln,
- Ermitteln der Wirkung von Lückenschlüssen und Ausbaumaßnahmen im Radverkehrsnetz auf Reisezeit und Leistungsbedarf als Basis für Kosten-Nutzen-Betrachtungen.

Im Rahmen der Expert:inneninterviews sollen Kommunen mit einer möglichst großen Bandbreite an Eigenschaften und Anforderungen erfasst werden. Ausgangspunkt bilden die drei Partnerkommunen Karlsruhe, Offenburg und Lahr, welche die Anwendungsfälle Großstadt, Mittelstadt sowie Grundzentrum abdecken. Weitere Kommunen werden mit Unterstützung der AGFK-BW gewonnen. Hierbei wird nach dem Prinzip der maximalen Kontrastierung verfahren und Angehörige einer möglichst großen Vielfalt an Kommunen hinsichtlich der Größe (Einwohner:innenzahl) und der Lage (städtisch/ländlich) sowie radverkehrsspezifischer Voraussetzungen (Anteil des Fahrrads am Modal Split) einbezogen. Zudem werden im Bereich Radverkehr tätige Ingenieurbüros eingebunden. Die Anzahl der Interviews richtet sich nach dem Erreichen einer empirischen Sättigung. Dementsprechend werden Interviews so lange geführt, bis weitere Erhebungen keine neuen (relevanten) Aspekte mehr liefern. Insgesamt werden voraussichtlich fünf bis zehn strukturierte Expert:inneninterviews geführt.

Für die Expert:inneninterviews wird ein strukturierter Gesprächsleitfaden erstellt und einem Pre-Test unterzogen. Die Interviews werden als Treffen vor Ort oder als Videokonferenzen durchgeführt. Die Ergebnisse der Expert:inneninterviews werden protokolliert und für Inhalte, Schnittstellen, Funktionen und Anwendungsszenarien des Mikrosimulationstools zusammengefasst.

Meilenstein 1 [...]

Der Meilenstein 1 umfasst eine detaillierte Darstellung der Anforderungen der Praxisakteure an die Mikrosimulation des Radverkehrs. Diese ist von zentraler Bedeutung für die empirischen Erhebungen zum Fahrverhalten Radfahrender (AP 2) und fließt zugleich direkt in die funktionale Entwicklung des Simulationsmodells (AP 3) sowie die erforderliche Dokumentation (AP 6) ein.

Arbeitspaket 2: Erhebung Einflussfaktoren des Radfahrverhaltens ([...]); Lead IVI)

Das individuelle Fahrverhalten Radfahrender wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Diese Einflussfaktoren stehen in einem engen Zusammenhang und wirken sich – je nach Radfahrtyp – höchst unterschiedlich auf das Fahrverhalten aus.

Wie im Kapitel „Stand der Wissenschaft und Technik“ dargestellt, wurden bereits erste Untersuchungen zu den Einflussfaktoren des Fahrverhaltens von Radfahrenden durchgeführt. So liegen bereits Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen dem Fahrverhalten Radfahrender und Eigenschaften der Infrastruktur vor. In einer systematischen Literaturanalyse wird deutsche und internationale Fachliteratur sowie Forschungsberichte zu den Themenfeldern Fahrverhalten von Radfahrenden, Radverkehrsinfrastruktur und Radfahrtypen erfasst und analysiert. In einer synoptischen Aufarbeitung werden die bekannten Einflussfaktoren des Fahrverhaltens von Radfahrenden ermittelt. Berücksichtigt werden auch die jeweils genutzten Erhebungsmethoden. Basierend auf dieser Literaturanalyse werden erste Hypothesen zu den bedeutenden Einflussfaktoren abgeleitet.

Um die Ergebnisse der Literaturanalyse zu ergänzen und zu vertiefen, sind weitere Erhebungen erforderlich. So fehlen voraussichtlich Informationen, welche für die Modellierung des Radfahrens auf Grundlage eines biomechanischen Modells notwendig sind. Dies sind Daten über das Fahrverhalten selbst: Leistungsfähigkeit, Beschleunigungs- und Bremsverhalten, Verhalten in Kurven und Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmenden. Zudem fehlen Informationen zum Zusammenhang zwischen dem Fahrverhalten und den Eigenschaften der Verkehrsinfrastruktur. Diese Daten werden im zweiten Arbeitspaket erhoben. Die in der Literaturanalyse gebildeten Hypothesen werden aufgegriffen. Die Erhebung der Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten von Radfahrenden findet mithilfe der *SensorBikes* statt. Genutzt wird eine zweigleisige Erhebungsstrategie, die einerseits die Befahrung eines zuvor festgelegten Parcours im Karlsruher Stadtgebiet sowie den Einsatz von *SensorBikes* als „Pendlerad“ in verschiedenen Kommunen umfasst.

Für diese beiden Erhebungen werden Proband:innen über Multiplikatoren und Social Media akquiriert. Die Interessierten werden mittels eines Fragebogens entsprechend Ihres Radfahrverhaltens typisiert. Die Proband:innen werden so ausgewählt, dass im Hinblick auf die soziodemographischen Eigenschaften sowie die radfahrerischen Voraussetzungen ein möglichst großes Spektrum abgedeckt wird. Es wird angestrebt, einen Pool von rund 100 Personen einzubinden.

