

# Fahrradsimulator

## Anwendungsorientierter Erfahrungsbericht zu Aufbau und Nutzung



# Impressum

**Fahrradsimulator:** Anwendungsorientierter Erfahrungsbericht zu Aufbau und Nutzung

Bearbeitung durch: **Technische Universität München**  
**Lehrstuhl für Verkehrstechnik**  
**Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch**

Dr.-Ing. Heather Kathz  
Dr. rer. nat. Andreas Keler  
M.Sc. Seyed Abdollah Hosseini  
M.Sc. Georgios Grigoropoulos

**TESIS GmbH – Teil von Vector Informatik**  
Dr.-Ing. Jakob Kathz

München, Dezember 2019

Das dem Bericht zugrundeliegende Forschungsprojekt „RAdSCHnellwege: Gestaltung effizienter und sicherer Infrastruktur“ wird gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) aus Mitteln zur Umsetzung des Nationalen Radverkehrsplans 2020.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Einleitung

Ziel des hier vorgestellten Fahrradsimulators ist es, Konzepte der Verkehrsplanung und -steuerung mit Hilfe von Probandenstudien zu bewerten. Gegenüber realen Fahrversuchen ergeben sich zahlreiche Vorteile insbesondere für Forschung und Vorstudien. So können Designalternativen durchgeführt werden:

- ohne Gefährdung der Probandinnen und Probanden oder anderer Verkehrsteilnehmer,
- ohne Eingriffe in die Verkehrsinfrastruktur, welche in der Regel mit hohen Kosten und hohem organisatorischem Aufwand verbunden sind und dies bei
- mit hoher Verfügbarkeit qualitativer und quantitativer Daten.

Durch die Aufzeichnung und Analyse von Bewegungsabläufen der Probandinnen und Probanden, können detaillierte Aussagen zum Fahrverhalten des Radfahrers oder der Radfaherin und zu deren Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern und dem Umfeld getroffen werden. Gleichzeitig können qualitative Daten gesammelt, und damit subjektive Einschätzungen der Probandinnen und Probanden erfasst werden.

Hierdurch lassen sich Planungsstände zu veränderter Verkehrssteuerung oder Verkehrsführung bereits lange vor der realen Implementierung durch Probanden bewerten. Weiterhin können grundlegende Verhaltensweisen von Radfahrern und Radfaherinnen untersucht und quantifiziert werden, was einen wichtigen Beitrag zu deren Modellierung darstellt.

Der vorliegende Erfahrungsbericht beschreibt den derzeitigen Ausbauzustand des Fahrradsimulators des Lehrstuhls für Verkehrstechnik der Technischen Universität München. Damit soll der Bericht anderen Institutionen helfen, die einen Fahrradsimulator als Werkzeug zur Beantwortung ähnlich gelagerter Fragestellungen in Betracht ziehen. Hierzu wird zunächst der technische Aufbau hinsichtlich Software- und Hardwarekomponenten erläutert. Daraufhin werden die durchgeführten Simulatorstudien vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Bewertung des Simulators.

Die vorgestellten Arbeiten und Erfahrungen wurden zum Teil innerhalb des Projektes „RASCHnellwege: Gestaltung effizienter und sicherer Infrastruktur“ (RASCH) gemacht.



Bild 1: Virtuelle Testfahrt mit dem Fahrradsimulator

# Aufbau des Fahrradsimulators

Für den Aufbau des Fahrradsimulators waren folgende Anforderungen maßgeblich:

- Erweiterbarkeit der statischen virtuellen Umgebung,
- Einbindung von stochastischen Verkehrsflussmodellen zur Erzeugung realistischer dynamischer Umgebungen,
- Einbindung eigener Verkehrssteuerungsmaßnahmen wie Steuerung von Lichtsignalanlagen,
- Verwendung eines realen und austauschbaren Fahrrads als Schnittstelle zwischen Proband(in) und Simulation und

- Darstellungsmöglichkeit der virtuellen Umgebung in 3D.

Die ersten drei Punkte waren dabei dem Untersuchungsgegenstand geschuldet, während die beiden zuletzt genannten Punkte eine möglichst gute Immersion der Probandinnen und Probanden sicherstellen sollten.

Da es zum Zeitpunkt der Projektdurchführung am Markt keine den Anforderungen entsprechende Lösung gab, wurde ein Fahrradsimulator aufgebaut. Im Folgenden werden die dafür verwendeten Hardware- und Softwarekomponenten sowie deren Gesamtaufbau vorgestellt. Überblicksartig ist dieser in Bild 2 dargestellt.

