

Schlussbericht DataBikeSim



Datenbasierte Modelle für realistische Simulationsstudien in
der Radverkehrsforschung

Zeitraum: 1. Juli 2023 – 31. März 2025

Projektkürzel 19F1154A+B

**Kontakt Hochschule Karlsruhe
Institut für Verkehr und Infrastruktur**

Moltkestraße 30
76133 Karlsruhe
Telefon 0721 925 2920
jochen.eckart@h-ka.de
www.h-ka.de

Kontakt Blickshift GmbH

Wankelstr. 12
70563 Stuttgart
Telefon 0711 18424526
info@blickshift.de
www.blickshift.com

Karlsruhe, 31.08.2025

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Kurzfassung – Abstract

In den letzten Jahren haben Fahrradsimulatoren als Forschungsinstrument an Bedeutung gewonnen, was zur Entwicklung zahlreicher Prototypen in verschiedenen akademischen Einrichtungen geführt hat. Damit die Ergebnisse simulationsbasierter Studien auf reale Szenarien übertragbar sind, ist es wichtig, dass die Simulatoren ein realistisches Verkehrsverhalten der Radfahrenden nachbilden. Die meisten Fahrradsimulatoren werden bisher anhand vereinfachter Fahrradparametern bewertet. Ziel des Vorhabens ist eine multisensorische Bewertung zwischen dem Radfahren in einem Simulator und in einer realen Umgebung, sowohl in Bezug auf das subjektive Unbehagen als auch auf objektive Leistungskennzahlen. Die Methodik und Ergebnisse können als Referenz für Forschende dienen, die im Gebiet der Fahrradsimulation arbeiten. Dafür wurde eine breite Palette von Sensoren verwendet wie Eye-Tracking-Daten, physiologische Stressindikatoren (z. B. der Hautleitwert), Messwerte zur Fahrleistung in realen und simulierten Umgebungen kombiniert. Dieser multisensorische Datensatz ermöglicht eine ganzheitliche Analyse des Nutzerverhaltens und bietet Einblicke in die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen virtuellen und realen Raderlebnissen.

Die Entwicklung des Fahrradsimulators, die Sammlung und Ausgabe verschiedener Datenströme sowie die Synchronisierung und Auswertung der verschiedenen Sensorergebnisse bildet eine technische Herausforderung. Insbesondere die Verwaltung großer Datenmengen und die Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Integrität aller Sensoren erwiesen sich als komplex. Eine große Herausforderung war der Datenverlust einzelner Sensoren, der bei Studien mit einer großen Anzahl von Datenströmen auftreten kann. Die Daten der Stressmessung wurden beispielsweise aufgrund von technischen Problemen und personalbedingten Fehlern während des Experiments nicht optimal aufgezeichnet. Eine Herausforderung bildet dabei der umfassende Ansatz zur Datenauswertung. Die erfolgreiche Zusammenführung der verschiedenen Datenquellen wie: Fahrparameter (Garmin & Unity), Stressindikatoren (Shimmer), Blickdaten (Pupil Labs Neon & Varjo Aero) und Trajektorien (Unity) ermöglichen einen direkten Vergleich zwischen realer Fahrt und VR-Simulation. Die entwickelte Methodik und Infrastruktur bietet eine robuste Grundlage für themenverwandte Projekte.

Im Rahmen des Vorhabens wurden zwei Studien zum Vergleich Fahrradsimulator und Realwelt durchgeführt. Für die erste Vergleichsstudie wurde ein Teil des Hochschulcampus mit einem Parcours versehen und dieser digital nachgebildet. An dieser Studie waren 24 Teilnehmende beteiligt. Die zweite Vergleichsstudie wurde für reale Straßenabschnitt in der Karlsruher Innenstadt West mit 5 Teilnehmenden durchgeführt. Ergebnis der Studien war, dass während Simulatoren ein wertvolles Werkzeug für Training und Experimente sind, das Fehlen eines physischen Feedbacks eine Herausforderung für einen Teil der Teilnehmenden darstellt. Dies kann vor allem in der Anfangsphase zu erhöhtem Unbehagen führen. Mit etwas Übung können sich die Nutzenden jedoch an die virtuelle Umgebung anpassen, wodurch sich das Unbehagen verringert und die Leistung verbessert. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Grenzen und Potenziale von VR-Simulatoren für den Radverkehr. Darüber hinaus lieferte die Integration von Eyetracking wertvolle Erkenntnisse über die visuelle Aufmerksamkeit und das Verhalten der Nutzer während des virtuellen Radfahrens. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Verwendung von Multisensor-Ansätzen eine nützliche Methode zur schrittweisen Bewertung und Verbesserung von Prototypen von Fahrradsimulatoren sein kann.

Aufgabe für die künftige Forschungen ist, den Realismus und die Benutzererfahrung von virtuellen Umgebungen für den Radverkehr zu verbessern. Durch Nutzung des Feedbacks von subjektiven (z.B. MISC und IPQ) und physiologischen (z.B. Hautleitwert) Messungen ist es möglich, die Simulatorsysteme so zu verfeinern, dass sie das reale Radfahrverhalten noch genauer nachbilden. Das Vorhaben verdeutlicht das Potenzial der Kombination verschiedener Sensoren für ein differenzierteres Verständnis der Realitätsnähe von Simulatoren und der Anpassungseffekte.

Inhalt

Kurzfassung – Abstract	1
Abkürzungsverzeichnis	6
I. Kurzbericht	7
1 Aufgabenstellung.....	7
1.1 Ziele des Forschungsprojekts	7
2 Voraussetzungen, unter denen das Projekt geführt wurde	8
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	9
4 Stand von Wissenschaft und Technik.....	11
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
II. Eingehende Darstellung.....	13
1 Verwendung der Zuwendung und der Ergebnisse	13
1.1 AP1 Studiendesign und AP4 Anforderungskatalog.....	13
<i>Sensorik</i>	13
<i>Befragungen</i>	14
1.2 AP2 Weiterentwicklung von Simulation und Simulator	14
1.2.1 Hardwareaufbau.....	15
1.2.2 Simulationsumgebung für Studie 1	17
1.2.3 Simulationsumgebung für Studie 2	18
1.3 AP3 Studiendurchführung, -auswertung und -analyse	19
1.3.1 Versuchsaufbau	19
1.3.2 Teilnehmende	20
1.3.3 Hardware-Setup und Synchronisation	21
1.3.4 Versuchsablauf	21

1.3.5	Ergebnisse Vergleichsstudie 1	26
1.3.5.1	Rundenzeiten und Szenarien	26
1.3.5.2	Bewegungsbedingte Symptome/ Motion Sickness	29
1.3.5.3	Igroup Presence Questionnaire	31
1.3.5.4	Eye Tracking	32
1.3.5.5	Hautleitfähigkeit	35
1.3.6	Ergebnisse Vergleichsstudie 2	36
1.3.7	Zusammenfassung der Ergebnisse der beiden Studien.....	38
1.4	AP5 Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit	40
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	40
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	41
4	Voraussichtlicher Nutzen der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans	41
5	Fortschritt anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens	42
6	Veröffentlichungen der Ergebnisse	43
	Literaturverzeichnis	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Zeitplan Zwischenbericht 2024.....	10
Abbildung 2 Zeitplan nach Projektverlängerung bis 31.03.2025.....	10
Abbildung 3: Aufbau des Fahrradsimulators mit einheitlicher Plattform für die Integration möglicher Dynamiksysteme und einem Force-Feedback Motors zur Messung des Lenkwinkels und Adaption des Lenkwiderstands.....	15
Abbildung 4: Digitale Nachbildung des Campusbereichs zwischen den Gebäuden N und B der Hochschule Karlsruhe. Der Par-cours wurde realitätsgetreu positioniert, um identische Bedingungen wie im realen Fahrversuch zu schaffen.....	17
Abbildung 5: Simuliertes Karlsruher Stadtviertel mit originalgetreuen Straßenverläufen. An bestimmten Punkten entlang der Strecke werden über Checkpoints realistische Verkehrssituationen ausgelöst, darunter querender Autoverkehr oder Vorfahrtsmissachtungen.....	18
Abbildung 6: Parcours des Experiments. Die roten Punkte stellen Verkehrshütchen dar. Die Teilnehmenden fuhren Runde 1 und 2 im Uhrzeigersinn, Runde 3 und 4 gegen den Uhrzeigersinn ab.	20
Abbildung 7: Screenshot der Blickdaten-Analyse der Slalomfahrt in der Real-Umgebung mit den in Blickshift Analytics entwickelten Erweiterungen.....	26
Abbildung 8: Dauer [s] der einzelnen Szenarien in Real- und Simulationsumgebung.....	28
Abbildung 9: Blickverhalten im zeitlichen Ablauf während der Slalomfahrt.....	33
Abbildung 10: Heatmaps der Slalom-Abschnitte für jede Runde in VR und Realwelt.....	34
Abbildung 11: Boxplots der Hautleitfähigkeit im Vergleich zwischen Realwelt und VR.....	36
Abbildung 12: Route der Vergleichsstudie 2 in der Karlsruhe Innenstadt.....	36
Abbildung 13: Zeiten [s] der einzelnen Situationen in RW und VR.....	37
Abbildung 14: Blickverhalten inkl. Heatmap für das Szenario "Rechts vo Links" in RW (links) und VR (rechts).....	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht der verwendeten Geräte zur Datenerhebung	22
Tabelle 2 Übersicht der Proband:innen aufgeteilt in zwei Gruppen: Teilnehmende, die das Experiment vollständig absolvierten (n=16) und Teilnehmende, die nur die Realfahrten absolvierten (n=8). Sensordaten, die analysiert wurden sind gekennzeichnet (*).....	23
Tabelle 3 Zeit [s] je Runde während der Simulator- (SIM) und Realfahrt RW) (n=13).	27
Tabelle 4 Zeit [s] je Abschnitt und Runde während der Simulations- (Sim) und Realweltbedingung (RW) (n=13).	29
Tabelle 5 Ergebnisse des MISC-Fragebogens aufgeteilt in die zwei Gruppen 'Completed' und 'Dropouts'. Die Analysierten Datensätze sind gekennzeichnet (*).	30
Tabelle 6 Ergebnisse des IPQ aufgeteilt in die Gruppen Completed und Dropouts. Analysierte Datensätze wurden markiert (*).	32
Tabelle 7 Hautleitfähigkeit (SC) nach Abschnitten und Simulations- (Sim) bzw. Realweltumgebung (RW).....	35
Tabelle 8 Übersicht der Ergebnisse, Learnings und mögliche zukünftige Maßnahmen.	39

Abkürzungsverzeichnis

GPS	Global Positioning System
HKA	Hochschule Karlsruhe
IEEM	Institut für Energieeffiziente Mobilität
IPQ	Igroup Presence Questionnaire
IVI	Institut für Verkehr und Infrastruktur
MISC	Misery Scale
VR	Virtual Reality

I. Kurzbericht

1 Aufgabenstellung

Mit wachsendem Bewusstsein für eine nachhaltige Mobilität steigt der Bedarf zur Erforschung des Verhaltens und der Bedürfnisse von Radfahrenden. Gerade im Hinblick auf die Planung und Anpassung von Infrastruktur werden die Bemühungen, das Radfahren möglichst angenehm und stressfrei zu gestalten, zunehmend intensiviert. Für die Erforschung des Verkehrsverhaltens sowie für die Planung von Infrastrukturmaßnahmen bieten Simulationen die Möglichkeit, unter kontrollierbaren Bedingungen, wiederholbare und sichere Versuche durchzuführen. Zudem können Bürgerinnen und Bürger sowie Stakeholder frühzeitig in Planungsprozesse eingebunden werden.

Für die Simulation des Radfahrens kamen dabei meist prototypische Human-in-the-Loop Radsimulatoren zum Einsatz. Diese bestehen aus einem Fahrrad, welches von Testpersonen in einer virtuellen Umgebung genutzt werden kann. Auch wenn sich das Interesse an Fahrradsimulatoren in der Forschung in den letzten Jahren zunehmend intensiviert hat, beispielsweise ersichtlich durch den Aufbau verschiedener Prototypen an unterschiedlichen Hochschulen (vgl. Acerra et al., 2023; Ayad et al., 2024; Baumann & Dierkes, 2023; Bimberg et al., 2020), fehlte zum Zeitpunkt der Antragstellung immer noch eine fundierte Analyse, die aufzeigt, in welchen Situationen das Verkehrsverhalten mit Simulationen realistisch nachgebildet werden kann. Eine realistische Simulation mitsamt entsprechendem Simulator stellt jedoch eine Grundvoraussetzung für den Erkenntnisgewinn dar, und um eben diese in die Realität übertragen zu können.

Viele bestehende Simulatoren nutzten Bildschirme oder Leinwände für die Darstellung der Umgebung (vgl. Acerra et al., 2023; Garcia et al., 2023; O'Hern et al., 2017; Ullmann et al., 2020; Wintersberger, 2022). Eine erste Studie der HKA (vgl. Gay et al., 2023) zeigte jedoch, dass diese Ausgabegeräte nicht für Radsimulatoren geeignet sind, da der nahe Straßenbereich großen Einfluss z.B. auf die Aufmerksamkeit von Radfahrenden hat. Wenn dieser Bereich mit dem Simulator Aufbau nicht visualisiert wird, verschiebt sich das Blickverhalten schließlich stark auf andere Bereiche. Die bisherigen Ergebnisse deuteten also darauf hin, dass für die Nachbildung eines realen Verkehrsverhaltens die Darstellung der Umgebung mittels Virtual-Reality (VR) erfolgen muss. Allerdings fehlte bisher eine Datengrundlage, auf deren Basis untersucht werden konnte, wie die entwickelten Radsimulationen, mit oder ohne Verwendung von Virtual-Reality, das reale Fahrverhalten von Radfahrenden abbilden können.