Befahren von zuvor festgelegten Parcours im Karlsruher Stadtgebiet

Das Befahren eines zuvor festgelegten Parcours ermöglicht die gezielte Sammlung von Daten zum Fahrverhalten von Radfahrenden in unterschiedlichen infrastrukturellen Situationen (Führungsformen, Kurven, Knotenpunkten usw.). Dafür werden Teststrecken im Karlsruher Stadtgebiet ausgewählt, die sich durch unterschiedliche Eigenschaften der Infrastruktur auszeichnen. Die

einzelnen Parcours werden je Proband:in im Rahmen der Erhebung bis zu drei Mal befahren. Das mehrmalige Befahren hat den Vorteil, dass die Route ab dem zweiten Durchgang bekannt ist und so nicht mehr oder weniger stark mit einer Beeinflussung der Ergebnisse durch die Routenfindung zu rechnen ist. Um unterschiedliche Witterungsbedingungen abzubilden, werden mehrere Erhebungswellen im Laufe eines Jahres durchgeführt. Für die Erhebungen werden die SensorBikes mit Sensoren zur Messung folgender Parameter ausgestattet:

- Strecke und Distanz (GPS)
- Geschwindigkeit
- Leistung
- Überholabstände
- Kameras
- Erschütterungen

Einsatz von SensorBikes als „Pendlerad“

Da eine Erhebung auf zuvor festgelegten Strecken immer einen künstlichen Charakter hat, welcher sich unter Umständen auch auf das Fahrverhalten der Proband:innen niederschlägt, wird eine weitere Erhebungskampagne in den Kommunen Karlsruhe, Offenburg und Lahr durchgeführt. Dabei werden die *SensorBikes* wochenweise an Personen verliehen, die diese in ihrem Alltag nutzen. So werden Daten aus dem radfahrerischen Alltag der Proband:innen erhoben. Da die unterschiedlichen Sensoren vor der Fahrt aktiviert werden müssen werden die *SensorBikes* zur Nutzung im Alltag mit weniger Sensoren ausgestattet als bei der Befahrung der festgelegten Parcours. Gemessen werden die folgenden Parameter:

- Strecke und Distanz (GPS)
- Geschwindigkeit
- Leistung
- Überholabstände

Im Rahmen der beiden Erhebungen werden umfangreiche Daten zum Fahrverhalten Radfahrender ermittelt. Die Datenqualität wird durch die Kalibrierung und grundlegende Filterung der Sensoren gewährleistet. Die Datenspeicherung erfolgt in Echtzeit auf einer Datenplattform. Die Rohergebnisse der verschiedenen Erhebung werden auf ihre Vollständigkeit und Plausibilität geprüft und zusammengeführt. Daran schließt eine deskriptive statistische Analyse der Daten an.

Mittels einer Clusteranalyse der Daten wird eine statistische Typenbildung der Radfahrenden nach ihrem Fahrverhalten vorgenommen. Dies ermöglicht, verschiedene Radfahrtypen gesondert in der Simulation des Fahrverhaltens zu berücksichtigen. Damit kann die Spannbreite des Fahrverhaltens in unterschiedlich zusammengesetzten „*Flotten*“ von Radfahrenden berücksichtigt werden.

Zudem erfolgt eine multivariate Analyse der Daten, bei der die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Eigenschaften der Radverkehrsinfrastruktur und dem Fahrverhalten der Radfahrenden identifiziert und auf mögliche Wechselwirkungen hin untersucht werden. Dabei erfolgt eine Prüfung der entwickelten Hypothesen zu den Einflussfaktoren. Im Ergebnis wird identifiziert, welche Einflussfaktoren für die Mikrosimulation von Bedeutung sind und welche Zusammenhänge zwischen dem Fahrverhalten der Radfahrenden und verschiedenen Einflussfaktoren bestehen. Dies bildet die Grundlage für eine realitätsnahe Modellierung des Fahrverhaltens. Im Sinne der Methoden der agilen Entwicklung, fließen die ersten Ergebnisse aus den Erhebungen bereits parallel in die Entwicklung des Modells ein, während noch die weiteren Erhebungen laufen.

Meilenstein 2 (■)

In Meilenstein 2 werden die Ergebnisse der Literaturanalyse sowie der eigenen empirischen Erhebung zu den unterschiedlichen Einflussfaktoren für das Fahrverhalten Radfahrender zusammengefasst. Die Daten werden als Basis für die ganzheitliche Modellierung des Radverkehrs aufbereitet.

Die Ergebnisse aus Meilenstein 1 „den Anforderungen der Praxisakteure“ sowie Meilenstein 2 „den Einflussfaktoren für das Fahrverhalten“ werden im ersten Zwischenbericht zusammengefasst und auf einem Treffen mit dem Auftraggeber diskutiert.