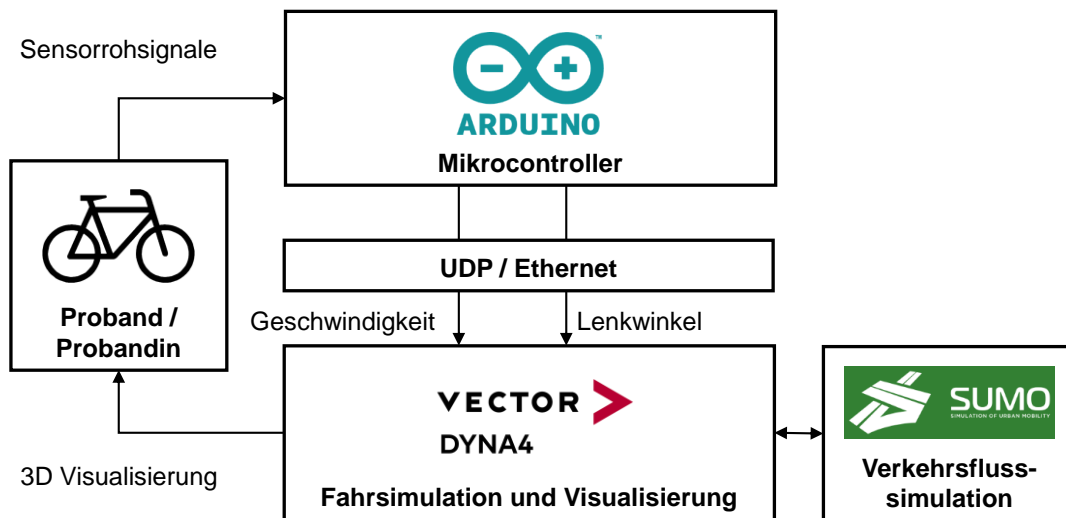


Bild 2: Software- und Hardwarekomponenten des Fahrradsimulators

## Messgrößenerfassung

Um das reale Fahrrad als Schnittstelle zwischen Mensch und virtueller Realität zu nutzen, müssen Messgrößen am Fahrrad durch Sensoren erfasst werden. Im Rahmen des derzeitigen Aufbaus, werden Geschwindigkeitssignal und

Lenkwinkel erfasst. Dies soll mit möglichst hoher Auflösung und möglichst geringer Latenz erfolgen. Die von den Sensoren generierten Signale werden mit Hilfe eines Mikrocontrollers ausgewertet und dem Rechner, auf dem die Simulation ausgeführt wird, zur Verfügung gestellt.

Maßgabe bei der Wahl und Platzierung der Sensoren war, eine Austauschbarkeit des Fahrrads mit geringem zeitlichen und manuellen Aufwand zu gewährleisten, um die Untersuchung mit verschiedenen Fahrradtypen und -größen zu ermöglichen. Aus diesem Grund wurde darauf geachtet, dass die Sensoren nicht unmittelbar am Fahrrad befestigt werden müssen.

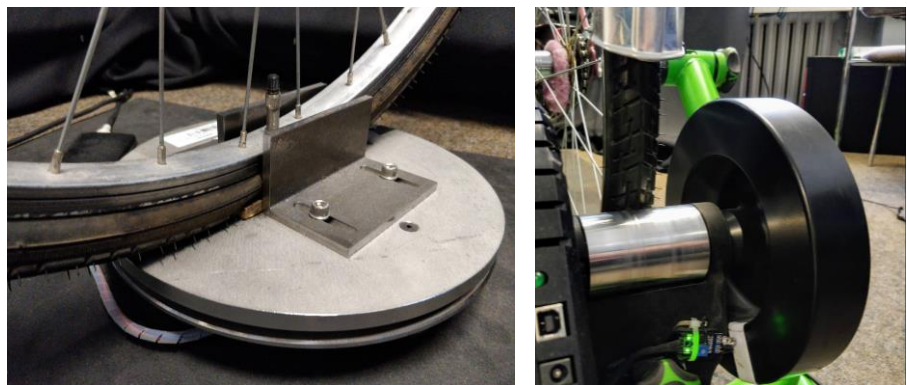
Um eine leichtgängige Drehbarkeit des Lenkers und eine Messung des Lenkwinkels zu ermöglichen, wurde das Vorderrad des Fahrrads auf der in Bild 3 (links) gezeigten Drehplatte fixiert. Im Zentrum der eigens für diesen Zweck konstruierten Drehplatte fungiert ein berührungsloser magnetischer Drehgeber der Firma Bourns (Modell EMS22A) mit absoluter Winkelmessung ohne mechanische Rasterung als Sensor. Die hohe Abtastrate von 1024 Stellungen je Umdrehung sorgt für eine feine Auflösung des Lenkwinkels. Zugleich sorgt die Drehplatte für einen Höhenausgleich zu dem durch den Rollentrainer angehobenen Hinterrad.