1.1 Ziele des Forschungsprojekts

Ziel des Projekts war die Ausarbeitung von Unterschieden im Fahrverhalten zwischen Fahrradsimulation und realer Verkehrsinteraktion. Aus den Erkenntnissen sollte anschließend ein Anforderungskatalog bzw. ein Leitfaden für Radsimulationen entwickelt werden, der als Grundlage für zuverlässige und vergleichbare Studienergebnisse und Entwicklungen verwendet werden kann. Hierfür sollte ein Datengrundlage zur Bewertung des Nutzens von Radsimulationen geschaffen werden. Die erhobenen Daten wurden verwendet, um diese Nachbildung des Verkehrsverhaltens zu evaluieren sowie Optimierungspotenziale der Radsimulation zu identifizieren. Anschließend wurde aus den Ergebnissen der Anforderungskatalog ausgearbeitet, der einen Innovationsschub für die Entwicklung zukünftiger Radsimulationen ermöglichen soll. Um das Verhalten auf Radfahrstreifen, Fahrradstraßen,

Rechtsabbiegevorgängen und Rechts-vor-Links-Situationen darzustellen, wurden vorab konkrete Anforderungen an die zu realisierende Simulation definiert. Die für die Datenerfassung und Beurteilung des Verkehrsverhaltens notwendige Umsetzung der Radsimulation erfolgte unter anderem mittels VR-Darstellung der Umgebung und zusätzlicher Sensorik. Konkret wurden unter anderem Blickdaten, Stressindikatoren, Geschwindigkeit, Bremsungen und Fahrabstände erfasst, synchronisiert und anschließend ganzheitlich sowie situationsbezogen ausgewertet. Dieses Vorgehen wurde analog auf die Erhebung von Realdaten sowie auf zugehörige Referenz-Messungen angewendet, sodass ein Vergleich zwischen dem Verkehrsverhalten in der Simulation und der Realität durchgeführt werden konnte. Parallel dazu wurde anhand der gewonnenen Daten die Bewertungsmethodik für den Vergleich von simulierten und realen Fahrten definiert. Die Vergleichsergebnisse wurden hierbei kontinuierlich im Projektverlauf genutzt, um die Radsimulation bezüglich des Blick- und Verkehrsverhaltens zu optimieren. Anhand der abschließenden Vergleichsergebnisse konnten schließlich Aussagen über die Eignung, bzw. den Nutzen der Radsimulation geprüft und dokumentiert sowie dargestellt werden, in welchen Situationen mittels der Simulation ein reales Verhalten von Radfahrenden abgebildet werden kann.

2 Voraussetzungen, unter denen das Projekt geführt wurde

Das Projektkonsortium setzte sich aus dem Institut für Verkehr und Infrastruktur (IVI) sowie dem Institut für Energieeffiziente Mobilität (IEEM) der Hochschule Karlsruhe (HKA) als wissenschaftlichem Partner und der Blickshift GmbH als Praxis-Partner zusammen. Die Stadt Baden-Baden unterstützte als assoziiertes Partner den Projektlauf. Das Konsortium spiegelte somit eine nutzerzentrierte Ausrichtung des Projekts wider, um die Sicherstellung der Projektziele zu gewährleisten.

Die Hochschule Karlsruhe, mit den Instituten IVI und IEEM, sind bereits seit vielen Jahren im Bereich der Radverkehrsforschung und der dazugehörigen Datenerfassung des Fahrverhaltens aktiv und konnten dadurch auf ihrer bereits bestehenden Fachkompetenz aufbauen. Durch die jahrelange Erforschung des Verkehrsverhaltens von Radfahrenden konnte das IVI auf wertvolles Wissen, vor allem im Hinblick auf die Durchführung und Auswertung wissenschaftlicher Studien mit Blickverhalten und weiterer Sensorik von Fahrdaten während des Radfahrens zurückgreifen. Die ausführliche Expertise des IEEM im Bereich virtueller Testfelder von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Automobilbereich diente vor allem als ausgezeichnete Grundlage für den Aufbau und Betrieb des Radsimulators. Als Entwickler für Software-Werkzeuge für die Analyse von Blickdaten zusammen mit Interaktions- und Biometrie- sowie weiteren zeitreihenbasierten Daten konnte die Blickshift GmbH ihre umfangreichen Fachkenntnisse im Projekt einbringen.

Während der Projektlaufzeit kam es zu extern bedingten Ereignissen, wodurch eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um drei Monate zum 31.03.2025 beantragt und bewilligt wurde. Die HKA wurde Anfang Oktober 2023 Opfer eines Hackerangriffes, wodurch die Arbeitsabläufe und Kommunikation erheblich beeinträchtigt wurden. Die E-Mail-Accounts der Hochschule waren monatelang nicht nutzbar und alle Betriebssysteme auf den Computern mussten neu installiert werden. Die eigenständige Installation von spezifischen Programmen war zudem bis Projektende stark erschwert, da Software nur noch über die Administratoren der Hochschule installiert werden konnte und gleichzeitig zahlreiche Programme durch Firewalls etc. blockiert werden. Dies hatte zur Folge, dass bei der

Weiterentwicklung des Radsimulators und seiner Komponenten immer wieder Umgehungslösungen gefunden werden mussten. Da die Verwaltung und damit auch das Beschaffungsmanagement monatelang analog arbeiten mussten, kam es zu längeren Bestellzeiten für das für das Projekt nötige Equipment von bis zu drei Monaten sowie zu Fehlern - z.B. wurden Bestellungen nicht ausgelöst, weil sie verloren gingen. Der angepasste Zeitplan des Projekts findet sich in Kapitel 3.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Bearbeitung der Aufgabenstellung wurde in fünf Arbeitspakete (AP) eingeteilt, mit jeweils verschiedenen inhaltlichen Schwerpunkten. Die HKA übernahm hierbei die Rolle der Projektkoordination und damit die Aufgaben des Projektmanagements sowie der Öffentlichkeitsarbeit, mit Schwerpunkt der Verbreitung der Ergebnisse auf wissenschaftlicher Ebene. Die HKA übernahm zusätzlich die Leitung der wissenschaftlichen Begleitforschung und der Projektevaluation. Die APs wurden wie folgt aufgeteilt:

AP1: Studiendesign

AP2: Weiterentwicklung von Simulation und Simulator

AP3: Studiendurchführung, -auswertung und -analyse

AP4: Erstellung Anforderungskatalog

AP5: Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

In AP 1 wurden zunächst die Anforderung zur Planung des Studiendesigns analysiert und festgelegt. Hierfür wurde zu Beginn eine Analyse und Dokumentation zum aktuellen Stand der Technik hinsichtlich Studiendesigns mit Fokus Radverkehr sowie eine Abschätzung des Potentials der Studienmöglichkeiten zur Festlegung der ersten Studiendesigns der Datenerhebungen während der Real- und Simulatorfahrten durchgeführt. Anschließend wurden Teststrecken und Vergleichsparameter inklusive der dafür nötigen Sensorik und adäquaten Vergleichs- und Auswertemethodik. Zudem wurden die nötigen Evaluationsmethoden wie Fragebögen festgelegt.

In AP2 wurde die virtuelle Simulationsanwendung für den Fahrradsimulator entwickelt und erprobt. Hauptbestandteile des Arbeitspaketes waren die Integration der ausgewählten Teststrecke sowie der VR in die Simulation. Zudem wurden die für die Datenerfassung und -auswertung notwendigen Sensoren integriert und erste Vorbereitungen für die Datensynchronisation getroffen.

AP3 befasste sich mit der Bewertung und Durchführung des in AP1 entwickelten Studiendesigns sowie der Weiterentwicklung und technischen Validierung des Radsimulators und dessen in AP2 entwickelte Simulation. Es wurden erste Durchläufe der Real- und Simulationsstudie mit Proband:innen durchgeführt und die Daten hinsichtlich Blickverhalten und Stressmomente synchronisiert und ausgewertet. Diese ersten Ergebnisse wurden in die Datenerhebung mit Studienteilnehmer:innen übertragen und bei den folgenden Messungen und Auswertungen berücksichtigt. Im Rahmen des Vorhabens wurden zwei Studien zum Vergleich Fahrradsimulator und Realwelt durchgeführt. Für die erste Vergleichsstudie wurde ein Teil des Hochschulcampus mit einem Parcours versehen und dieser digital nachgebildet. An dieser Studie waren 24 Teilnehmende beteiligt. Die zweite Vergleichsstudie wurde für reale Straßenabschnitt in der Karlsruher Innenstadt West mit 5 Teilnehmenden durchgeführt.

In AP4 wurde die Erstellung und Durchführung von Radstudien sowie die Verbesserung der Anforderungen an Radsimulatoren analysiert. Hierfür wurde ein Anforderungskatalog mit einem Leitfaden für den Aufbau und Betrieb eines Radsimulators erstellt.

AP5 umfasst das Projektmanagement des Projekts, welches mittels agiler Methoden und einem iterativen Ansatz über alle Arbeitspakete hinweg in enger Abstimmung mit dem Konsortium geführt wurde. In regelmäßigen Projekttreffen wurde der aktuelle Projektstand, sowie dessen Ziele und Arbeitsaufgaben fortlaufend gemonitort und ggf. angepasst, um die Meilensteine zu erreichen. Zudem wurde in diesem Arbeitspaket eine Strategie für die Kommunikation und Veröffentlichung der Projektergebnisse festgelegt. Zudem wurde ein Konzept zur Wissenschaftskommunikation und Ergebnisverwertung entwickelt, welches sowohl Kommunen und Bürger:innen sowie fachfremde Personen anspricht aber auch durch zielgruppenspezifische Beiträge und Inhalte wie die Veröffentlichung von Artikeln und Präsentationen die Fachwelt informiert.

Durch die kostenneutrale Verlängerung des Projekts um drei Monate hat sich der ursprüngliche Zeitplan entsprechend verändert. Die Verschiebung der einzelnen Arbeitspakete sowie der gesamten Projektlaufzeit sind in den folgenden Zeitplänen in Abbildung 1 und 2 ersichtlich.

DataBikeSim Zeitplan - Zwischenbericht 2024

Arbeitspaket	2023						2024											
	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
AP1: Studiendesign																		
AP2: Weiterentwicklung Simulator																		
AP3: Studiendurchführung, -auswertung und -analyse																		
AP4: Erstellung Anforderungskatalog																		
AP5: Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit																		
Meilensteine																		

Abbildung 1 Zeitplan Zwischenbericht 2024

DataBikeSim Zeitplan - Verlängerung

Arbeitspaket	2023						2024												2025		
	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03
AP1: Studiendesign																					
AP2: Weiterentwicklung Simulator																					
AP3: Studiendurchführung, -auswertung und -analyse																					
AP4: Erstellung Anforderungskatalog																					
AP5: Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit																					
Meilensteine																					

Abbildung 2 Zeitplan nach Projektverlängerung bis 31.03.2025

4 Stand von Wissenschaft und Technik

Die Thematik des Projekts basiert vor allem auf der verbreiteten Verwendung von Fahrzeugsimulationen im Automobilbereich. Insbesondere in diesem Umfeld haben sich Fahrzeugsimulatoren für Anwendungen in der Wissenschaft, der industriellen Entwicklung oder in Bildungseinrichtungen etabliert. Diese Simulatoren ermöglichen Testpersonen die Nutzung des jeweiligen Fahrzeugs in einer virtuellen Umgebung. Dabei werden die Fahrzeugdynamik und damit die Positionierung des Fahrzeugs in der virtuellen Umgebung simuliert. Es erfolgt üblicherweise ein visuelles Feedback über Bildschirme oder einer Leinwand sowie bei aufwändigeren Simulationssystemen über eine interaktive, illusorische, erlebbare Darstellung der Fahrzeugbewegung. Die Motivation, solche Fahrzeugsimulationen explizit für Fahrräder zu verwenden, ergibt sich aus Anwendungsfällen der Kognitions- und Verkehrsforschung. Dabei ermöglicht eine solche Radsimulation den Radfahrenden, die Umgebung wahrzunehmen und Verkehrssituationen einzuschätzen, um angemessen auf Verkehrssituationen reagieren zu können. Dabei hängt das sichere Verkehrsverhalten von Radfahrenden hauptsächlich von der Wahrnehmung, Verarbeitung und der Reaktion auf visuelle Informationen ab. Es muss beachtet werden, dass Radfahrende nur eine beschränkte Menge an Informationen effizient verarbeiten können. Damit wird die Aufmerksamkeit auf bestimmte Reize oder Reiz Aspekte in der Umwelt fokussiert, sodass andere Aspekte übergangen oder unterdrückt werden. Entsprechend ändert sich je nach Wahrnehmungsverhältnissen auch das Verkehrsverhalten.