Arbeitspaket 3: Ganzheitliche Modellierung des Radfahrens (■; Lead IEEM)

Das Mikrosimulationstool für den Radverkehr besteht aus vier Teilmodellen: ein Modell für den Radfahrenden, ein Fahrrad/E-Bike-Modell, ein Strecken-/Umgebungsmodell und ein Infrastrukturmodell, welche gesamtheitlich zu einem gemeinsamen Modell zusammengeführt werden. Die vier Teilmodelle werden nachfolgend als eigene Arbeitspakete beschrieben. Im Sinne der agilen Entwicklung werden die Arbeitspakete 2, 3 und 4 parallel und zusammenhängend bearbeitet, so dass vom Projektstart an mit der Entwicklung von Grundmodellen gestartet werden kann. Die Modellierungsaktivitäten werden mit einer kontinuierlichen Validierung und Applikation des Modells begleitet.

AP3.1 Strecken-/Umgebungsmodell: Die Modellierung der Umgebungs- und Streckeneinflüsse (z.B. Wind, Wetter, Untergrund, Steigung usw.) für eine Fahrradfahrt, erfolgt auf physikalischer Basis. Im Ergebnis werden die sich aus den Umgebungs- und Streckeneinflüssen ergebenden Fahrwiderstände für das Radfahren ermittelt.

AP3.2 Modell des Radfahrenden: Auf Basis der empirischen Erhebungen, erfolgt die ganzheitliche Beschreibung und Modellierung des Fahrtvorgangs der Radfahrenden. Der bestehende Ansatz zur biomechanischen Beschreibung des Antriebs durch die Fahrerin/den Fahrer wird dafür finalisiert und es werden repräsentative Typen von Radfahrenden erstellt. Hierfür werden die Ergebnisse der Erhebung für verschiedene Radfahrtypen, von gelegentlich bis regelmäßig und sportlich fahrenden Personen berücksichtigt und deren Antriebscharakteristik in der Simulation abgebildet. Die Differenzierung der Radfahrtypen ermöglicht das Fahrverhalten für unterschiedliche Zusammensetzung der Fahrradflotte abzubilden. Zudem erfolgt die Modellierung des operativen Handlings des Radfahrens, wie beispielsweise die Darstellung von Brems-, Beschleunigungs- oder Rollvorgängen durch die Radfahrenden.

AP 3.3 Fahrrad/E-Bike Modell: Die funktionale Modellierung des Fahrrads, insbesondere von dessen spezifischen Funktionen und Eigenschaften, wie beispielsweise der Gangschaltung wird erstellt. Die Modellierung wird dabei so gestaltet, dass neben konventionellen Fahrrädern auch E-Bikes dargestellt werden können. Dabei besteht die Möglichkeit sowohl Pedelecs als auch S-Pedelecs darzustellen. Die beiden Fahrradtypen unterscheiden sich dadurch, dass Pedelecs per Elektromotor eine Unterstützung bis 25 km/h anbieten, S-Pedelecs bis 45 km/h. Sie verfolgen das gleiche Funktionsprinzip und unterscheiden sich lediglich bezüglich der rechtlichen Einordnung und den daraus folgenden geltenden Betriebsbeschränkungen. Eine Einbindung ist daher mit geringem Aufwand möglich.

AP3.4 Infrastrukturmodell: Das Verhalten der Radfahrenden in Abhängigkeit von der Radverkehrsinfrastruktur und der Verkehrssituation, bzw. Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern wird im Modell abgebildet. Dafür wird die Modellierung der im Rahmen von Arbeitspaket 2 ermittelten Einflussfaktoren in Zusammenspiel mit der Modellierung des Verhaltens der Radfahrenden erstellt, sodass spezifische Fahrszenarien realistisch simuliert werden können. Basierend auf empirischen Erhebungen werden für die Beschreibung von Radfahrenden verschiedene

Verhaltenstypen definiert (z.B. Vorsichtig, Risikobereit, Aggressiv) und erstellt, sodass anhand des Antriebs- und Verhaltenstyps eine repräsentative Simulation für verschiedene Radfahrtypen zur Verfügung steht. Das Infrastrukturmodell umfasst verschiedene typische Elemente der Radverkehrsinfrastruktur wie verschiedene Führungsformen des Radverkehrs im Längsverkehr (Radfahrstreifen, Schutzstreifen, Radwege, gemeinsame Geh- und Radwege, Fahrradstraßen, Mischverkehr usw.) mit unterschiedlicher baulicher Ausgestaltung (Breiten, Schutzabständen, Sichtfeldern, Kurvenradien, Bordhöhen, Übergänge usw.). Zudem werden unterschiedliche Intensitäten der Flächennutzung durch andere Verkehrsteilnehmer (Kfz-Verkehrsmengen, Lkw-Anteil, ruhender Verkehr, Fußverkehrsmengen, Radverkehrsmengen, zulässige Höchstgeschwindigkeit usw.) und die dadurch entstehenden Interaktionen berücksichtigt. Weiterhin werden verschiedene Knotenpunktformen (Einmündungen, Überfahrten, Kreuzungen, Kreisverkehre usw.) mit unterschiedlichen Führungsformen des Radverkehrs (Mischverkehr, eigenständige Linksabbieger, usw.) sowie unterschiedliche Verkehrsregelungen (Vorfahrt, LSA usw.) berücksichtigt.