Das Hinterrad wurde in einem Rollentrainer „T-6200 Rock'n Roll | Smart Control“ von Firma Kinetic eingespannt, der für einen Fahrwider-

stand beim Treten sorgt und als eines der wenigen Modelle eine Beweglichkeit um die Längsachse und damit ein Wanken ermöglicht. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt am Schwungrad des Rollentrainers, da dieses durch das Übersetzungsverhältnis eine hohe Drehzahl gegenüber dem Hinterrad aufweist. Damit ist eine hohe Auflösung des Geschwindigkeitssignals sowie eine geringe Verzögerung der Messung beim Anfahren möglich. Um aufwändige Umbauten am Rollentrainer sowie eine mechanische - und damit bei den auftretenden Drehzahlen anfällige - Kopplung mit dem Sensor zu vermeiden, wird eine optische Abtastung vorgenommen. Hierzu wurde eine weiße Markierung auf dem Schwungrad angebracht und durch den gegenüberliegenden Sensor berührungslos abgetastet, siehe Bild 3 (rechts).

Die Signale beider Sensoren werden an einen Arduino UNO Mikrocontroller angelegt und dort ausgewertet und vorverarbeitet. Die erzeugten Messwerte können über Ethernet/UDP an alle Rechner mit gängigen Netzwerkkarten übermittelt werden. Dort können sie der Fahrsimulation zugeführt werden und sorgen so für eine Bewegung des Fahrrads entsprechend der Eingaben der Probandinnen und Probanden

Bild 3: Drehplatte zur Messung des Lenkwinkels (links) und optischer Sensor zur Ermittlung der Geschwindigkeit (rechts)



# Kopplung von Fahr- und Verkehrsflusssimulation

Um neuartige Konzepte der Verkehrsinfrastruktur untersuchen zu können, ist sowohl eine realitätsnahe Visualisierung der Umgebung notwendig als auch eine realistische Abbildung des umgebenden Verkehrs. Da dies zwei grundsätzlich unterschiedliche Simulationsdisziplinen erfordert, ist eine Kopplung entsprechender Simulationswerkzeuge vorzunehmen. Für die Bewegung des von den Probandinnen und Probanden gefahrenen Fahrrads sowie zur Visualisierung wird die Fahrzeug- und Umgebungssimulation DYNA4 von Vector<sup>1</sup> genutzt. Die mikroskopische Verkehrsflusssimulation SUMO<sup>2</sup> wird zur Abbildung des umgebenden Verkehrs inklusive Fahrzeuge, Fahrräder, Fußgänger und Verkehrssteuerung genutzt. Eine bestehende Kopplung zwischen DYNA4 und SUMO wurde hierzu in ihrem Funktionsumfang erweitert.

Die mikroskopische Verkehrsflusssimulation erlaubt die virtuelle Nachbildung komplexer urbaner Verkehrsabläufe auf Straßenzügen und an Knotenpunkten. Dabei werden sowohl die Interaktionen von Verkehrsteilnehmern untereinander sowie deren Beeinflussung durch die Verkehrssteuerung simuliert. Um eine möglichst realistische Nachbildung der Verkehrssituation nachzustellen, ist eine Parametrierung und Kalibrierung der Verkehrsflusssimulation mit Realdaten notwendig. Hierfür werden Daten aus Verkehrsbeobachtungen unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer und Daten der jeweiligen Verkehrssteuerungsmaßnahmen als Eingaben genutzt. So kann sichergestellt werden, dass die untersuchten Maßnahmen der Verkehrsinfrastruktur realistische Effekte auf den Verkehrsfluss haben und damit auch realistisch von den Probandinnen und Probanden erlebt werden.

Die Fahrzeug- und Umgebungssimulation DYNA4 wird zum einen zur Umsetzung der Sensorsignale in eine realistische Bewegung des Fahrrads genutzt. Zum anderen beinhaltet diese Simulationsumgebung eine 3D Visualisierung, welche zur Darstellung der virtuellen Welt während der Versuchsfahrten genutzt wird. Damit die von SUMO erzeugten Verkehrsteilnehmer auf das Versuchsfahrrad reagieren sowie zu deren Anzeige in der Visualisierung, wird eine Kopplung zwischen DYNA4 und SUMO genutzt. Weiterhin dient diese Kopplung zur Anzeige der Zustände der von SUMO gesteuerten Lichtsignalanlagen in der Visualisierung. Bei der Kopplung der beiden Simulationswerkzeuge ergeben sich Herausforderungen durch die unterschiedliche Granularität der Modellierung und der daraus resultierenden Schrittweiten. Weiterhin sind beide Werkzeuge mit äquivalenten Straßenbeschreibungen zu versorgen. Die niedrigere Rechenfrequenz von SUMO gegenüber der von DYNA4 wird durch eine Interpolation und eine Glättung der Bewegungen der von SUMO erzeugten Verkehrsteilnehmer ausgeglichen. Die Problematik der Straßenbeschreibung wird dadurch entschärft, dass DYNA4 den offenen Standard OpenDRIVE<sup>3</sup> nativ unterstützt und SUMO eine Konvertierung von diesem Format in das proprietäre Straßenbeschreibungsformat erlaubt. Durch die Konvertierung ist nicht auszuschließen, dass manuelle Nacharbeit an den Straßennetzen nötig wird. Weiterhin ist ein Mapping zwischen SUMO-Entitäten und den entsprechenden Gegenständen in DYNA4 vorzunehmen, sodass in der Visualisierung beispielsweise unterschiedliche Geometrien für Fahrräder, Fußgänger und Fahrzeuge angezeigt werden sowie eine Anzeige der Zustände der Lichtsignalanlagen erfolgt. Dabei ist zu beachten, dass jede Signalgruppe in SUMO auf einzelne Signalgeber in OpenDRIVE gemappt werden muss. Bei vielen oder sehr komplexen Knotenpunkten ergeben sich damit eine Viel-