Ansätze zur Entwicklung und zum Aufbau von Radsimulationen wurden bisher vom Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften verfolgt (vgl. WIVW) und an der TU Braunschweig bereits in der Forschung eingesetzt. Zudem existiert ein prototypischer Aufbau einer Simulation an der TU München (vgl. Kathes et al., 2019). Der Münchner Aufbau kennzeichnet sich durch ein mit Sensorik ausgestattetes Fahrrad, welches als Eingabe- und Steuerungselement dient und die Umgebungsdarstellung durch einen oder mehreren Bildschirmen, beziehungsweise einer Leinwand. Auch die Bundesanstalt für Straßenwesen (vgl. BASt) entwickelte einen Fahrradsimulator mit der Zuhilfenahme von Monitoren zur Visualisierung des Verkehrsgeschehens. Dieser ermöglicht zwar einen Sichtbereich von 300°, deckt jedoch nicht den nahen Straßenbereich ab. Im Rahmen des RASCH-Projekts der TU München wurde bereits eine Erweiterung der Simulation um Virtual Reality für Zwecke der Öffentlichkeitsarbeit umgesetzt (vgl. Kathes et al., 2021). Diese wurde allerdings nicht tiefgehend und kritisch evaluiert sowie nicht explizit für eine realistische Nachbildung von Verkehrssituationen entwickelt. Die bisherige an der HKA bestehende Radsimulation nutzte für die Darstellung der Umgebung eine 180°-Leinwand. Dementsprechend konnte noch keine geeignete Darstellung der für das Blickverhalten von Radfahrenden relevanten Fahrbahnoberfläche erfolgen. An der TU Berlin wurde im Projekt „Virtual Cycling Environment“ (vgl. Heinovski et al. 2019) ein vergleichbarer Fahrradsimulator aufgebaut. Dabei wurde die Nutzbarkeit der simulativ erzeugten Ergebnisse jedoch nicht evaluiert, da kein Abgleich mit realen Daten aus Testfahrten erfolgte. Um die Realitätsnähe zu evaluieren wurden bisher vor allem Fahrparameter wie Geschwindigkeit, Lenkverhalten und das Neigungsverhalten untersucht (vgl., Garcia et al., 2023; O’Hern et al., 2017; Powell et al., 2018; Imine & Shoman, 2020), teilweise in Kombination mit Immersion und Motion Sickness in der VR (vgl. Matviienko et al., 2023; Imine & Murad, 2020; Wintersberger et al., 2022). Des Weiteren wurden Radsimulatoren bereits zur Identifizierung von Effekten unterschiedlicher Radinfrastrukturen verwendet (vgl. Ayad et al., 2024; Brown et al., 2017; Kathes et al., 2021) und erste Vergleiche hinsichtlich des Blickverhaltens zwischen Real- und VR-Bedingungen während des Radfahrens untersucht (vgl. Acerra et al., 2023; Gay et al., 2023).

Im Projekt *DataBikeSim* wurde deshalb der Schwerpunkt auf die Nutzbarkeitsanalyse und den Vergleich mit realen Fahrdaten gelegt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen zur weiteren Annäherung der Fahrradsimulation an die Realität verwendet werden, um deren Eignung für Verkehrsplanungen zu steigern und Anforderungen an Fahrradsimulationen zu generieren.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Projekt *DataBikeSim* fand eine Zusammenarbeit mit zwei weiteren mFUND-Projekten statt:

- COLLISION ZERO – Kinder und Jugendliche erleben Gefahren im Straßenverkehr, ohne gefährdet zu sein, von Wildstyle Network GmbH & Fraunhofer
- ESSEM Emotion Sensing für (E-) Fahrradsicherheit und Mobilitätskomfort, von KIT

Es fand ein Austausch mit den beiden Projekten zur Ausgestaltung und Durchführung des Vorhabens statt. Zudem umfasste dies Mitwirkung an der Begleitforschung/Ausrichtung von Formaten. Darüber hinaus hat das Projekt *DataBikeSim* an Netzwerkveranstaltungen sowie der mFUND Konferenz teilgenommen.

II. Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und der Ergebnisse

Durch die Verzögerungen im Projekt mussten die zeitlichen Ziele der Meilensteine teilweise angepasst werden. Im Wesentlichen wurde der geplante Ablauf eingehalten und die Ziele der Arbeitspakete erreicht. Die Darstellung der Arbeiten je Arbeitspaket wird in den folgenden Kapiteln dargestellt.

1.1 AP1 Studiendesign und AP4 Anforderungskatalog

In diesem Arbeitspaket wurde das Studiendesign für die Real- und Simulatorstudien festgelegt. Ziel der Studie war es, das Verkehrsverhalten beim Radfahren in einer realen Umgebung mit dem Verhalten im Simulator zu vergleichen. Hierfür wurde eine Methodik entwickelt, um sowohl die Simulatorfahrten als auch die Realfahrten zu dokumentieren und zu analysieren. Um das Verkehrsverhalten vergleichen zu können, ist eine breite Datengrundlage erforderlich (vgl. Trefzger et al., 2024). Deshalb wurde in den Untersuchungen ein Mixed-Method-Ansatz gewählt, um eine breite Fülle an unterschiedlichen Daten aus Sensorik sowie Befragung kombiniert werden.

Sensorik

Fahrradcomputer:

Zur Analyse verschiedener Daten zum Fahrverhalten wurde ein Garmin Edge 530 Fahrradcomputer in Verbindung mit einem Powermeter (Rotor 2Inpower) und einem Trekkingfahrrad verwendet. Dadurch konnten Daten zur Geschwindigkeit, Trittfrequenz und Leistung der Radfahrenden aufgezeichnet und eine Bewertung des Beschleunigungs- und Bremsverhaltens gegeben werden. Daraus ließen sich schließlich die Stellen, an denen gezielt beschleunigt oder abgebremst wurde, identifizieren.

Eyetracking:

Da bei Radfahren der überwiegende Teil der Informationen visuell wahrgenommen wird, kommt dieser Modalität eine zentrale Bedeutung zu. Schätzungen zufolge erfolgt etwa 90% der Informationsaufnahme über das Sehen, wobei die genaue Quantifizierung wissenschaftlich umstritten ist (vgl. Sivak, 1996). Aus diesem Grund war es wichtig, das Blickverhalten auch im Fahrradsimulator abbilden zu können. Hierfür wurde ein Varjo Aero VR-Headset verwendet. Das Headset verfügt über eine Displayauflösung von 2880 × 2720 Pixel pro Auge bei einer Bildwiederholrate von 90 Hz. Das Sichtfeld beträgt 115° horizontal und 134° diagonal. Der integrierte Eye-Tracker erfasst Blickpunkte ebenfalls mit 200 Hz. für den realen Teil des Experiments wurden die Blickdaten mit einem Pupil Labs Neon Eye-Tracking-Headset erfasst, das mit einer frontalen Kamera (100° x 80°) das gesamte menschliche Blickfeld abbildet. Die Blickpunkte wurden mit einer Frequenz von 200 Hz aufgezeichnet (vgl. Baumann & Dierkes, 2023). Dadurch konnte analysiert werden, welche Elemente („Areas of Interest“) innerhalb einer Umgebung (Stimulus) zu welchem Zeitpunkt, wie lange und in welcher Reihenfolge betrachtet oder ob bestimmte Bereiche überhaupt fixiert wurden.

Hautleitfähigkeit:

Während des Radfahrens ist Stress ein häufiger relevanter Einflussfaktor, der zu einem subjektiven Unsicherheitsgefühl führen kann und bspw. mit einer veränderten bzw. längeren Routenwahl von Radfahrenden einhergeht. Für die Beurteilung und den Vergleich subjektiver Eindrücke während des

Radfahrens in realer und simulierter Umgebung, wurde die Hautleitfähigkeit mittels Shimmer GSR+-Einheit aufgezeichnet und analysiert.

Accelerometer:

Durch eine schlechte oder unebene Oberfläche der Fahrbahn können Verschiebungen in der visuellen Aufmerksamkeit von weiter entfernten Bereichen hin zur unmittelbaren Fahrbahn vor dem Vorderrad führen (Trefzger et al., 2021; Vansteenkiste et al., 2014) und sind daher wesentlich, um das Blickverhalten korrekt interpretieren zu können. Deshalb wurde mittels einer weiteren Shimmer GSR+-Einheit die vertikalen Beschleunigungsdaten aufgezeichnet und analysiert. Obwohl die Simulation unebener Fahrbahnen eine spürbare Wirkung hat, werden durch die Fahrbahnunregelmäßigkeiten verursachte Vibrationen in bisherigen Fahrradsimulationen sowie auch in unserer nicht berücksichtigt.

Videoaufzeichnung:

Mit Hilfe von Miovision Scout Verkehrskameras wurden die Fahrten in Realexperiment 1 aus Vogelperspektive aufgezeichnet. Dies sollte Aufschluss über die individuellen Fahrlinien der Teilnehmenden geben.

Befragungen

Zusätzlich zu der Sensorik wurden zwei Fragebögen für weitere Informationen der Teilnehmenden verwendet:

Igroup Presence Questionnaire (IPQ):

Mit Hilfe dieser Skala kann das Gefühl der eigenen Präsenz in einer virtuellen Umgebung gemessen werden. Vor allem wird dabei beurteilt, wie stark das Gefühl der physischen Präsenz und die Aufmerksamkeit, welche der virtuellen Umgebung gewidmet wird vorhanden ist sowie die subjektiv wahrgenommene Einbindung in das virtuelle Umfeld und wie real die Umgebung erlebt wird. Es werden hierbei 14 Items innerhalb drei Subskalen abgefragt.

Misery Scale (MISC):

Dieser Fragebogen ermöglicht die Beurteilung des allgemeinen Wohlbefindens der Teilnehmenden anhand einer einzelnen Frage. Dies ist besonders hilfreich, um das Befinden hinsichtlich einer möglichen Bewegungskrankheit (Motion Sickness) während der Nutzung eines Simulators zu erfassen. Für Studiendesigns, die keine tiefere Analyse von Übelkeit und Desorientierung erfordern, liefert der MISC eine ausreichende Datengrundlage.

1.2 AP2 Weiterentwicklung von Simulation und Simulator

Das zentrale Ziel von AP2 war die kontinuierliche Weiterentwicklung sowohl der Simulationsumgebung als auch der zugrunde liegenden Simulator-Hardware. Durch diese Maßnahmen sollte eine höhere Realitätsnähe erreicht, die technische Leistungsfähigkeit gesteigert und die Grundlage für wissenschaftlich belastbare Vergleichsstudien geschaffen werden. Neben der Erweiterung der technischen

Infrastruktur – etwa durch die Integration neuer Hardware-Komponenten und Aufnahmemodule – umfasste die Arbeit auch die modellbasierte Umsetzung von Testumgebungen sowie deren Einbindung in den Fahrradsimulator. Damit wurde ein wesentlicher Beitrag zur Validität künftiger Experimente und zur Übertragbarkeit der Ergebnisse in reale Verkehrssituationen geleistet.

1.2.1 Hardwareaufbau

Im Rahmen von Arbeitspaket 2 (AP2) wurde eine neue Plattform für den Radsimulator entwickelt, die nicht nur eine Weiterentwicklung der bisherigen Simulationsumgebung darstellt, sondern zugleich die Grundlage für zukünftige Erweiterungen wie die Simulation physischer Bewegungen bildet (s. Abbildung 3). Ein wesentlicher technischer Fortschritt war die erfolgreiche Integration des Direct-Drive Force-Feedback Motors *Moza R12*. Dieser Motor ermöglicht ein besonders realistisches und zuverlässiges Lenkerlebnis und bietet damit eine wesentliche Verbesserung gegenüber zuvor eingesetzten Lösungen. Neben der präzisen Erfassung des Lenkwinkels lässt sich der Lenkwiderstand adaptiv an unterschiedliche Fahrsituationen anpassen. Dadurch können dynamische Effekte, wie das Auftreten instabiler Fahrverhalten bei höheren Geschwindigkeiten (> 15 km/h), simuliert und gleichzeitig kontrolliert verhindert werden. Darüber hinaus erlaubt die neue Plattform die Simulation unterschiedlicher Fahrbahnumtergründe, wie etwa Kies- und Schotterwege, gepflasterte Straßen oder Asphalt, wodurch ein noch vielseitigeres Fahrgefühl entsteht. Zusätzlich können auch schlagartige Laständerungen, beispielsweise beim Überfahren eines Bordsteins, realitätsnah wiedergegeben werden. Dies trägt maßgeblich dazu bei, sowohl die Realitätsnähe als auch die Sicherheit der Simulatorfahrten zu erhöhen.



Abbildung 3: Aufbau des Fahrradsimulators mit einheitlicher Plattform für die Integration möglicher Dynamiksysteme und einem Force-Feedback Motors zur Messung des Lenkwinkels und Adaption des Lenkwiderstands.

Der Fahrradsimulator wurde im Rahmen des Projekts durch die erfolgreiche Implementierung der VR-Brille Varjo Aero mit integriertem Eyetracker erweitert. In enger Abstimmung mit Blickshift konnte die Ausgabe und Verarbeitung der Blickdaten in den Datenverarbeitungsprozess integriert werden.

Blickdaten aus Unity in Echtzeit an die Datenerfassungs-Software Blickshift Recorder übertragen und mit weiteren Sensorströmen synchronisiert aufgezeichnet werden konnten. Import-Tools für Eye-Tracking-Daten ermöglichten die flexible Verarbeitung mehrerer Probandendatensätze. Die Datenanalyse-Software Blickshift Analytics wurde gezielt für die Projektanforderungen erweitert– u. a. durch einen XML-Importer für GPS-Daten, automatisierte Synchronisation aller Sensorquellen (GPS, Eye Tracking, Biosignale, Video) sowie Datenimport- und -bereinigungsverfahren für Real- und VR-Fahrten. Ein Meilenstein war die Entwicklung einer GPS-Trajektorienvisualisierung auf Basis von OpenStreetMap mit gleichzeitiger Darstellung synchronisierter Blick- und Biosignaldaten. Zudem wurden situationsspezifische Auswertungs-Workflows entwickelt, mit denen einzelne Verkehrsszenen gezielt analysiert werden konnten. Diese Tools wurden gemeinsam mit der Hochschule Karlsruhe getestet und anschließend für die Auswertung der Hauptstudien eingesetzt.