AP3.5 Gemeinsames Modell: Schlussendlich entstehen insgesamt vier Teilmodelle: ein Modell für die Radfahrenden, ein Fahrrad/E-Bike-Modell, ein Strecken-/Umgebungsmodell und ein Infrastrukturmodell, welche zu einem gemeinsamen Modell zusammengeführt werden. Im Ergebnis ermöglicht dies eine hochauflösende, strecken- und radfahrtypenabhängige Simulation des Fahrtvorgangs von Radfahrenden. Das Modell bildet eine Fahrt auf einer spezifischen Strecke aus Perspektive von Radfahrenden für die Größen wie Geschwindigkeit, Fahrzeit, benötigte Antriebsleistung, aufgebrachte Anstrengung usw. ab.

Arbeitspaket 4: Validierung des Simulationsmodells (III): Lead IVI

Innerhalb der verschiedenen Entwicklungsschritte werden das gemeinsame Modell und die Teilmodelle kontinuierlich validiert und durch Applikation von Parametern unterstützt. Dafür findet eine ständige Überprüfung der Simulationsergebnisse des Modells anhand empirischer Erhebungen statt. Hierfür werden konkrete Fahrscenarien und Teststrecken mit unterschiedlichen infrastrukturellen Voraussetzungen in den Partnerkommunen genutzt. Dabei werden von der Erhebung in Arbeitspaket 2 abweichende Teststrecken genutzt, um die Ergebnisse an einer Vielzahl von Strecken abzugleichen. Die Auswahl der Teststrecken sowie der für die Erhebung erforderlichen Proband:innen erfolgt vergleichbar dem in Arbeitspaket 2 beschriebenen Vorgehen.

Die Validierungsaktivitäten erfolgen jeweils mehrstufig. So wird jede modellierte Funktion und jedes modellierte Verhalten erst einzeln und dann im Kontext des Gesamtmodells durch Simulation auf physikalische und funktionale Richtigkeit überprüft. Anschließend wird die durch das Teilmodell dargestellte Funktion oder das Verhalten mit der realen Funktion und dem realen Verhalten auf den Teststrecken verglichen. Abschließend wird eine Überprüfung der Teilmodelle im Rahmen des Gesamtmodells durchgeführt und anhand der Realität überprüft, ob die Fahrt korrekt dargestellt wird.

Die Applikation des Modells erfolgt laufend, parallel zu Modellierung und Validierung, anhand der vorliegenden Daten aus empirischer Erhebung und weiteren Testfahrten.

Meilenstein 3 (III)

Der dritte Meilenstein wird erreicht, wenn die funktionale Entwicklung des Simulationsmodells abgeschlossen ist. Dies beinhaltet, dass die generischen Modelle vollständig erstellt und validiert sind. Realitätsnahe Fahrscenarien wurden simuliert und an geeigneten Teststrecken überprüft.

Die Ergebnisse aus Meilenstein 3 werden im zweiten Zwischenbericht zusammengefasst und auf einem Treffen dem Zuwendungsgeber präsentiert.

Arbeitspaket 5: Entwicklung der Anwendungsumgebung ([...]; Lead IEEM)

Sobald die Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells abgeschlossen ist wird eine anwendungsfreundliche Benutzer:innenoberfläche mit Konfigurations-, Ausführungs-, und Unterstützungs-Funktionen aufgebaut. Dies ermöglicht es, das Simulationsmodell umfänglich zu nutzen. Für die Entwicklung der Anwendungsumgebung werden die Empfehlungen der Expert:inneninterviews aus Arbeitspaket 1 zu Aufbau und Bedienbarkeit des Modells sowie die Darstellung der Ergebnisse berücksichtigt. Die Funktionalität und die Bedienbarkeit des Simulationstools werden mit den beteiligten Praxispartnern abgestimmt und mit diesen getestet.

Die Eingabeseite der Benutzer:innenoberfläche wird betrachtet. Für das Simulationsmodell wird ein datengestütztes Tool entwickelt, mit welchem die Erstellung und Konfiguration der Radfahrstrecken erfolgt. Dies ermöglicht sowohl die Abbildung bestehender als auch zukünftiger Radverkehrsinfrastruktur. Weitere Funktionen gestatten das Erstellen und Konfigurieren verschiedener Fahrscenarien sowie der berücksichtigten Radfahrtypen. In Abhängigkeit von den Anforderungen der Anwender:innen ist voraussichtlich eine Schnittstelle für einen einfachen Datentransfer aus GIS-Anwendungen vorgesehen.

Die Ausgabeseite der Benutzer:innenoberfläche wird entwickelt. Die Simulationsergebnisse werden für die Benutzer:innenoberfläche aufbereitet und visualisiert, sodass eine erste Betrachtung und Beurteilung der Ergebnisse möglich ist. Zudem werden Funktionen für die Speicherung und den Datentransfer für eine detaillierte Analysen vorgesehen. Wenn von den Anwender:innen gefordert, wird ein einfacher Datentransfer zu GIS-Anwendungen sowie Tabellenkalkulationsprogrammen vorgesehen, sodass die Ergebnisse der Simulation in den vorhandenen Standard-Programmen dargestellt, weiterverarbeitet oder dokumentiert werden können. Dies ermöglicht die Ergebnisse für laufende Vorhaben der Planungspraxis wie die Planung und Bewertung von Trassenvarianten für Radrouten/Infrastruktur oder die gebietsweite Evaluation der Radverkehrsinfrastruktur zu nutzen.

Meilenstein 4 ([...])