---

<sup>1</sup> Vector Informatik GmbH, <https://www.vector.com/>

<sup>2</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., <https://sumo.dlr.de/>

<sup>3</sup> <https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/>



zahl von Einzelsignalen. Hierfür wurde die ursprüngliche Begrenzung der Signale in DYNA4 durch eine Weiterentwicklung der SUMO Kopp- lung aufgehoben.

## Darstellung der virtuellen Realität

Um für die Probandinnen und Probanden den Grad der Immersion in die Fahrradsimulation zu steigern, sollte der Fahrradsimulator ursprünglich von einem klassischen Aufbau mit Monitoren zur Umgebungsdarstellung hin zu einer Visualisierung mittels Virtual-Reality-Brille (VR-Brille) weiterentwickelt werden. Die Anbindung einer VR-Brille, in diesem Fall der Oculus Rift,

an die 3D-Visualisierung von DYNA4 wurde hierzu realisiert und beispielsweise einem öffentlichen Publikum auf dem Münchner Street-life-Festival im Mai 2018 vorgeführt. Erste befragte Probandinnen und Probanden empfanden schnelle Fahrten auf dem Simulator mit VR-Brille jedoch als eher unangenehm. Nach längeren Fahrten mit der VR-Brille stellten viele Festival-Besucher ein ermüden der Augen fest. Es liegen zwar keine Berichte über längere Übelkeit oder Schwindel vor, jedoch wird eine solche Simulatorkrankheit durch die Verwendung einer VR-Brille tendenziell begünstigt. Aus diesem Grund wurde zur Projektlaufzeit entschieden, die Probandenstudien stattdessen mit drei Monitoren, siehe Bild 4 (rechts), durchzuführen.

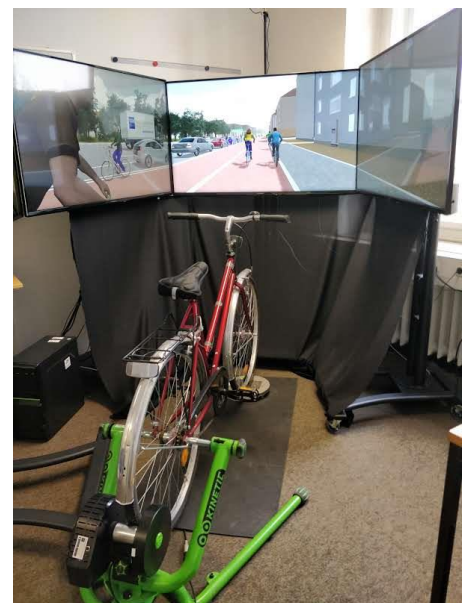


Bild 4: Mögliche Konstellationen des Fahrradsimulators mit Nutzung der VR-Brille (links) oder drei Monitoren (rechts)

Ein weiteres Kriterium für die Bevorzugung der drei Monitore gegenüber der VR-Brille war der erhöhte Versuchsaufwand, verursacht durch das individuelle Anpassen der VR-Brille sowie die benötigte Assistenz beim Auf- und Absteigen vom Fahrradsimulator. Nach Loslassen des Lenkers konnten viele Testpersonen den Lenker mit ihren Händen nicht wiederfinden. Dies

könnte gefährliche Situationen erzeugen, genauso wie ein mögliches Verwickeln des VR-Brillenkabels am Hinterrad oder der Tretkurbel. Für eine möglichst hohe Immersion ist die Verwendung einer realistisch anmutenden Umgebung mit entsprechenden 3D-Geometrien für statische Objekte, wie Häuser, Bäume, Straßenmöblierung, sowie für dynamische Objekte

zur Repräsentation der Verkehrsteilnehmer notwendig. Hierzu wurde der Standardkatalog von DYNA4 um verschiedene Fahrradmodelle erweitert. Zudem ließen sich Gebäudegeometrien aus unterschiedlichen Quellen für die Unity-basierte Visualisierung von DYNA4 aufbereiten

und integrieren. Bild 5 zeigt drei Beispiele von Radfahrerinnen und Radfahrern, die zur Visualisierung eines gemischten Radverkehrsstroms eingesetzt werden können.