Neben einer Überprüfung der Datenqualität wurden Funktionen zur Extraktion des Blickstrahls sowie der jeweils fokussierten Objekte aus der Simulationsumgebung implementiert. Hierfür wurde eine Konversion der während der VR-Fahrten aufgenommenen Screenshots in ein Video sowie dessen zeitsynchrone Integration in Blickshift Analytics implementiert. Zur Vergleichbarkeit von Blickdaten in Simulations- und Realfahrten wurde eine Projektion der Blickdaten auf eine 2D-Kartenansicht entwickelt, die im VR-Fall direkt in Blickshift Analytics implementiert wurde, für die Realfahrten als Unterstützung des Imports von manuell gemappten Fixationen aus Pupil-Labs. Auf diese Weise können valide und differenzierte Informationen über das Blickverhalten der Probandinnen und Probanden erfasst werden. Diese umfassen insbesondere die Blickrichtung, die Dauer der Fixationen sowie die Identifikation relevanter Objekte oder Bereiche innerhalb der Fahrscene.

Der entscheidende Mehrwert dieser Informationen liegt darin, dass aufmerksamkeitsensitive Fahrsituationen – wie das rechtzeitige Erkennen von Hindernissen, Priorisierung kollidierender Wahrnehmungsaufgaben oder Ablenkung im komplexen Straßenverkehr – detailliert untersucht werden können. Darüber hinaus dienen die Blickdaten als Grundlage zur Validierung der Realitätstreue der entwickelten Simulationsumgebung, indem sie mit Daten realer Fahrversuche verglichen werden. So lassen sich sowohl potenzielle Einschränkungen der Simulation identifizieren als auch gezielte Verbesserungen ableiten. Perspektivisch eröffnen diese Daten zudem die Möglichkeit, adaptive Simulationsszenarien auf Basis von Aufmerksamkeitsmustern zu entwickeln.

Zur Dokumentation des Sichtfeldes während der Versuche wurde ein eigenes Aufnahmemodul entwickelt. Standardlösungen wie der *Unity Recorder* erwiesen sich für den produktiven Betrieb als ungeeignet, da sie die Bildwiederholungsrate deutlich reduzierten und damit die Darstellungsqualität der Simulation beeinträchtigten. Der wesentliche Grund lag darin, dass der Recorder single-threaded auf dem Main-Thread von Unity ausgeführt wurde. Auf demselben Thread läuft jedoch auch die physikalische Simulation, sodass es durch die Konkurrenz um Rechenzeit zu deutlichen Leistungseinbußen kam. Dies zeigte sich insbesondere in Form von reduzierten Bildraten und ungleichmäßigen Bewegungsabläufen, die den Realismus der Versuche beeinträchtigten. Hinzu kam, dass der Recorder ausschließlich innerhalb der Unity-Editor-Umgebung lauffähig war und keine eigenständigen Builds unterstützt wurden. Damit war ein produktiver Einsatz im Simulationsbetrieb grundsätzlich nicht möglich.

Das neu entwickelte Aufnahmemodul adressiert diese Einschränkungen durch eine klare Trennung von Simulations- und Aufzeichnungsprozessen. Während der Experimente werden die Rohdaten der

jeweils dargestellten Szenen parallel zur Simulation aufgezeichnet und in einem proprietären Zwischenformat zwischengespeichert. Dieser Schritt ist so implementiert, dass er den Main-Thread der Simulation nicht beeinträchtigt und somit auch die Echtzeitfähigkeit gewahrt bleibt. Erst nach Abschluss der Versuche erfolgt im Hintergrund die Verarbeitung der Rohdaten zu standardisierten Ausgabeformaten wie JPEG-Bildsequenzen und zusammengesetzten Videodateien.

Durch dieses zweistufige Vorgehen konnte zum einen eine durchgehend flüssige Darstellung im Betrieb sichergestellt werden, zum anderen wird die Aufzeichnungsqualität unabhängig von der jeweiligen Rechenlast der Simulation gewahrt. Zudem erlaubt das modulare Design des Recorders eine flexible Weiterentwicklung, beispielsweise durch die Ergänzung zusätzlicher Exportformate (z. B. Rohdaten für Eye-Tracking-Overlay-Analysen oder synchronisierte Multi-Stream-Aufnahmen). Damit stellt das entwickelte Aufnahmemodul nicht nur eine technische Lösung für die zuverlässige Dokumentation der Sichtfelder dar, sondern eröffnet auch neue Möglichkeiten für eine standardisierte Nachbearbeitung und Analyse komplexer Versuchsszenarien.

1.2.2 Simulationsumgebung für Studie 1

Im Rahmen von Arbeitspaket 2 (AP2) wurde für die Durchführung der ersten Vergleichsstudie ein Teilbereich des Hochschulcampus digital nachgebildet, um darin einen virtuellen Parcours mit Verkehrspylo- nen zu realisieren (s. Abbildung 4). Grundlage hierfür bildete ein von der Stadt Karlsruhe zur Verfügung gestelltes Orthofoto, das als georeferenzierte Basis für den weiteren Modellierungsprozess diente. Dieses Orthofoto wurde zunächst in AutoCAD importiert und maßstabsgetreu skaliert, sodass eine korrekte räumliche Zuordnung gewährleistet war. Anschließend erfolgte die Einzeichnung der geplanten Positionen der Verkehrspylo- nen in den Plan, womit die Basis für die spätere Übertragung in die Simulationsumgebung geschaffen wurde.

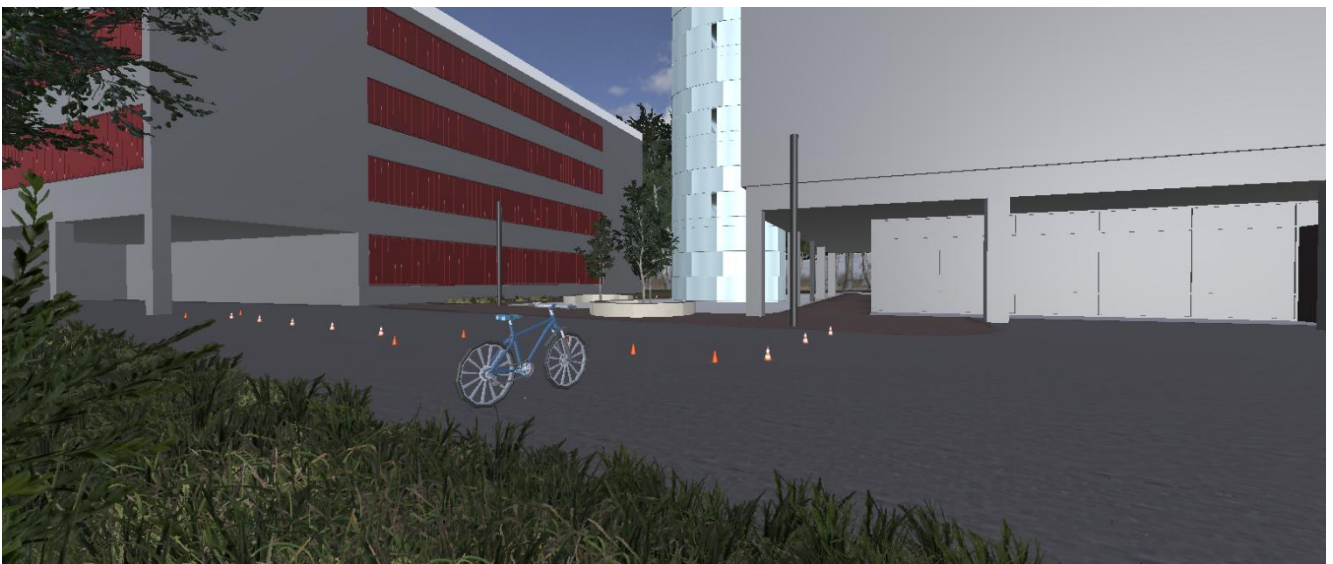


Abbildung 4: Digitale Nachbildung des Campusbereichs zwischen den Gebäuden N und B der Hochschule Karlsruhe. Der Parcours wurde realitätsgetreu positioniert, um identische Bedingungen wie im realen Fahrversuch zu schaffen.

Die aufbereitete 2D-Karte wurde daraufhin in Blender überführt, wo eine dreidimensionale Nachmodellierung der relevanten Campusbereiche vorgenommen wurde. Hierbei wurden insbesondere Gebäude, Wegeflächen sowie zentrale Orientierungspunkte umgesetzt, um eine hinreichend detaillierte, aber dennoch performante Umgebung darzustellen. Das fertige 3D-Modell wurde im Anschluss in die bestehende Unity-Umgebung des Fahrradsimulators eingebunden.

In Unity erfolgte eine weitere Anreicherung der Szene durch die Integration zusätzlicher Umgebungsdetails. Neben der Implementierung einer Skybox und der zuvor definierten Pylonen wurden auch visuelle Elemente wie Bäume und Vegetation ergänzt. Dadurch konnte die virtuelle Testumgebung nicht nur funktionsgerecht, sondern zugleich realitätsnah und immersiv gestaltet werden. Dies ermöglicht es, die Vergleichsstudie unter Bedingungen durchzuführen, die den tatsächlichen räumlichen Gegebenheiten des Campus sehr nahekommen und somit valide Versuchsbedingungen für die Probandinnen und Probanden schaffen.

1.2.3 Simulationsumgebung für Studie 2

Ebenfalls im Rahmen von Arbeitspaket 2 (AP2) wurde für die zweite Vergleichsstudie ein Ausschnitt der Karlsruher Innenstadt-West in die Simulationsumgebung integriert (s. Abbildung 5). Als Grundlage diente das von der Stadt Karlsruhe bereitgestellte 3D-Stadtmodell (LOD2), das durch seinen hohen Detaillierungsgrad bzgl. Straßenverläufe eine geeignete Basis für eine realitätsnahe Nachbildung des Untersuchungsgebiets bietet. Auf Basis dieses Modells wurden in Blender die relevanten Straßenverläufe sowie die Fahrbahnmarkierungen präzise nachmodelliert und anschließend als fertiges Szenenmodell in die Unity-Umgebung des Fahrradsimulators übertragen.



Abbildung 5: Simuliertes Karlsruher Stadtviertel mit originalgetreuen Straßenverläufen. An bestimmten Punkten entlang der Strecke werden über Checkpoints realistische Verkehrssituationen ausgelöst, darunter querender Autoverkehr oder Vorfahrtsmissachtungen.

Innerhalb von Unity wurde das Modell um typische städtische Elemente ergänzt, darunter Verkehrsschilder, Bäume und abgestellte Fahrzeuge, um ein authentisches Stadtbild zu erzeugen. Darüber

hinaus wurden verschiedene Verkehrssituationen implementiert, die für den Radverkehr von besonderer Relevanz sind. Dazu gehören u. a. Rechts-vor-Links-Regelungen auf Kreuzungen sowie Konfliktsituationen mit rechtsabbiegenden Kfz. Diese Szenarien wurden gezielt programmiert, um im Simulationsbetrieb realistische Begegnungssituationen zu erzeugen, wie sie im innerstädtischen Radverkehr regelmäßig auftreten. Auf diese Weise konnte eine Testumgebung geschaffen werden, die eine validierte Untersuchung von Fahrverhalten und Interaktionen im urbanen Kontext ermöglicht.

1.3 AP3 Studiendurchführung, -auswertung und -analyse

In diesem Arbeitspaket wurde das in AP1 dargestellte Studiendesign sowie die in AP2 Simulation und Simulator verwendet, um die Real- und Simulationsexperimente durchzuführen. Dabei wurden alle Daten aufgezeichnet und anschließend ausgewertet.

1.3.1 Versuchsaufbau

Ziel des Experiments war es, das Fahrverhalten beim Radfahren zu untersuchen. Dafür wurden Blickverhalten, Stressmomente, Fahrspuren und weitere radfahrerspezifische Parameter während einer realen als auch in einer VR-Simulation aufgezeichnet und miteinander verglichen. Dabei kamen unterschiedliche Streckenelemente zum Einsatz:

- Gerade Strecke
- Scharfe Kurve
- 90°-Abbiegung
- Engpass
- Slalom

Das Realexperiment fand auf einem abgegrenzten Bereich des Universitätscampus statt (s. Abbildung 6). Dieser Ort wurde gewählt, da er genügend Platz bietet, um die einzelnen Aufgaben mithilfe von Verkehrshütchen klar abzugrenzen, frei von motorisiertem ist und während der Vorlesungszeiten nur eine geringe Fußgängerdichte aufweist. Letzteres war besonders wichtig, dass Ablenkungen wie Passanten die Ergebnisse, insbesondere die Eye-tracking-Daten, verfälschen können.

Die Fahrbahn war durchgehend eben. Beim Radfahren spielt das Gewicht zwar eine Rolle für den Kraftaufwand, auf flachem Terrain ist dieser Einfluss jedoch gering, da dort der Rollwiderstand die entscheidende Gegenkraft darstellt. Auch der Luftwiderstand konnte vernachlässigt werden, da die gefahrene Geschwindigkeit niedrig war. Zudem war die Fahrbahn in sehr gutem Zustand (keine Schäden wie bspw. Schlaglöcher), sodass eine gleichmäßige Fahrt möglich war. Dies war ein zentraler Aspekt im Versuchsaufbau, schlechte Oberflächenverhältnisse lenken die visuelle Aufmerksamkeit stärker auf den Bereich unmittelbar vor dem Vorderrad – ein Effekt, der im Simulator nicht abgebildet wird, weshalb eine glatte Fahrbahn im Realexperiment essentiell für die Vergleichbarkeit der beiden Studien war.

Zur exakten Dokumentation der Hütchen-Positionen wurde ein detaillierter Plan in AutoCAD auf Basis eines Orthofotos erstellt. Dieser Plan diente auch als Grundlage für die Modellierung der HKA-Campus

samt Versuchsparcours im Radsimulator. Die Gebäude und ihre Texturen wurden mit der Software Blender nachgebildet, das finale 3D-Modell anschließend in Unity importiert.