Der Meilenstein 4 ist erreicht, wenn die Benutzer:innenoberfläche des Simulationstools aufgebaut ist, welche es ermöglicht, dieses umfänglich zu nutzen. [...]

Arbeitspaket 6: Dokumentation, Webseite und Handbuch ([...]; Lead IVI)

Um die Anwendung und Verbreitung des Simulationstools zu unterstützen, wird der Forschungs- und Entwicklungsprozess umfassend dokumentiert und präsentiert. Damit soll die Anwendung des Mikrosimulationstools in der Planungspraxis in Kommunen und Regionen deutschlandweit ermöglicht und gefördert werden. Die Veröffentlichungsformen und Austauschformate des Vorhabens werden auf die Erfordernisse verschiedener Adressaten zugeschnitten.

Für die interessierte Fachöffentlichkeit, Praxisakteure sowie die allgemeine Öffentlichkeit wird für die gesamte Projektlaufzeit und bei entsprechendem Bedarf auch darüber hinaus eine Projektwebseite erstellt. Ziel der Webseite ist es, die praktische Nutzung der Ergebnisse des Vorhabens zu fördern. Diese Webseite dient damit der Bewerbung und weiteren wissenschaftlichen und technischen Verwertung des Tools. Dafür werden die wichtigsten Informationen zu Aufbau, Funktion, Anwendung und Einsatzmöglichkeiten des Simulationstools dargestellt und der Bezug des Simulationstools ermöglicht. Die Webseite informiert zudem über den aktuellen Stand des Vorhabens und präsentiert die Zwischen- und Endergebnisse.

Als Hilfestellungen für die Anwendung des Simulationstools durch die Praxisakteure wird ein Handbuch zur Verfügung gestellt. Praktische Fragestellungen der Planung, Durchführung, Auswertung und

Die Ergebnisse des Vorhabens werden in wissenschaftlichen Artikeln in Fachzeitschriften veröffentlicht. Pro Jahr werden zwei Veröffentlichungen angestrebt. Zudem werden die Ergebnisse auf drei nationalen und einer internationalen Konferenz vorgestellt. In diesem Rahmen wird der erreichte Kenntnisstand zur Simulation des Fahrverhaltens von Radfahrenden dargestellt und offene Fragen diskutiert.

Die Projektwebseite, das Handbuch sowie die Fachartikel bilden Meilenstein 5. Diese dienen der Verbreitung und weiteren wissenschaftlichen sowie technischen Verwertung des Tools.

Zeitplan [...]

17

Evaluationskonzept

Das Projektziel, mit Hilfe eines Mikrosimulationstools für den Radverkehr einen Beitrag zur Förderung des Radverkehrs zu leisten, ist sehr weitgehend. Daher wird für die Evaluation des Projektes auf das Konzept eines „Log-Frames“ zurückgegriffen, welches hilft, die Brücke zwischen den konkreten Projektaktivitäten und dem Projektziel zu bilden.

- Durch ein Projektmonitoring wird überprüft, ob die zuvor genannten Aktivitäten und Meilensteine der einzelnen Arbeitspakete fristgerecht und in einer guten Qualität umgesetzt werden.
- Projektergebnisse: Am Ende des Projektes erfolgt die Evaluation, ob die angestrebten konkreten Ergebnisse des Vorhabens erreicht wurden. Dies umfasst die Entwicklung des Simulationstools, welches Fahrtvorgänge des Radverkehrs auf unterschiedlicher Radverkehrsinfrastruktur abbildet und verschiedene Anwendungsszenarien der Planung von Radverkehrsinfrastruktur ermöglicht.
- Übergeordnetes Projektziel: Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist die Förderung des Radverkehrs als ein zentrales Verkehrsmittel einer nachhaltigen Mobilität in Stadt und Land. Dies kann nur durch eine längerfristige, deutschlandweite Evaluation überprüft werden. Erfolgsindikator ist, ob Kommunen, in denen das Simulationstool für die Planung von Radverkehrsinfrastruktur eingesetzt wird, einen erhöhten Radverkehrsanteil nachweisen können.

Das Projektmonitoring sowie die Projektergebnisse werden im Projektzeitlauf evaluiert. Die Erfüllung der übergeordneten Projektziele erfordert hingegen eine längerfristige Evaluation, die nicht Teil dieses Vorhabens ist.

Verwertungsplan

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Das fertiggestellte und validierte Simulationstool ermöglicht, die Sichtweise von Radfahrenden bereits in frühen Phasen der Planung oder Evaluierung von Radverkehrsführung und -infrastruktur miteinzubeziehen. Zudem kann durch den Einsatz des Tools ein Beitrag zur Standardisierung des Planungsprozesses durch Generierung einer einheitlichen Planungsgrundlage geleistet werden. Potentielle Anwender:innen finden sich im Bereich der Planung von (Rad-)Verkehrsführung und -infrastruktur, beispielsweise in Kommunal-/Regionalverwaltungen oder Ingenieurbüros für Verkehrsplanung.