Bild 5: Beispiele von Radfahrerinnen und Radfahrern in der Visualisierung von DYNA4

## Fahrradsimulator-Studien

### Am Beispiel der in RASCH durchgeführten Untersuchungen

Im Projekt RASCH wurde ein Abschnitt der Leopold-, Ludwigstraße von der Münchner Freiheit im Norden zum Knotenpunkt Von-der-Tann-Straße / Ludwigstraße im Süden zur Erprobung verschiedener Verkehrsplanungs- und Verkehrssteuerungsmaßnahmen für den Radverkehr simuliert. Das Vorgehen zur Vorbereitung und Durchführung von Studien anhand des Fahrradsimulators am Beispiel des Projekts wird in diesem Kapitel beschrieben.

### Simulationsnetz

Zunächst wurde das bestehende Straßennetz in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulationssoftware SUMO abgebildet. Dabei wurde ein Augenmerk auf die räumliche Genauigkeit

der modellierten Infrastruktur gelegt, um die simulierten Ergebnisse so genau wie möglich mit den realen Beobachtungen vergleichen zu können.

Die Netzelemente wurden ursprünglich aus OpenStreetMap<sup>4</sup> im OSM-Format heruntergeladen und als net.xml-Datei mittels NETCONVERT in SUMO exportiert. NETCONVERT ist das zu SUMO gehörige Softwaretool zur Umwandlung von Kartenformaten. Die exportierte Datei wurde daraufhin manuell bearbeitet und auf Korrektheit überprüft. Weiterhin konnten keine Abbiegebeziehungen oder Fußgängerüberwege automatisiert aus den OSM-Daten ermittelt werden, wodurch manuelle Anpassungen notwendig wurden.

<sup>4</sup> <http://www.openstreetmap.org/>



Die Landeshauptstadt München stellte die Signalpläne zur realistischen Abbildung der Lichtsignalsteuerung in SUMO zur Verfügung.

## Simulierter Verkehr

Da die Simulator-Studien basierend auf einem realen Straßenzug aufgebaut sind, wurden reale Verkehrsdaten erhoben und in die Simulation miteinbezogen. Videodaten aus der Vogelperspektive wurden an einigen Knotenpunkten erhoben, um die Verkehrsstärken und Abbiegeraten aller Verkehrsteilnehmer zu ermitteln. Dabei wurde das Verhalten der Verkehrsteilnehmer beobachtet, um unerwartetes oder nicht regelkonformes Verhalten am realen Knotenpunkt in die Simulation miteinzubeziehen.

Die Bewegungsabläufe aller Verkehrsteilnehmer wurden aus den Videodaten extrahiert, um Kenngrößen zur Kalibrierung und Validierung der Verhaltensmodelle in SUMO zu gewinnen. Zur Anpassung der Parameter der Verhaltensmodelle, wurden die Geschwindigkeiten der durchfahrenden sowie die Verzögerungs- und Beschleunigungsprozesse der anhaltenden Verkehrsteilnehmer herangezogen.

In RASCH wurde der Verkehrsfluss von gemischten Radverkehrsströmen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen des Radverkehrs untersucht. Dabei war es wichtig, unterschiedliche Typen von Radfahrerinnen und Radfahrern in der Simulation zu definieren und die Verhaltensmodellparameter entsprechend anzupassen.

Zur realitätsnahen virtuellen Darstellung wurden auch Fußgängerinnen und Fußgänger simuliert, jedoch nicht direkt in die Auswertung mit einbezogen.

Zur Abbildung des anteilmäßig verteilten Radverkehrs wurden Trendprognosen, wie zum Beispiel zur Elektrifizierung von Fahrrädern und zur steigenden Anwendung von Lastenrädern,

sowie die generelle Zunahme des Radverkehrsaufkommens getroffen und in der Simulation eingesetzt. Dabei war es möglich, die Szenarien unter Annahme des heutigen Zustands oder unter den prognostizierten Zuständen der Jahre 2025 oder 2030 zu erproben.

## Szenarien

Nach der realitätsgetreuen Modellierung des Ist-Zustands wurden in RASCH zwei Varianten der Radverkehrsführung definiert und erprobt:

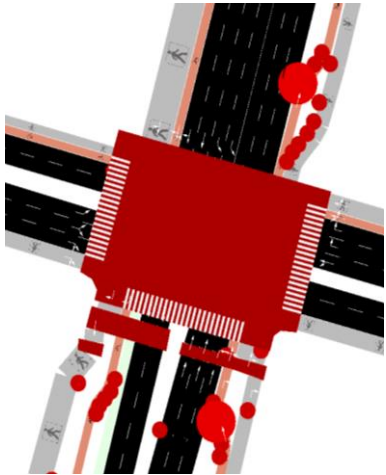
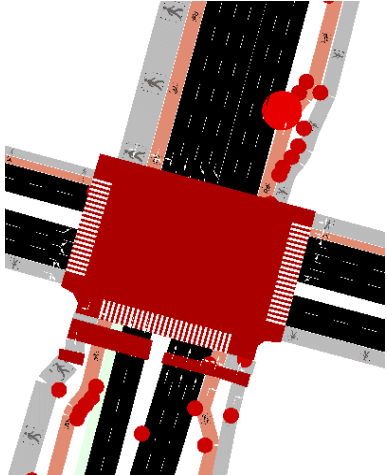
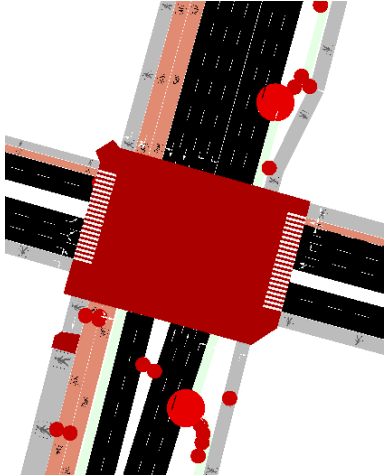






- **Variante A:** Verbreitete Einrichtungsradwege auf beiden Straßenseiten
- **Variante B:** Verbreiteter Zweirichtungsradweg auf einer Straßenseite

Die vorgenommenen Änderungen im SUMO-Netz und in der Visualisierung des Umfelds sind für beide Szenarien in Tabelle 1 dargestellt. Um die Vergleichbarkeit der Szenarien zu gewährleisten, wurden neben der Anpassung des Radwegs möglichst wenige Änderungen an der Verkehrsbeschilderung, sowie an Gebäuden und anderen Bauwerken vorgenommen. Dennoch entstanden, insbesondere in Szenario B, aufgrund der veränderten Breite und Position des Radwegs auch, zum Teil starke, Variationen der simulierten Verkehrssituationen.

Zusätzlich zu den infrastrukturellen Maßnahmen wurden in RASCH auch zwei Ansätze zur Signalsteuerung verglichen:

- **Aktuelle Steuerung:** Koordination konsekutiver Knotenpunkte für den motorisierten Verkehr
- **Grüne Welle für den Radverkehr:** Angepasste Koordination konsekutiver Knotenpunkte unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit der Radfahrerinnen und Radfahrer

Tabelle 1: Eigenschaften der in RASCH erprobten Radverkehrsführungen

Ist-Zustand	Variante A	Variante B
<p>Einrichtungsradswege auf beiden Straßenseiten Breite: 1,6 m - 2,0 m</p>	<p>Einrichtungsradswege auf beiden Straßenseiten Breite: 3,0 m</p>	<p>Zweirichtungsradsweg auf einer Straßenseite Breite: 3,0 m je Richtung</p>
		
		
		

Unter Berücksichtigung des Ist-Zustands (Radverkehrsführung und Signalsteuerung), beider infrastrukturellen Szenarien und beider Steuerungsmaßnahmen ergaben sich insgesamt sechs Szenarien-Kombinationen.

- **Szenario 1:** Aktuelle Signalsteuerung / aktuelle Radverkehrsführung
- **Szenario 2:** Grüne Welle für den Radverkehr / aktuelle Radverkehrsführung
- **Szenario 3:** Aktuelle Signalsteuerung / 3,0 breite Einrichtungsradswege auf beiden Straßenseiten

- **Szenario 4:** Grüne Welle / 3,0 breite Einrichtungsradswege auf beiden Straßenseiten
- **Szenario 5:** Aktuelle Signalsteuerung / Zweirichtungsradsweg auf einer Straßenseite
- **Szenario 6:** Grüne Welle / Zweirichtungsradsweg auf einer Straßenseite

Die Untersuchungsstrecke maß einen Kilometer und enthielt insgesamt drei signalisierte Knotenpunkte. Jede Fahrt dauerte zwischen drei und sieben Minuten. Aus diesem Grund war es nicht möglich, dass jede Probandin oder jeder

Proband alle Szenarien durchfährt. Stattdessen wurde eine Auswahl der Szenarien für die Simulator-Studie ausgewählt wohingegen die anderen mittels mikroskopischer Verkehrssimulationen untersucht wurden.

## Ablauf der Simulator-Studien

Im Laufe der Simulator-Studie sind die Probandinnen und Probanden durch jedes ausgewählte Szenario gefahren und haben anschließend einen Fragebogen ausgefüllt, wobei sie die Führungsform des Radschnellweges des entsprechenden Szenarios qualitativ evaluiert haben. Zudem wurden die Geschwindigkeit und Reisezeit einer jeden Probandin und eines jeden Probanden aufgenommen. Dadurch wurde evaluiert, ob die Einführung der Grünen Welle für den Radverkehr eine merkliche Verbesserung der Verkehrsqualität für Radfahrerinnen und Radfahrer mit sich bringt.