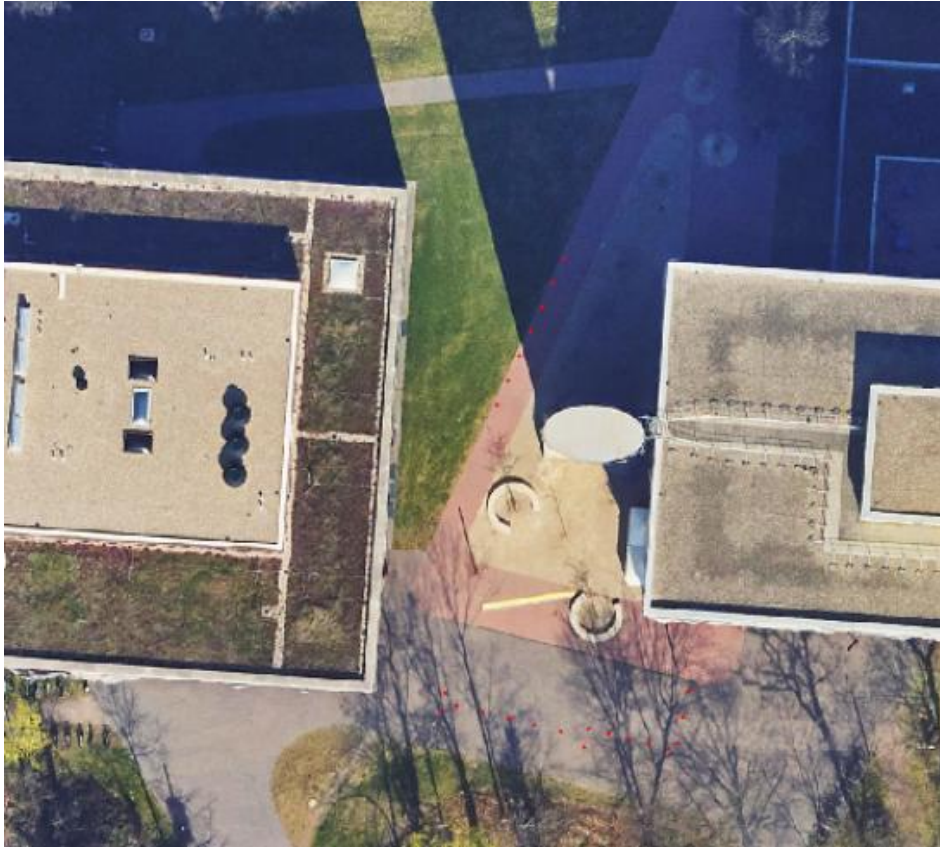


Abbildung 6: Parcours des Experiments. Die roten Punkte stellen Verkehrshütchen dar. Die Teilnehmenden fuhrten Runde 1 und 2 im Uhrzeigersinn, Runde 3 und 4 gegen den Uhrzeigersinn ab.

1.3.2 Teilnehmende

Insgesamt nahmen 24 Personen an der Studie teil, davon 14 männlich und 10 weiblich mit einem Durchschnittsalter von $33,38 \pm 7,66$ Jahren. Fünf der Teilnehmenden hatten zuvor noch nie VR genutzt, 14 bereits 1-3 Mal, 3 Proband:innen bis zu zehnmal und zwei Personen häufiger als 10 Mal. Einen Führerschein besaßen 22 der Teilnehmenden. Hinsichtlich der Fahrradnutzung gaben 10 Teilnehmende an, täglich zu fahren, 9 Personen mehrmals pro Woche, 2 mindestens einmal pro Woche, 2 mindestens einmal im Monat und 1 Person fuhr seltener als einmal pro Monat Fahrrad. Die allgemeine Technologieaffinität, gemessen mit der ATI-S-Skala, lag bei $3,76 \pm 1,72$.

16 Teilnehmende schlossen die Studie vollständig, inkl. Simulationsfahrt ab. Aufgrund teilweiser Probleme bei der Aufzeichnung der Sensordaten konnten letztlich nur die Daten von 13 Teilnehmenden in die Analyse einbezogen werden. Die Drop-Out-Gruppe wies durchschnittlich eine etwas höhere Technologieaffinität auf als die Gruppe, die alle Fahrten absolvierte (ATI-S-Wert: $3,91 \pm 1,09$ vs. $3,69 \pm 1,09$).

Die Drop-Out-Gruppe hatte jedoch deutlich weniger VR-Erfahrung. Hinsichtlich der Fahrradnutzung gab es zwischen den beiden Gruppen kaum Diskrepanzen, mit Ausnahme einer Person gaben alle an mindestens einmal pro Woche Fahrrad zu fahren. (s. Tab. 1).

1.3.3 Hardware-Setup und Synchronisation

Für die Sicherstellung der zeitlichen Abstimmung der verschiedenen Sensordatenströme, wurden alle Geräte vor Beginn der Datenerfassung synchronisiert. Die Zeitstempel wurden vereinheitlicht, indem sämtliche zeitabhängigen Geräte wie z.B. Smartphones oder Fahrradcomputer mit demselben WLAN-Netzwerk verbunden wurden. Dadurch konnte der Aufwand für eine nachträgliche Anpassung deutlich reduziert werden. Zusätzlich wurde eine neue GIS-Kartenansicht in *Blickshift Analytics* integriert, über die unter anderem die GPS-Daten übersichtlich und benutzerfreundlich visualisiert werden können. Um den Datenimport in die Analysesoftware *Blickshift Analytics* zu vereinfachen und eine effiziente Weiterverarbeitung sicherzustellen, wurde für jede Proband:in ein strukturiertes Ordnersystem entwickelt, in dessen entsprechende Verzeichnisse die Datenströme einsortiert wurden.

1.3.4 Versuchsablauf

Zunächst wurden die Teilnehmenden über den Ablauf des Experiments sowie den Daten, die währenddessen erhoben werden und möglichen Risiken im Zusammenhang mit Simulator Sickness informiert. Anschließend wurde die Einverständniserklärung unterzeichnet und eine zufällige ID zur Anonymisierung der Datensätze zugeordnet. Danach wurden die Sensoren vorbereitet und angebracht. Eine Hälfte der Proband:innen begann mit der Realfahrt, die andere Hälfte mit der Simulationsfahrt.

Was die Anbringung der Sensorik betrifft unterschied sich die Real- von der Simulationsfahrt hinsichtlich des Beschleunigungssensors, des Fahrradcomputers, der Miovision Kameras und der Eye-Tracking-Brille (das Blickverhalten wurde mittels Aero Varjo in der Simulationsfahrt aufgezeichnet), welche in der Simulationsfahrt nicht angebracht wurden. Die Sattelhöhe wurde in beiden Fällen individuell angepasst. Nach Überprüfung der Sensorik wurde in beiden Experimenten zunächst Übungsfahrten absolviert (nicht im Parcours sondern auf einer frei gewählten Strecke), um ein Baseline-Niveau für die Hautleitfähigkeit zu erheben. Alle anderen Geräte bis auf die Eye-Tracking-Brille zeichneten ebenfalls während der Baseline-Fahrt auf. Vor der Fahrt, nach der Einföhrungsfahrt, nach den ersten zwei Runden sowie nach Abschluss der Runden 3 und 4 wurden die Proband:innen mit Hilfe des MISC hinsichtlich ihres Gesundheitszustandes befragt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde dies nicht nur beim Simulationsexperiment sondern auch bei den Realexperimenten abgefragt. Der IPQ wurde nach Absolvierung aller Fahrten abgefragt. Tab. 1 zeigt nochmal die verwendeten Geräte und Komponenten zur Datenaufzeichnung.

Tabelle 1 Übersicht der verwendeten Geräte zur Datenerhebung

Device	Recorded Data	Key Specifications
Pupil Labs Neon [3]	Gaze behavior (real-world)	200 Hz gaze tracking; 100° × 80° FOV front camera; connected via smartphone
Varjo Aero	Gaze behavior (simulator)	200 Hz gaze tracking; 2880 × 2720 pixels per eye; 115° horizontal FOV; 90 Hz refresh rate
Shimmer GSR+	Heart rate, skin conductance, accelerometer, gyroscope	2 sensors; individually calibrated; timestamp-verified using Consensys software
Garmin Edge 530	Speed, cadence, power output, GPS	Connected to bike-mounted sensors; automatic time sync via Wi-Fi
Miovision Cameras	Top-down course video	Two telescopic units positioned at key course sections
Cycling Simulator Setup	Steering input, resistance, visual immersion	Roller trainer with steering resistance; powered base stations; visual feedback via Unity

Tabelle 2 Übersicht der Proband:innen aufgeteilt in zwei Gruppen: Teilnehmende, die das Experiment vollständig absolvierten (n=16) und Teilnehmende, die nur die Realfahrten absolvierten (n=8). Sensordaten, die analysiert wurden sind gekennzeichnet (*).

ID	Age	Gender	ATI-S	VR Experience	Cycling Frequency
Dropouts					
(n = 8)					
7792	29	m	5.00	1–3 times	weekly
2149*	25	m	4.25	Never	daily
1803	26	f	5.00	Never	weekly
1000	60	f	1.75	Never	daily
0420	29	m	4.25	1–3 times	daily
7452	48	m	4.25	Never	daily
2310	62	f	3.75	1–3 times	monthly
2013	28	f	3.00	1–3 times	weekly
M	38.38	-	3.91	-	-
SD	15.74	-	1.09	-	-
Var	247.69	-	1.18	-	-
Completed					
(n = 16)					
3874*	32	m	4.75	>10 times	weekly
2075	39	m	2.50	1–3 times	weekly
4315*	25	m	5.00	4–10 times	daily
9871*	31	f	4.00	4–10 times	daily
5012*	30	f	3.75	1–3 times	weekly
4182	22	m	3.75	1–3 times	weekly
7653*	21	m	3.25	1–3 times	daily
7189*	23	m	3.75	1–3 times	weekly
2342*	26	m	5.00	4–10 times	weekly
6666*	27	f	4.00	1–3 times	daily
1910	46	f	1.75	1–3 times	yearly
0712	39	f	4.25	1–3 times	weekly
9876*	36	m	5.50	>10 times	weekly
2596*	40	f	2.50	Never	daily
1235*	35	m	3.00	1–3 times	daily
1965*	22	m	2.25	1–3 times	weekly
M	30.88	-	3.69	-	-
SD	7.66	-	1.09	-	-
Var	58.65	-	1.18	-	-
M Total	33.38	-	3.76	-	-
SD Total	11.26	-	1.09	-	-
Var Total	121,40	-	1.14	-	-

Fahrt in der realen Welt

Zur Vorbereitung auf das Experiment wurden die Teilnehmer zunächst nach ihrer Sehschärfe befragt. Falls erforderlich, wurden die Gläser der Pupil Labs Neon Eye-Tracking-Brille ausgetauscht (innerhalb eines Bereichs von -3 bis +3 Dioptrien). Anschließend setzten die Teilnehmer die Brille auf. Die Brille wurde dann von den Studienmitarbeitern kalibriert. Als nächstes wurde der Shimmer GSR+ Sensor angebracht, um die Herzfrequenz und den Hautleitwert aufzuzeichnen. Der Pulssensor wurde am Zeigefinger angebracht, während die Hautleitwertsensoren am Mittel- und Ringfinger angebracht wurden und der Sensor am Handgelenk befestigt wurde. Der Garmin-Radcomputer wurde an den Lenkern befestigt und überprüft. Der Shimmer-Sensor, der Beschleunigungsdaten aufzeichnet, wurde unter dem Sattel angebracht. Die Sattelhöhe wurde dann an den Teilnehmer angepasst. Nach der Überprüfung der Sensoren wurden die Teilnehmer gebeten, eine Übungsrunde zu absolvieren, um einen Grundwert für das Stressniveau zu ermitteln, indem sie eine lange gerade Strecke hin und zurück fuhren. Während dieser ersten Runde waren der Beschleunigungssensor, die Stresssensoren und die Miovision-Verkehrskameras bereits aktiviert. Nach der Proberunde wurde den Teilnehmern die Streckenführung erklärt. Dann wurde mit der Aufzeichnung des Eye-Trackings und des Radcomputers begonnen. Die Teilnehmer fuhren die Strecke zunächst zweimal gegen den Uhrzeigersinn und dann zweimal im Uhrzeigersinn. Nach der Fahrt wurde die Aufzeichnung aller Sensoren und Kameras gestoppt.

Simulatorfahrt.