Die weitere Nutzung und der Einbezug in Forschung und Lehre kann zum Beispiel durch eine Bereitstellung der erhobenen Daten und ggf. zugehörigen Analysen auf einer Plattform wie beispielsweise „MobiData BW“ realisiert werden. Die erste Version des Simulationstool kann für die Nutzung, beispielsweise zur Bewertung von Radrouten auf bestehender Infrastruktur bereitgestellt werden. Eine Registrierung kann dabei sicherstellen, dass die Nutzung ausschließlich durch Stellen erfolgt, welche im Auftrag der Allgemeinheit agieren. Der Betrieb des Simulationstools, welcher durch Fehlerbehebungen, Optimierungen oder Weiterentwicklungen unterstützt werden muss, kann dann durch die beteiligten Institute der Hochschule Karlsruhe oder durch eine Unternehmensgründung erfolgen. Kurzfristig nach Fertigstellung des Projekts könnte eine erste Anwendung und Erprobung des Tools mit ausgewählten Praxispartnern erfolgen. Mittel- und langfristig kann eine wirtschaftliche Vermarktung des Simulationstools als Anwendung für die Verkehrsplanung angestrebt werden.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Im wissenschaftlichen Bereich gibt es gegenwärtig nur wenige Institutionen, die in der Schnittstelle zwischen der Radverkehrsförderung und der Verkehrssimulation forschen. Die beiden Institute *IEEM* und *IVI* streben daher an, in dem vorliegenden Projekt die Kompetenzen der Hochschule Karlsruhe an dieser Schnittstelle weiter zu stärken. Durch die Kombination von Modellen und Ansätzen aus der Verkehrssimulation und aus der Simulation physikalischer/mathematischer Modelle entsteht über die Projektlaufzeit eine neuartige, ganzheitliche Modellierung des Radfahrens. Diese ist in der Lage, die Kombination der biomechanischen Antriebscharakteristik und den Einfluss von Infrastruktur und anderen Verkehrsteilnehmern realitätsgetreu zu approximieren. Für die Erfassung der relevanten Einflussfaktoren sowie die Entwicklung des Anwendungstools wird das Feedback von Kommunen sowie der *AGFK-BW* als Praxispartner berücksichtigt. Für die ganzheitliche Modellierung muss zudem eine systematische, qualitative und quantitative Erfassung aller signifikanter Einflussfaktoren auf das Radfahren erfolgen und die so gewonnenen Daten für die Simulationsanwendung aufbereitet werden.

Veröffentlichungen, ggf. in Kombination mit Vorträgen und Konferenzbesuchen werden während des Projekts anvisiert. Diese beinhalten Ergebnisse oder Teilergebnisse der Arbeitspakete. Pro Jahr sind zwei Veröffentlichungen vorgesehen.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Im Lauf des Projekts werden ein umfangreiches, ganzheitliches Simulationsmodell des Radfahrens sowie eine dazugehörige Anwendungsumgebung erstellt. Damit ist eine Grundlage für ausgiebige Simulationsmöglichkeiten des Radverkehrs geschaffen. Die Weiterverwendung dieser Ergebnisse erfolgt durch die Hochschule Karlsruhe. Die umfangreiche und generische Modellierung kann im Anschluss beispielsweise im Rahmen von Forschung und Lehre tiefer gehend und für eine große Breite von Anwendungsszenarien genutzt und ggf. weiter validiert oder erweitert werden. Zur Bereitstellung und potentiellen Vermarktung des Simulationstools als Anwendung für die Radverkehrsplanung ist zudem eine Unternehmensgründung möglich. Diese kann die Vermarktung des Simulationstools als auch entsprechende Trainings- und Beratungsangebote anbieten. Eine Anwendung des Simulationstools durch Dritte, zum Beispiel die Einbindung in weiteren Simulationssoftwareprogrammen, ist im ersten Entwicklungsschritt nicht vorgesehen. Liegen allerdings konkrete Anwendungsfälle für eine notwendige Toolkopplung vor, besteht prinzipiell die Möglichkeit, entsprechende Schnittstellen zu realisieren. Der Einsatz der ersten Version des Simulationstools im Rahmen von Praxisprojekten durch nicht gewerbliche Nutzer wird nach Registrierung der Nutzer wie bereits beschrieben ermöglicht.

Arbeitsteilung/Zusammenarbeit mit Dritten

Das Projekt wird durch die Hochschule Karlsruhe (*HKA*) bearbeitet. Konkret sind hier das Institut für energieeffiziente Mobilität (*IEEM*) und das Institut für Verkehr und Infrastruktur (*IVI*) zu nennen. Als assoziierte Partner sind die Kommunen Karlsruhe, Lahr und Offenburg sowie die Arbeitsgemeinschaft Fahrrad- und Fußgängerfreundlicher Kommunen in Baden-Württemberg e. V. (*AGFK-BW*) als Praxispartner beteiligt.

Das *IVI* übernimmt die Identifikation der Anforderungen der Praxispartner, sowie die Definition und Analyse der Einflussfaktoren auf das Radfahren. Das *IEEM* bearbeitet die ganzheitliche Modellierung des Radfahrens und entwickelt die zugehörige Anwendungsumgebung. Die Validierung des Simulationsmodells sowie die Erstellung der Projektwebseite erfolgen gemeinsam durch das *IVI* und das *IEEM*. Die Praxispartner unterstützen die Entwicklung durch Mitwirken an der Definition der Anforderungen für das Simulationsmodell und die Anwendungsumgebung sowie durch Feedback zu

den Forschungs- und Entwicklungsergebnissen und deren Überwachung. Zudem können die Praxispartner Anwendungsbeispiele stellen, etwa in Form von Radinfrastruktur für die Validierung.