Die Mindestanzahl von Probandinnen und Probanden wurde auf 30 festgelegt, denn diese ist eine in ähnlichen Probandenstudien oft zitierte untere Grenze. Ein Merkblatt mit wesentlichen Informationen zur Studie sowie Kontaktdaten mit einem enthaltenen Link zu einer Webseite wo man ein Termin vereinbart werden konnte wurde mit Studierendengruppen und Fahrradinteressensgruppen geteilt. Insgesamt haben sich 46 Personen angemeldet und an der Simulator-Studie als Probandin oder Proband teilgenommen.

Vor der ersten Simulationsfahrt wurde jede Probandin und jeder Proband kurz über den Simulator informiert, z.B. wie dieser sich durch den Lenker und die hintere Bremse steuern lässt und auf welche Besonderheiten im Vergleich zu einem echten Fahrrad geachtet werden sollte. Dabei wurde auch die Wegbeschreibung der Simulationsfahrt erklärt. Während der Fahrt blieb der Studienbetreuer außer Sicht der Probandinnen und Probanden und gab keine Hinweise mehr, damit die Immersion der Simulation nicht unterbrochen wurde.

## Andere Simulator-Studien

Innerhalb des Projektes RadOnTime<sup>5</sup> wurde eine Simulator-Studie zur Evaluierung von Restzeitanzeigen für den Radverkehr durchgeführt. Dabei wurden die Reaktionen der Probandinnen und Probanden auf verschiedenen Arten und Ausprägungen von Restzeitanzeigen analysiert. Die Restzeitanzeigen wurden von den Probandinnen und Probanden evaluiert und Präferenzen wurden festgestellt.

In den laufenden Projekten @City und @City-AF<sup>6</sup> werden die Interaktionen zwischen Radfahrern und Radfahrerinnen mit (automatisierten) motorisierten Verkehrsteilnehmern anhand des Fahrradsimulators untersucht. Der Fahrradsimulator wird mit einem Fahr Simulator des Lehrstuhls für Ergonomie der Technische Universität München verkoppelt.

## Evaluierung des Simulators

Um festzustellen, ob das Fahrerlebnis auf dem Fahrradsimulator dem Fahrgefühl in der Realität entspricht, und dadurch die Validität der Er-

gebnisse der Fahrradsimulator-Studie sichergestellt sind, wurden Daten zur Beschreibung und zum Vergleich des realen Fahrverhaltens auf der Untersuchungsstrecke und des Verhaltens

---

<sup>5</sup> Gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (<https://nationaler-radverkehrsplan.de/de/praxis/radontime-wirkungen-von-restzeitanzeigen-auf-den>)

<sup>6</sup> Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (<https://www.atcity-online.de/>)

der Probandinnen und Probanden auf dem Fahrradsimulator erhoben und analysiert. Anhand dieser Ergebnisse können Schlüsse auf die Anwendbarkeit des Fahrradsimulators gezogen und Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert.

Ein Fahrrad wurde mit einem GPS Sensor und eine Videokamera ausgestattet (Bild 6) und von einer Testperson 25 Mal entlang der Untersuchungsstrecke gefahren. Die gleiche Person ist mit dem Fahrradsimulator 38 Mal entlang der virtuellen Strecke gefahren. Die Geschwindigkeit, Reisezeit und laterale Positionen in Relation zum Radweg der realen und simulierten Fahrten wurden verglichen.

Die Differenzen in den durchschnittlichen Reisezeiten und den durchschnittlichen Geschwindigkeiten der realen und virtuellen Fahrten betragen 1,7 % bzw. 2,9 %, wobei die Differenzen insignifikant sind (jeweils einen Signifikanzwert von über 0,05 bei einem Konfidenzniveau von 95 %, woraus eine sehr hohe Vergleichbarkeit folgert). Es lässt sich auch aussagen, dass die

lateralen Positionen eine hohe Vergleichbarkeit haben und Variationen sich auf im Mittel 1 bis 2 Meter beschränken. Simulator-Fahrten haben dabei generell mehr Ausreißer verglichen mit realen Fahrten. Dies kann aus der Qualität der nachgebildeten virtuellen Umgebung sowie aus der Anzahl der visualisierten Fußgänger in der Simulation resultieren.

Um das Verhalten von mehreren Personen zu berücksichtigen, wurden die Bewegungsabläufe aller Probandinnen und Probanden der Simulator-Studie mit realen Bewegungsabläufen an einem Knotenpunkt der Untersuchungsstrecke verglichen. Dabei wurden Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Haltepositionen und Positionen bei der Durchführung eines Abbiegemanövers betrachtet.

Auch hier war eine hohe Ähnlichkeit in Bezug auf Geschwindigkeit und Beschleunigung zu bemerken. Bezüglich der Halteposition und der Durchführung von Abbiegemanövern wurde Verbesserungspotenzial erkannt.