Während der Fahrt im Simulator wurden die Teilnehmer darüber informiert, dass es zu einer Simulatorkrankheit kommen könnte, und es wurde ihnen versichert, dass sie das Experiment jederzeit abbrechen könnten. Der Shimmer GSR+ Sensor, der zur Aufzeichnung der Herzfrequenz und des Hautleitwerts dient, wurde angebracht. Dann wurde den Teilnehmern eine gedruckte Karte gezeigt, auf der die Strecke eingezeichnet war. Wie in der realen Welt wurden die Teilnehmer angewiesen, zwei Runden gegen den Uhrzeigersinn zu fahren, gefolgt von zwei Runden im Uhrzeigersinn. Die Sattelhöhe des Simulatorfahrrads wurde eingestellt, und die Teilnehmer wurden gebeten, sich auf das Fahrrad zu setzen. Anschließend wurde das VR-Headset zur Verfügung gestellt, und die Teilnehmer stellten es mit Hilfe des Studienpersonals ein. Daraufhin erfolgte eine automatische Ein-Punkt-Kalibrierung des integrierten Eyetrackers im Varjo Aero-Headset. An diesem Punkt wurden die Teilnehmer gebeten, ihre Gefühle zu schildern und ihre Antworten anhand der Checkliste für bewegungsinduzierte Symptome (MISC) zu erfassen. Um die Sicherheit der Teilnehmer zu gewährleisten, wurde während der Sitzung auf jeder Seite des Teilnehmers ein Mitarbeiter positioniert. Anschließend wurde mit der Aufzeichnung der Simulatordaten begonnen, einschließlich der Bilder des Sichtfelds, der Blickpunkte und der Fahrparameter. Es folgte eine Einführungsrunde, die der realen Fahrt ähnelte. Die Teilnehmer fuhren hauptsächlich auf einer geraden Straße, bevor sie zum Ausgangspunkt des Kurses zurückkehrten. Während dieser Einführungsrunde wurden die Teilnehmer ermutigt, sich allmählich an den Simulator zu gewöhnen, indem sie zunächst geradeaus fuhren und dann in größere Kurven hineinsteuerten. Nach Abschluss der Einführungsrunde wurden die Teilnehmer erneut gebeten, ihren Zustand anhand der MISC-Skala zu beurteilen. Anschließend fuhren sie zwei Runden gegen den Uhrzeigersinn, gefolgt von einer dritten MISC-Bewertung. Zum Abschluss fuhren die Teilnehmer zwei Runden im Uhrzeigersinn und nahmen eine letzte MISC-Bewertung vor. Nach Beendigung der Simulatorfahrt wurde die Datenaufzeichnung (PC und Shimmer GSR+) gestoppt, und die Teilnehmer wurden gebeten, einen Fragebogen auszufüllen. Datenaufbereitung und Datenanalyse

Datenauswertung

Um den Datenimport in die Analysesoftware Blickshift Analytics (<https://www.blickshift.com/products-services/blickshift-analytics/>) zu rationalisieren und eine effiziente Weiterverarbeitung zu gewährleisten, wurde für jeden Teilnehmer ein strukturiertes Ordnersystem entwickelt. Sensordatendateien aus verschiedenen Streams wurden heruntergeladen, umbenannt und in entsprechenden Verzeichnissen organisiert, um den Zugriff zu erleichtern. Außerdem wurde eine Datenübersichtstabelle erstellt, um zu bestätigen, welche Sensordaten während des Experiments korrekt aufgezeichnet wurden.

Letztendlich wurden für 13 Teilnehmer ausreichend Sensordaten sowohl aus dem Simulator als auch aus der realen Welt gesammelt, die dann für die Analyse zur Verfügung standen. Da eine direkte Videoaufzeichnung in Unity nicht möglich war, ohne dass es zu erheblichen Einbrüchen der Bildrate während der Simulatorfahrt kam, wurden stattdessen Einzelbilder mit einer Rate von 30 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Diese Bilder wurden zu Videodateien verarbeitet. Der erste Schritt der Datenanalyse war die Untersuchung der Fragebogenantworten. Im Anschluss daran wurden die Sensordaten mit Blickshift Analytics verarbeitet. Die Simulatordaten wurden in eine Simulator-Projektdatei importiert, während die realen Fahrdaten in das reale Projekt eingefügt wurden.

In der nächsten Phase wurden die Datensätze beschriftet. Dieser Prozess umfasste die Definition der Start- und Endpunkte für die Runden und für jede spezifische Situation, die auf der Strecke angetroffen wurde. Es erfolgt eine Integration raumbezogener Analyse in Blickshift Analytics um eine Visualisierung von GPS-Trajektorien auf OpenStreetMap-Basis zu ermöglichen. Zudem erfolgt eine Kopplung der verschiedenen Daten wie Eye-Tracking-Daten oder den Biosignalen um eine Interaktive, zeitbasierte Analyse der Bewegungsdaten zu ermöglichen. Für jede Situation wurden die Entfernungen angegeben. Auf der Grundlage dieser Beschriftung wurden Metriken, wie z. B. Rundenzeiten, berechnet. Zur visuellen Analyse wurde ein umfassender Überblick über die verschiedenen Sensordatenströme erstellt. Für jede Situation und Runde wurden die Durchschnittswerte von Geschwindigkeit, Hautleitwert, Beschleunigungssensoren und Leistungsabgabe berechnet. Die Eye-Tracking-Daten aus dem Real-World-Segment wurden zunächst in der Pupil Cloud verarbeitet. Die Referenzbilder für die einzelnen Situationen wurden aus der AutoCAD-Projektdatei des Kurses exportiert. Die Referenzbilder für jede Situation wurden hochgeladen, und die Fixationen für alle vier Runden pro Situation wurden manuell, eine nach der anderen, auf die Referenzbilder übertragen.

Um die im Simulator gesammelten Eye-Tracking-Daten zu analysieren, wurde vor dem Experiment ein Referenz-Screenshot der virtuellen -Umgebung in Unity aufgenommen. Dabei wurden die Koordinaten des jeweiligen Szenenausschnitts dokumentiert. Bei der Datenverarbeitung wurden die von Unity gelieferten Koordinatendaten in das Koordinatensystem der Top-Down-Kartenansicht (Vogelperspektive) transformiert. Diese Transformation ermöglichte eine intuitivere Visualisierung des Blickverhaltens, indem die Blickpunkte direkt auf den Parcours abgebildet wurden.

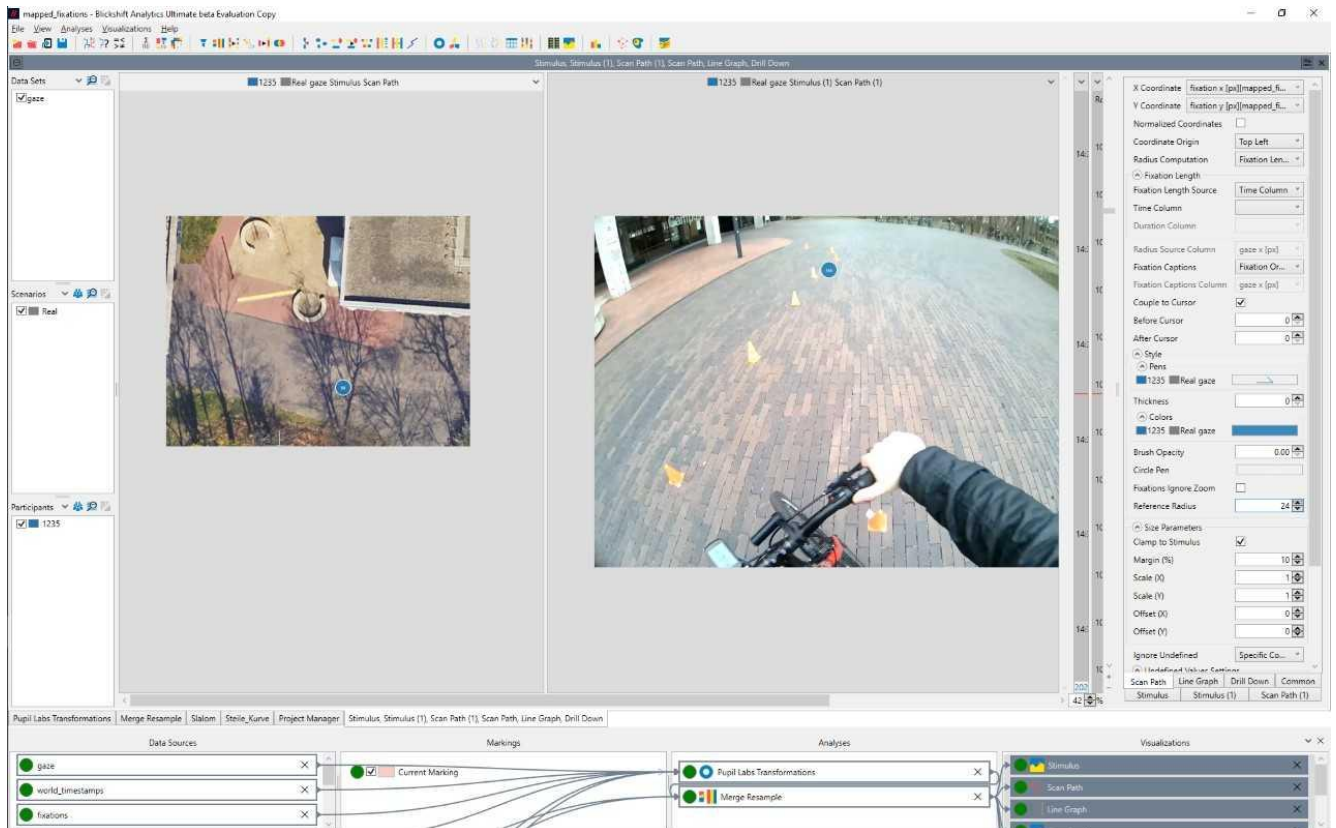


Abbildung 7: Screenshot der Blickdaten-Analyse der Slalomfahrt in der Real-Umgebung mit den in Blickshift Analytics entwickelten Erweiterungen.

1.3.5 Ergebnisse Vergleichsstudie 1

1.3.5.1 Rundenzeiten und Szenarien

Radfahren in VR bringt zunächst größere Herausforderungen mit sich, weshalb sich anfangs ein relative steile Lernkurve bildet. Diese dürfte auf die Anpassung an neue visuelle und körperliche Reize zurückzuführen sein. Im Gegensatz dazu erfordert das reale Szenario kaum Eingewöhnung und führt von Anfang an zu stabileren Leistungen mit geringer Varianz. Dies untermauert die Bedeutung einer ausreichenden Berücksichtigung initialer Anpassungsphasen, wenn VR-Simulatoren für Training oder Leistungsbewertungen eingesetzt werden. Die Angleichung der Leistungen in dieser Untersuchung zeigt, dass VR-Umgebungen trotz anfänglicher Unvertrautheit ein großes Potential für den Fähigkeits-erwerb bieten.

In der Simulation zeigt der Trend eine klare Verringerung der Rundenzeit im Rundenverlauf. Die durchschnittlichen Leistungswerte der Gruppe sinken deutlich von Runde 1 (MW = 69,24 s) auf Runde 4 (MW = 49,08 s). Dies weist darauf hin, dass die Teilnehmenden mit wiederholter Nutzung des Simulators schneller oder sicherer wurden. Im Gegensatz dazu bleiben die Leistungen in der realen Umgebung über die Runden hinweg relativ stabil und bewegen sich zwischen MW1 = 40,36 s und MW4 =

44,33 s, was auf einen geringeren Anpassungsbedarf und ein kontanteres Maß an Vertrautheit mit der realen Fahrsituation hinweist.

Auch Standardabweichung (SD) und Varianz (Var) nehmen in der Simulation im Verlauf der Runden deutlich ab (SD von 22,01 auf 8,67; Var von 484,22 auf 75,24), was für eine Angleichung der Leistungen spricht. Auch die zu Beginn stark schwankenden Ergebnisse zwischen den Teilnehmenden nahmen im Laufe des Experiments deutlich ab. Die stetige Verringerung der Varianz belegt einen klaren Lerneffekt innerhalb der Simulation. In der realen Umgebung hingegen zeigt sich durchweg eine niedrige und Streuung (SD zwischen 5 – 7; Var zwischen 25 – 45), was die Vermutung bestätigt, dass dieser Radfahrkontext vertrauter war (Tab. 3).

Tabelle 3 Zeit [s] je Runde während der Simulator- (SIM) und Realfahrt RW) (n=13).

Part		Round 1	Round 2	Round 3	Round 4
Sim	M	69.24	59.90	55.28	49.08
	SD	22.01	22.52	13.65	8.67
	Var	484.22	507.01	186.21	75.24
RW	M	44.33	40.86	40.36	40.73
	SD	6.69	6.57	5.09	4.98
	Var	44.71	43.17	25.93	24.83

In der Simulation (Sim) variieren die Zeiten von Runde zu Runde, wobei die erste Runde (R1) die längsten Zeiten aufweist, insbesondere für die "Steilkurve" (11,65 Sekunden) und den "Slalom" (16,34 Sekunden). Mit jedem Durchgang verbessert sich die Leistung der Teilnehmer, und die Zeiten sinken stetig. Dies deutet darauf hin, dass die Teilnehmer von der Übung profitieren, was zu schnelleren Zeiten führt, wenn sie mit der virtuellen Umgebung vertrauter werden. Die "Slalom"-Aufgabe bleibt in allen Runden die zeitaufwändigste, während andere Aufgaben, wie die "Gerade" und die "90°-Kurve", über die Runden hinweg eine gleichmäßigere Zeitreduzierung aufweisen. Die Standardabweichungen (SD) sind relativ hoch, was auf erhebliche Leistungsunterschiede zwischen den Teilnehmern hinweist, insbesondere bei den Aufgaben "Steilkurve" und "Slalom". Die Varianz (Var) zwischen den Aufgaben ist ziemlich konstant, was auf eine gleichmäßige Streuung der Zeiten hindeutet, auch wenn die Gesamtzeiten erheblich voneinander abweichen können.

Im Gegensatz dazu sind die Zeiten unter realen Bedingungen (RW) bei den meisten Aufgaben kürzer als in der Simulation. Zum Beispiel benötigt die "Gerade Strecke" in R1 6,48 Sekunden und die "90°-Kurve" 4,18 Sekunden. Diese Zeiten sind deutlich kürzer als die entsprechenden Werte in der Simulation. Es gibt zwar immer noch eine Verbesserung über die Runden hinweg, aber sie ist weniger ausgeprägt als in der simulierten Umgebung, was darauf hindeutet, dass die Teilnehmer im realen Szenario möglicherweise nicht den gleichen Grad an Lernen oder Anpassung über die Zeit erfahren. Der "Slalom" bleibt in beiden Umgebungen die längste Aufgabe, benötigt aber in der realen Welt weniger Zeit als in der Simulation. Die Standardabweichungen in den realen Daten sind viel geringer, was darauf hindeutet, dass die Leistung der Teilnehmer im Vergleich zur Simulation konstanter ist. Dies deutet

darauf hin, dass die Bedingungen in der realen Welt ein besser vorhersehbares und stabileres Feedback liefern.