Notwendigkeit der Zuwendung

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts soll ein vollständig neuer Ansatz zur ganzheitlichen Modellierung des Radfahrens entstehen, welcher für eine standardisierte Grundlage für die Radverkehrsplanung genutzt werden kann. Hierfür sollen Erkenntnisse aus der mathematischen Modellierung technischer und physikalischer Systeme mit den Erkenntnissen aus der Verkehrsforschung kombiniert werden. Die dafür notwendigen Forschungsaktivitäten sowie der daraus resultierende Arbeitsumfang können durch die beteiligten Institute nicht ohne spezialisiertes Personal geleistet werden.

Literaturverzeichnis

- BMBF (2016): Projekt des Monats Februar 2016. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Online verfügbar unter http://bmbf.bmbfcluster.de/files/Projekt_des_Monats_Februar_2016.pdf, zuletzt geprüft am 22.10.2021.
- BMVI (2021): MOVEBIS. Auswertung von Crowdsourced-Daten zur Verbesserung der kommunalen Fahrradinfrastruktur. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. TU Dresden. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/verbesserung-der-fahrradinfrastruktur-movebis.html>.
- Breda University of Applied Sciences; Cardiff University; cenrtro; Mobiel 21; Regionalmanagement NordHessen; Boulogne-sur-mer (2015): NISTO - New Integrated Smart Transport Options. Online verfügbar unter <http://www.nisto-project.eu/de/home.html>, zuletzt geprüft am 04.12.2021.
- BSVI (2019): Deutscher Ingenieurpreis Straße und Verkehr 2019. Hg. v. BSVI - Bundesvereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure e. V. Online verfügbar unter <https://www.bsvi.de/thema/der-deutsche-ingenieurpreis-strasse-und-verkehr-2019-geht-nach-erfurt-karlsruhe-und-kemptenund-weilheim.html>, zuletzt aktualisiert am 22.09.2019, zuletzt geprüft am 29.10.2021.
- Daiheng Ni (Hg.) (2016): Traffic Flow Theory: Butterworth-Heinemann.
- Dallmeyer, Jörg (2014): Verkehrssimulationsmodelle. In: Jörg Dallmeyer (Hg.): Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 17–48.
- Damant-Sirois, Gabriel; Grimsrud, Michael; El-Geneidy, Ahmed M. (2014): What's your type: a multidimensional cyclist typology. In: *Transportation* 41 (6), S. 1153–1169. DOI: 10.1007/s11116-014-9523-8.
- Dill, Jennifer; McNeil, Nathan (2013): Four Types of Cyclists?: Examination of Typology for Better Understanding of Bicycling Behavior and Potential. In: *Transportation Research Record* 2387 (1), S. 129–138. DOI: 10.3141/2387-15.
- Drescher, Johanna; Dembski Fabian; Obst, Thomas; Zeile, Peter (2020): CapeReviso. Radfahrer und Fußgänger auf gemeinsamen realen und virtuellen Flächen. Hg. v. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH. Online verfügbar unter <https://nrvp.de/22613>, zuletzt geprüft am 28.10.2021.
- Eckart, Jochen; Merk, Jule (2021): Die sensorbasierte Vermessung des Radverkehrs. Analyse des Radverkehrs mit einem SensorBike mit ubiquitären Sensoren.
- Francke, Angela; Anke, Juliane; Lißner, Sven; Schaefer, Lisa-Marie; Becker, Till; Petzoldt, Tibor (2019): Are you an ambitious cyclist? Results of the cyclist profile questionnaire in Germany. In: *Traffic Injury Prevention* 20 (sup3), S. 10–15. DOI: 10.1080/15389588.2019.1702647.
- Francke, Angela; Becker, Thilo; Lißner, Sven (2017a): Mit Smartphones generierte Verhaltensdaten im Radverkehr - Überprüfung der Nutzbarkeit und Entwicklung eines Auswertungsleitfadens für Akteure der Radverkehrsplanung. Hg. v. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH. TU Dresden, Lehrstuhl für Verkehrspsychologie. Online verfügbar unter <https://nrvp.de/18924>, zuletzt geprüft am 28.10.2021.
- Francke, Angela; Lißner, Sven; Schmidt Wolfram (2017b): Radverkehrsverhaltensstudie (RadVerS). Mit Smartphones generierte Verhaltensdaten im Verkehr - Differenzierung des Nutzerverhaltens unterschiedlicher Radfahrender. Hg. v. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH. TU Dresden, Lehrstuhl für Verkehrspsychologie. Online verfügbar unter <https://nrvp.de/20127>, zuletzt geprüft am 28.10.2021.

Friel, David; Wachholz, Sina; Freseman, Carina (2020): SuSi3d. Subjektive Sicherheit von Radverkehrsinfrastruktur. Hg. v. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH. TU Berlin. Online verfügbar unter <https://nrvp.de/21958>, zuletzt geprüft am 28.10.2021.