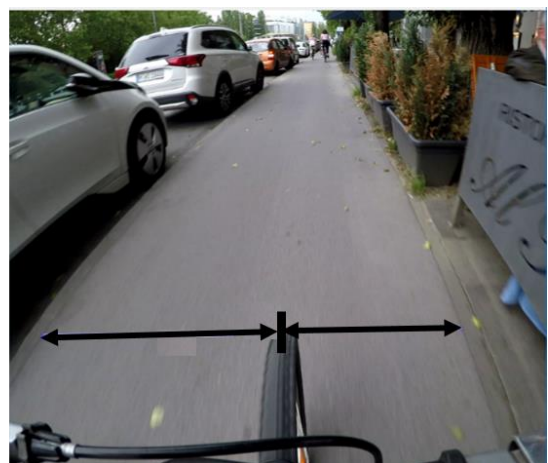


Bild 6: Erhebung von realen Daten zur Validierung des Fahrradsimulators

Diskussionen mit Expertinnen und Experten zeigten die Wichtigkeit von realistischen Interaktionen der in SUMO simulierten Verkehrsteilnehmer sowohl untereinander als auch mit der Probandin oder mit dem Probanden.

Es zeigte sich, dass vor allem komplexe Knotenpunkte den Einsatz von zusätzlichen Bildschirmen oder einer VR-Brille nötig machen, da beim Halten an der Haltelinie oft eine Abfolge

von unterschiedlichen Blickrichtungen ausgeführt wird. Ein beschränktes Sichtfeld durch zu wenige Bildschirme kann beispielsweise dazu führen, dass bei spätem Halten an einer Haltelinie die Lichtsignalanlagen nur noch teilweise oder gar nicht mehr sichtbar sind.

Ähnlich verhält es sich mit dem Fehlen von Geräuschen während der Fahrt oder, wie bei der Variante mit den drei Bildschirmen, der fehlenden Option sich rückwärtig umzublicken.

## Ausblick

Hardwaretechnisch könnte der Ausbau des Simulators in Richtung der Anbindung weiterer Sensoren sein. Die laterale Inklination spielt eine wesentliche Rolle bei der Kontrolle eines Fahrrads und es ist vorgesehen, diese Inklination am Smart-Trainer zu messen und anhand eines erweiterten Bewegungs-Modells zur Ermittlung der Geschwindigkeit und Fahrtrichtung einzusetzen.

Geräusche und haptisches Feedback wurden bei den Gesprächen mit Expertinnen und Experten sowie mit Probandinnen und Probanden zur Interpretation der Situation als sehr wichtig identifiziert. Es ist vorgesehen, die Geräusche des den Probanden oder der Probandin umgebenden Verkehrs demnächst miteinzubeziehen. Die Einbindung haptischen Feedbacks ist auch eingeplant.

Die Einbeziehung der longitudinalen Neigung des Fahrrads zur Simulation von Steigungen im Straßennetz sowie zur Ermittlung von realistischen Beschleunigungs- bzw. Verzögerungskräften wäre eine weitere Verbesserungsmöglichkeit, die durch die Einführung einer Bewegungsplattform realisiert werden könnte.

Eine deutliche Verbesserung des Fahrgefühls konnte mit der Anschaffung eines Smart-Trainers ermöglicht werden (siehe Bild 4, rechts). Es werden laterale Inklinationen ermöglicht, die vor allem das Balancieren der Probandin oder des Probanden während des Anhaltens an der Haltelinie realitätsnah wiedergeben können. Es ist wichtig noch anzufügen, dass es für die Probandinnen und Probanden unangenehm und unter Umständen sicherheitskritisch sein kann, auf einem inklinierenden Smart-Trainer eine VR-Brille zu tragen, da Neigungen visuell nicht mehr wahrgenommen werden.

Die Messung der Blickrichtung oder der Herzfrequenz könnte viele weitere Informationen bringen, vor allem in Zusammenhang der Klassifizierung unterschiedlicher Probandinnen- und Probandeneigenschaften.

Die Gestenbeobachtung der Probandinnen und Probanden kann für viele weitere Untersuchungszwecke verwendet werden. Beispielsweise wäre das automatisierte Fahren in der Stadt ein Anwendungsfokus dafür. Hier könnten, einhergehend mit der Simulation von Fahrzeugsensoren, Interaktionen und Kommunikationen mit automatisierten Fahrzeugen untersucht werden.

Ein weiterer Fokus könnte die Unfallforschung sein. Hier wäre es vorstellbar auch mobile Eye-Tracking-Geräte für die Extraktion von Fixationspunkten der Probandinnen und Probanden zu nutzen, um herauszufinden welche Reaktionszeiten bei welchen Situationen kritisch sind. In diesem Zusammenhang kann es wichtig sein die modellierte Infrastruktur in der virtuellen Umgebung anhand ihrer Eigenschaften gesondert zu untersuchen.