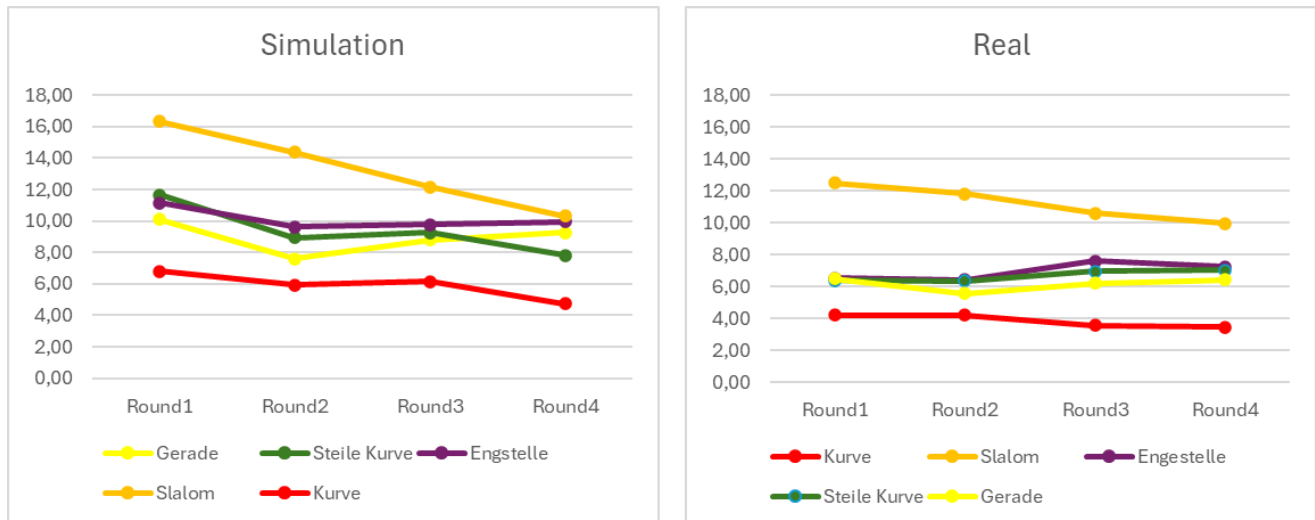


Abbildung 8: Dauer [s] der einzelnen Szenarien in Real- und Simulationsumgebung.

Aufgaben wie der "Slalom" und die "Steile Kurve" dauern in der Simulation deutlich länger, was möglicherweise auf die zusätzliche Komplexität und das Fehlerpotenzial beim Umfahren der virtuellen Hindernisse zurückzuführen ist. Die Analyse zeigt auch, dass die Teilnehmer sowohl in der Simulation als auch in der realen Welt ihre Leistung im Laufe der Runden verbessern, wobei diese Verbesserung in der Simulation stärker ausgeprägt ist. Dies deutet darauf hin, dass die Teilnehmer mehr von der Übung in der virtuellen Umgebung profitieren, in der sie durch wiederholten Kontakt mit den Aufgaben ihre Fähigkeiten und Strategien verfeinern können.

Schließlich zeigen die Daten, dass die Leistung in der realen Umgebung im Allgemeinen stabiler ist, wie die geringeren Standardabweichungen und Varianzen belegen. Dies deutet darauf hin, dass die realen Bedingungen zu einheitlicheren Ergebnissen bei den Teilnehmern führen. Im Gegensatz dazu führt die Simulation zu größeren Leistungsschwankungen, was wahrscheinlich auf die mit der virtuellen Umgebung verbundenen Herausforderungen und die Komplexität der Navigation in simulierten Aufgaben zurückzuführen ist.

Tabelle 4 Zeit [s] je Abschnitt und Runde während der Simulations- (Sim) und Realweltbedingung (RW) (n=13).

Part	Round	Straight Section	Steep Curve	Narrow Passage	Slalom	90° Curve
Sim	R1	10.08	11.65	11.14	16.34	6.81
	R2	7.60	8.94	9.64	14.38	5.92
	R3	8.81	9.26	9.78	12.15	6.17
	R4	9.27	7.80	9.95	10.33	4.74
	M	8.94	9.41	10.13	13.30	6.45
	SD	0.90	1.40	0.60	2.27	0.75
	Var	1.45	1.41	1.46	1.19	1.68
RW	R1	6.48	6.37	6.53	12.50	4.18
	R2	5.55	6.35	6.43	11.81	4.20
	R3	6.21	6.96	7.59	10.58	3.54
	R4	6.39	7.01	7.25	9.95	3.45
	M	6.16	6.67	6.95	11.21	3.84
	SD	0.36	0.31	0.49	1.00	0.35
	Var	0.69	0.71	0.69	0.84	0.60

1.3.5.2 Bewegungsbedingte Symptome/ Motion Sickness

Die Skala des MISC reicht von 0 (keine Beschwerden) bis 10 (Erbrechen). Dazwischen sind Abstufungen wie Schwindel, Wärmeempfinden, Kopfschmerzen, Magenbeschwerden und Schwitzen (2 – 5) sowie Übelkeit (6 – 9) definiert. Während der Realfahrten wurden weitestgehend die Werte 0 und selten 1 erfasst. Der durchschnittliche Symptomwert der Completed-Gruppe, die die Simulation vollständig absolvierte, lag im Vergleich zur Dropout-Gruppe etwas höher, nach der Einführungsphase stieg dieser bei den Dropouts allerdings stärker an (Abbrechende: $2,25 \pm 1,04$; Abschließende: $1,69 \pm 1,14$). Vier Teilnehmende brachen das Experiment bereits während der Einführungsphase ab mit Symptomen von Schwindel, Schwitzen und andere milde Beschwerden (Wert; 2,0). Nach den ersten beiden Runden brachen weitere vier Proband:innen mit einem Durchschnittswert von $5,25 \pm 1,26$, was auf stärkere Symptome wie Magenbeschwerden und Schwindel hindeutete. Die Gruppe, die das Experiment beenden konnten wies ebenfalls nach Runde 2 eine Erhöhung des MISC-Werts auf $2,25 \pm 0,77$ auf, welcher sich nach Runde 4 jedoch wieder auf $1,94 \pm 1,00$ verringerte. Laut den Teilnehmenden sei insbesondere die fehlende Möglichkeit sich „in die Kurven zu legen“, wie bei einer Fahrt im Freien, ungewohnt gewesen. Die, die alle Runden abschlossen, gaben zusätzlich an, sich im Verlauf der Fahrt an die Lenkung gewohnt hätten und diesen eher wie einen Controller bei einem Videospiele nutzten (Tab. 5).

Tabelle 5 Ergebnisse des MISC-Fragebogens aufgeteilt in die zwei Gruppen 'Completed' und 'Dropouts'. Die Analysierten Datensätze sind gekennzeichnet (*).

ID	Before Ride	After Introductory Ride	After Rd. 1&2	After Rd. 3&4	M	SD	Var
Dropouts							
(n=8)							
7792	0	1	7	–	2.67	3.79	14.33
2149*	0	3	5	–	2.67	2.52	6.33
1803	0	2	4	–	2.00	2.00	4.00
1000	1	1	–	–	1.00	0.00	0.00
0420	0	4	5	–	3.00	2.65	7.00
7452	0	3	–	–	1.50	2.12	4.50
2310	0	2	–	–	1.00	1.41	2.00
2013	0	2	–	–	1.00	1.41	2.00
M	0.13	2.25	5.25	–	1.85	1.11	19.59
SD	0.35	1.04	1.26	–	0.84	1.11	4.43
Var	0.13	1.07	1.58	–	0.71	1.22	19.59
Completed							
(n=16)							
3874*	2	3	2	2	2.25	0.50	0.25
2075	6	5	4	4	4.75	0.96	0.92
4315*	0	2	2	1	1.25	0.96	0.92
9871*	0	1	1	1	0.75	0.50	0.25
5012*	2	2	2	2	2.00	0.00	0.00
4182	2	1	3	3	2.25	0.96	0.92
7653*	0	2	3	4	2.25	1.71	2.92
7189*	1	2	3	2	2.00	0.82	0.67
2342*	0	1	2	1	1.00	0.82	0.67
6666*	0	1	2	1	1.00	0.82	0.67
1910	0	1	2	2	1.25	0.96	0.92
0712	0	1	1	1	0.75	0.50	0.25
9876*	0	2	2	2	1.50	1.00	1.00
2596*	0	2	2	1	1.25	0.96	0.92
1235*	0	0	2	2	1.00	1.15	1.33
1965*	0	1	3	2	1.50	1.29	1.67
M	0.81	1.69	2.25	1.94	1.67	0.87	0.89
SD	1.60	1.14	0.77	1.00	0.98	0.38	0.69
Var	2.56	1.30	0.60	1.00	0.96	0.15	0.47
M Total	0.58	1.88	2.85	1.94	1.73	1.24	2.27
SD Total	1.35	1.12	1.50	1.00	0.92	0.87	3.20
Var Total	1.82	1.24	2.24	1.00	0.85	0.76	10.23

1.3.5.3 Igroup Presence Questionnaire

Um die Mittelwerte der Befragung hinsichtlich der „Spatial Presence“ liegen bei 4,63 (Completed-Gruppe) bzw. 4,1 (Dropout-Gruppe) und somit in einem Bereich, bzw. knapp darunter, das als „gute Präsenz“ bezeichnet werden kann. Andere Studien berichten von Ergebnissen zwischen 4,5 und 6,0 auf einer Skala von 0 – 6 (vgl. Schubert et al., 2001). Die niedrigeren Werte könnten vor allem auf die physischen Einschränkungen und technischen Herausforderungen beim Radfahren in VR zurückzuführen sein. Vor allem ein ungewohntes Balanceempfinden, die „starre“ Konstruktion des Fahrrades sowie Diskrepanzen zwischen Bewegung und Wahrnehmung sind hier mögliche Ursachen.

Der Parameter „Involvement“, also die kognitive und emotionale Einbindung der Teilnehmenden, in beiden Gruppen etwas niedriger als in vergleichbaren Studien (4,0 – 5,5) (vgl. Tran et al., 2024). Die hohe Varianz in der Dropout-Gruppe (SD = 1,72, Var = 2,97) unterstreicht die Heterogenität der Teilnehmererfahrung, die bei körperlich anstrengenden oder neuartigen Interaktionsszenarien wie VR-Radfahren üblich ist.

Die Dimension VR-Erfahrung, die den wahrgenommenen Realismus und die Glaubwürdigkeit erfasst, ist deutlich niedriger als bei vielen anderen VR-Anwendungen. Während in Studien mit realistischen 3D-Umgebungen (z. B. Architektur-Walkthroughs, Stadtsimulationen) häufig Werte zwischen 3,5 und 5,0 angegeben werden, deuten die vorliegenden Ergebnisse (abgeschlossen: M = 2,50; Abbrüche: M = 1,94) darauf hin, dass der visuelle und sensorische Realismus des Simulators als relativ begrenzt wahrgenommen wurde, insbesondere von Teilnehmern, die sich entschieden, das Erlebnis nicht abzuschließen. Vor allem das Item "Die virtuelle Welt schien realistischer als die reale Welt" mit einem Wert von 1,21 drückte die Durchschnittsnote nach unten. Das VR-Erlebnis könnte durch die Verbesserung der visuellen Wiedergabetreue und die Hinzufügung von haptischem Feedback, räumlichem 3D-Audio, Windsimulation, sozialer und umweltbezogener Präsenz verbessert werden.

Die „Overall Presence“ zeigt Werte eines mittleren Präsenzepfinden in der VR-Umgebung (Completed: MW = 4,5; Dropout; MW = 3,75), liegen aber unter jenen Werten, die während passiven VR-Erfahrungen (z.B. narrative VR oder 360°-Videos) berichtet werden. Dies zeigt eine mögliche Beeinträchtigung der Immersion aufgrund der aktiven körperlichen Komponente, vor allem wenn die eigene Körperempfindung nicht mit den Erwartungen des Nutzenden übereinstimmt.

Tabelle 6 Ergebnisse des IPQ aufgeteilt in die Gruppen Completed und Dropouts. Analyisierte Datensätze wurden markiert ().*

ID	Spatial Presence	Involvement	VR Experience	Overall Presence
Dropouts				
(n = 8)				
7792	3.60	3.00	2.00	4.00
2149*	3.20	1.75	1.75	2.00
1803	4.00	0.75	1.75	3.00
1000	3.40	4.25	3.00	5.00
0420	4.20	3.25	1.50	4.00
7452	4.60	3.50	2.75	4.00
2310	4.00	5.25	1.75	3.00
2013	5.80	6.00	1.00	5.00
M	4.10	3.47	1.94	3.75
SD	0.82	1.72	0.65	1.04
Var	0.67	2.97	0.42	1.07
Completed				
(n = 16)				
3874*	4.80	5.50	2.75	5.00
2075	4.20	3.50	3.00	3.00
4315*	5.60	5.25	2.50	6.00
9871*	4.20	3.75	3.00	4.00
5012*	4.80	3.00	3.50	4.00
4182	4.00	3.75	2.75	4.00
7653*	3.80	3.25	2.25	4.00
7189*	5.20	3.75	2.50	5.00
2342*	6.00	2.25	2.75	6.00
6666*	4.40	3.00	3.00	4.00
1910	5.00	4.50	4.00	5.00
0712	4.40	4.25	2.75	5.00
9876*	4.80	4.25	1.50	3.00
2596*	4.20	4.50	3.75	4.00
1235*	5.20	4.00	1.75	5.00
1965*	3.40	4.75	3.00	5.00
M	4.63	3.95	2.80	4.50
SD	0.68	0.86	0.65	0.89
Var	0.46	0.74	0.42	0.80
M Total	4.45	3.79	2.51	4.25
SD Total	0.76	1.20	0.76	0.99
Var Total	0.57	1.44	0.57	0.98

1.3.5.4 Eye Tracking

Um das Blickverhalten während der Slalom-Fahrt zu analysieren, wurden aggregierte Heatmaps der Blickbewegungen der 13 Proband:innen über die gesamte Dauer der vier Runden erstellt (s. Abbildung 9). Die Heatmaps wurden getrennt für die Real- und Simulatorwelt erstellt, basierend auf den Aufnahmen der Vogelperspektive und den gemappten Scan-Paths am Boden.