Geller, Roger (2009): Four Types of Cyclists. Hg. v. City of Portland. Online verfügbar unter <https://www.portlandoregon.gov/transportation/44597?a=237507>.

Hafelder, Silvio (2021): Energiebedarf beim Radfahren - Ein Vergleich von Messungen und Berechnungsverfahren. Bachelorarbeit. Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe.

Hauenstein, Jan; Eichner, Rick; Lehnen, Maximilian; Rabes, Max; Schlotthauer, Kai; Welz, Christoph (2019): Sensorbike: Erhebungsmethodik. Hochschule Karlsruhe.

IEEM (2020): Abgeschlossene Projekte. Hg. v. Institut für Energieeffiziente Mobilität. Hochschule Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://www.h-ka.de/ieem/projekte/abgeschlossene-projekte>, zuletzt geprüft am 28.10.2021.

IEEM (2021): Projekt Easy E-Bike. Hg. v. Insitut für Energieeffiziente Mobilität. Hochschule Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://www.h-ka.de/ieem/projekte/easy-e-bike>, zuletzt geprüft am 22.10.2021.

IVI (2020): GO Karlsruhe. Hg. v. Institut für Verkehr und Infrastruktur. Hochschule Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://www.gokarlsruhe.de/>, zuletzt aktualisiert am 28.10.2021.

Jensen, Mette (1999): Passion and heart in transport — a sociological analysis on transport behaviour. In: *Transport Policy* 6 (1), S. 19–33. DOI: 10.1016/S0967-070X(98)00029-8.

Kaths, Jakob (2017): RASCH. RAdSCHnellwege: Gestaltung effizienter und sicherer Infrastruktur. Hg. v. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH. TU München. Online verfügbar unter <https://nrvp.de/20035>, zuletzt geprüft am 28.10.2021.

Mekuria, Maaza C.; Furth, Peter G.; Nixon, Hilary (2012): Low-stress bicycling and network connectivity. Unter Mitarbeit von Mineta Transportation Institute. Online verfügbar unter <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/24453>.

Merk, Jule (2019): Vergleich der objektiven Verkehrssicherheit und des subjektiven Verkehrsstresses bei Schutzstreifen und Radfahrstreifen im Vergleich zu eigenständigen Radwegen. Hochschule Karlsruhe.

Nagel, Kai; Schreckenberg, Michael (1992): A cellular automaton model for freeway traffic. In: *J. Phys. I France* 2 (12), S. 2221–2229. DOI: 10.1051/jp1:1992277.

Rauch, Yannick; Hinger, Simon (2020): Modelling the Propulsion Behaviour of an E-Bike Rider. Hg. v. Insitut für Energieeffiziente Mobilität.

Sommer, Annabelle; Prinzing, Benedikt; König, Björn (2020): Messung der Feinstaubbelastungen von Babys beim Radfahren und Autofahren. Abschlussbericht. Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, Karlsruhe.

SWR (2021): #besserRadfahren. Hg. v. Südwestrundfunk. Online verfügbar unter <https://www.swr.de/unternehmen/kommunikation/presse-meldungen/multimedia-besserradfahren-120.html>, zuletzt geprüft am 28.10.2021.

TU Berlin (2021): TKN - Virtual Cycling Environment (VCE). Online verfügbar unter <https://www2.tkn.tu-berlin.de/software/vce/>, zuletzt geprüft am 04.12.2021.

TU Dresden (2018): GPS-Daten im Radverkehr. Lehrvideo und Leitfaden für die Verwendung von GPS-Daten in der kommunalen Radverkehrsplanung. TU Dresden, Lehrstuhl für Verkehrspsychologie. Online verfügbar unter <https://nrvp.de/20260>, zuletzt geprüft am 28.10.2021.

TU Dresden (2021): bikeSim - Web-Tool zur Prognose der Auslastung von Radverkehrsinfrastruktur. Online verfügbar unter <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/voeko/forschung/forschungsprojekte/web-tool-zur-prognose-der-auslastung-von-radverkehrsinfrastruktur-bikesim>, zuletzt geprüft am 04.12.2021.

Twaddle, Heather; Schendzielorz, Tobias; Fakler, Oliver (2014): Bicycles in Urban Areas: Review of Existing Methods for Modeling Behavior. In: *Transportation Research Record* 2434 (1), S. 140–146. DOI: 10.3141/2434-17.

Universität Münster (2021): senseBox. Online verfügbar unter <https://sensebox.de/de/about-us.html>, zuletzt geprüft am 04.12.2021.

Universität Oldenburg; CoSynth; mein-dienstrad.de (2020): ECOSense: Erfassung und Analyse von Radverkehrsdaten. Online verfügbar unter <https://www.ecosense.mein-dienstrad.de/>, zuletzt geprüft am 04.12.2021.

Wiedemann, Rainer (1974): Simulation des Straßenverkehrsflusses. 8. Aufl. Karlsruhe (Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe).

Anhang: LOI Praxispartner

- Stadt Karlsruhe
(Der LOI der Stadt Karlsruhe ist zugesagt, ist aber Stand 29.10.2021 noch im verwaltungsinternen Umlauf und wird nachgereicht)
- Stadt Offenburg
- Stadt Lahr
- Arbeitsgemeinschaft Fahrrad- und Fußgängerfreundliche Kommunen Baden-Württemberg e.V.