Über alle Runden hinweg folgten die Blickverteilungen der erwarteten Bewegungsbahn, in der Realwelt konzentrierten sich die Blickpunkte überwiegend entlang der optimalen Fahrspur zwischen den Slalomstangen. Dies deutet auf eine antizipatorische Blickstrategie und eine effiziente visuelle Planung hin. Im Simulator hingegen fixierten die Blicke häufiger die nahe Umgebung der Hindernismarkierungen, was auf eine verstärkte visuelle Überwachung und möglicherweise eine höhere kognitive Belastung hinweisen könnte.

Die Heatmaps der Simulationsfahrten zeigen zu Beginn eine stärkere Konzentration, welches Ursachen in anfänglichen Orientierungsproblemen durch eine mögliche reduzierte propriozeptive Rückmeldung haben könnte. In beiden Umgebungen zeigten sich Anzeichen einer Anpassung des Blickverhaltens. So wurden in späteren Runden die Blickmuster fokussierter und zielgerichteter, mit geringerer Streuung in den Fixationen sowie einer konsistenteren Verfolgung der Strecke. Dieses Verhalten könnte durch eine zunehmende Vertrautheit der Teilnehmenden mit der Aufgabe widerspiegeln. Allerdings war der Effekt hier in der Realwelt deutlicher ausgeprägt als in der Simulation.

Zudem wird das Blickverhalten für die verschiedenen Fahraufgaben des Parcours untersucht. Beim Parcours mit der Slalomfahrt zeigen die Heatmaps des Simulators konzentriertere Hot Spots zu Beginn des Parcours, was auf anfängliche Orientierungsschwierigkeiten oder Zögern aufgrund von reduziertem propriozeptivem Feedback hinweisen könnte. Diese Unterschiede unterstreichen den Einfluss der Umgebungsrealität auf das visuelle Verhalten bei komplexen motorischen Aufgaben wie dem Radfahren. Bei der Engstelle sind die Blickmuster im Realversuch und der Simulation sehr ähnlich. Größtenteils wird der schmale Bereich rechts neben den Pylonen (entlang des Fahrwegs der Engstelle) fokussiert. Die Pylonen selber werden, wenn überhaupt, nur einzeln kurz anvisiert, bevor wieder auf die Engstelle der entfernte Bereich fokussiert wird. Das Blickverhalten bei der steilen Kurve ist zwischen Realversuch und Simulator wieder ähnlich. Die Probanden in der Virtual Reality fokussieren allerdings häufiger die erste Aufmerksamkeitssituation (ein Baum), was wieder auf Unsicherheiten bei der Navigation hindeutet.

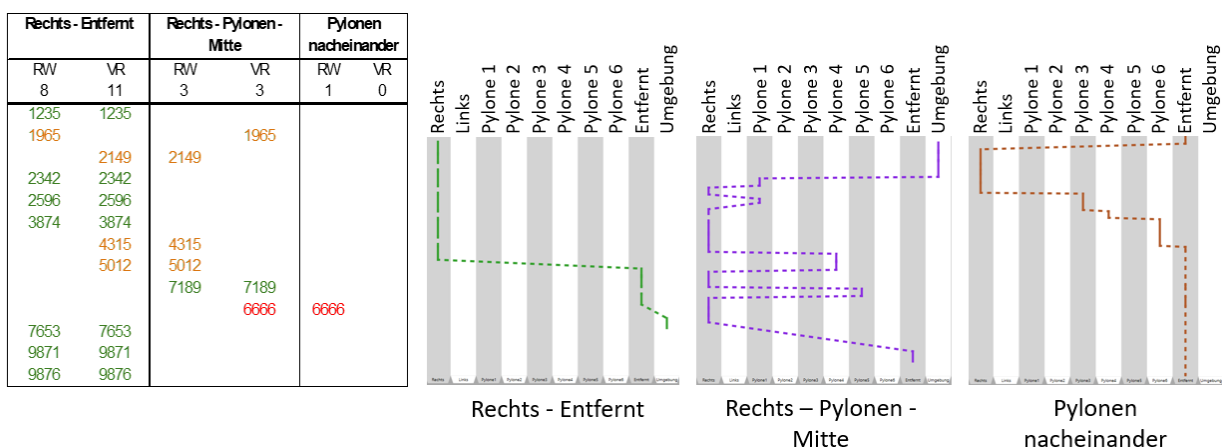


Abbildung 9: Blickverhalten im zeitlichen Ablauf während der Slalomfahrt.

Die Ergebnisse zum Blickverhalten lassen zusammenfassen, dass je einfacher die Fahraufgabe ist, desto ähnlicher das Blickverhalten zwischen Realversuch und der Simulation (Virtual Reality) sind. Dennoch zeigten einzelne Proband:innen in nahezu allen Vergleichssituationen vergleichbare Blickmuster in Virtual Reality und Realwelt. Komplexere Fahraufgaben führten in der VR-Umgebung zu mehr Fahrfehlern, wodurch das Blickverhalten vom optimalen Muster abwich. Um diese Abweichungen zu reduzieren bieten sich als Verbesserungsmöglichkeiten längere Eingewöhnungsphase sowie ein verbessertes Fahrfeedback bei der Fahrradsimulation.

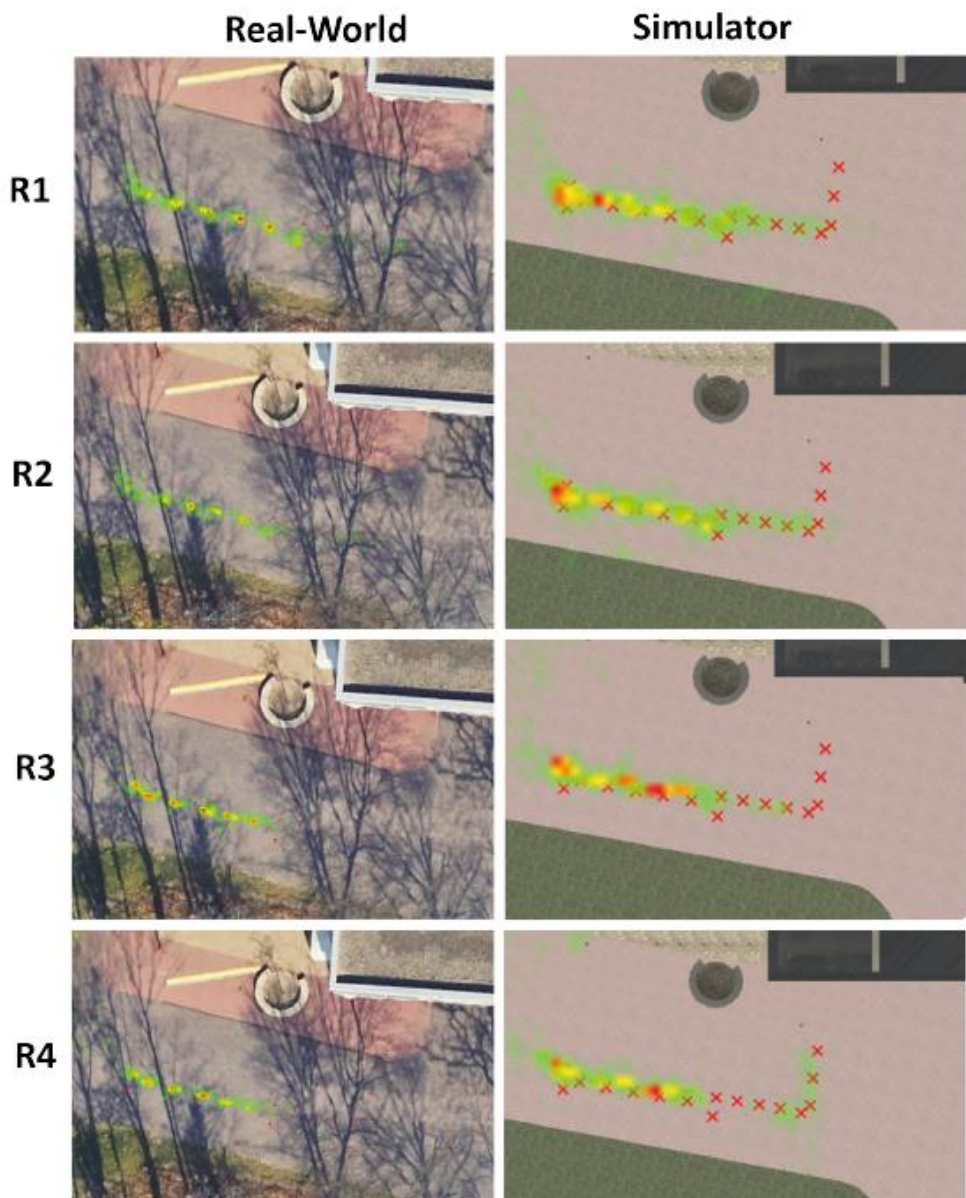


Abbildung 10: Heatmaps der Slalom-Abschnitte für jede Runde in VR und Realwelt.

1.3.5.5 Hautleitfähigkeit

Zur Bewertung der physiologischen Erregung der Testpersonen während den Fahrscenarien in Real und VR wurden Daten zur Hautleitfähigkeit (SC) aufgezeichnet. Aufgrund technischer Probleme mit der Sensorik war die Stichprobengröße relativ gering (n=3).

Die SC-Reaktionen lagen bei der Fahrt in der Simulationsumgebung deutlich höher als während der Fahrt in realen Bedingungen, was sich bei jeder einzelnen Fahraufgabe widerspiegelt. Zudem blieben in der Realumgebung die SC-Werte über die Runden hinweg relativ stabil niedrig, in der Simulation zeigten diese, stärkere Schwankungen und einen klaren Trend über die Runden hinweg.

Diese höheren Werte könnten auf eine stärker wahrgenommen kognitive oder emotionale Belastung hinweisen, die möglicherweise durch ein verringertes sensorisches Feedback, eine erhöhte Unsicherheit oder mangelnde Vertrautheit mit der virtuellen Umgebung verursacht wurde. Auch die Erhöhung der Werte über die Runden hinweg könnte eher auf eine zunehmende Erregung oder Ermüdung hinweisen, als auf eine Gewöhnung an die VR.

Tabelle 7 Hautleitfähigkeit (SC) nach Abschnitten und Simulations- (Sim) bzw. Realweltumgebung (RW).

Part	Round	Familiarization		Straight Section		Steep Curve		Narrow Passage		Slalom		90° Curve	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Sim	R1	3.84	2.09	4.14	2.02	4.21	2.19	4.18	2.08	4.27	1.97	4.50	2.37
	R2			4.48	2.46	4.58	2.52	4.84	2.57	5.09	2.66	5.05	2.60
	R3			5.06	2.29	5.02	2.51	4.82	2.33	4.92	2.40	4.76	2.26
	R4			5.38	2.32	5.30	2.27	5.13	2.15	5.32	2.30	5.14	2.40
	M	3.84	2.09	4.77	2.27	4.78	2.37	4.74	2.28	4.90	2.33	4.86	2.41
	SD			0.56	0.18	0.48	0.17	0.40	0.22	0.45	0.29	0.29	0.14
RW	R1	0.76	0.76	1.05	1.12	1.03	1.08	0.99	1.02	0.96	1.00	0.96	0.99
	R2			1.02	1.10	1.00	1.10	0.98	1.07	0.97	1.07	0.98	1.09
	R3			0.94	1.07	0.97	1.13	1.00	1.17	0.94	1.08	0.94	1.06
	R4			0.98	1.17	0.95	1.10	0.96	1.13	0.97	1.15	0.95	1.11
	M	0.76	0.76	1.00	1.12	0.99	1.10	0.98	1.10	0.96	1.08	0.96	1.06
	SD			0.05	0.04	0.04	0.02	0.02	0.07	0.01	0.06	0.02	0.05

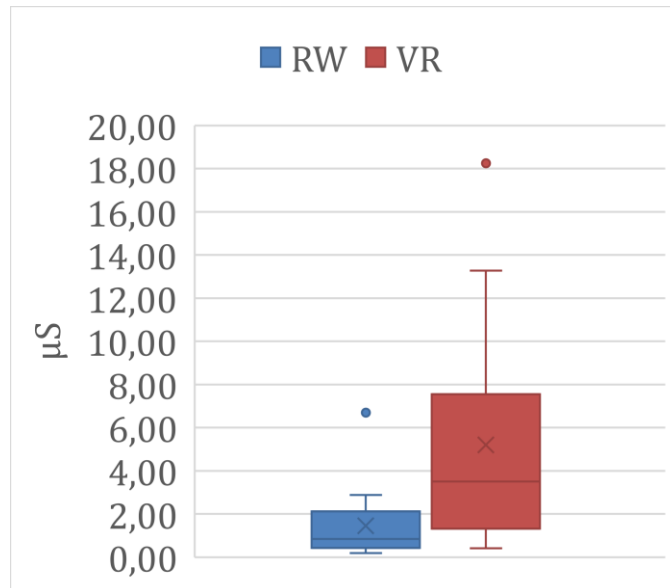


Abbildung 11: Boxplots der Hautleitfähigkeit im Vergleich zwischen Realwelt und VR.

1.3.6 Ergebnisse Vergleichsstudie 2

Die zweite Vergleichsstudie erfolgte für eine Route in der Karlsruher Innenstadt-West. Dafür wurde eine virtuelle Umgebung auf der Grundlage eines 3D-Stadtmodells entworfen. Die Route umfasst den realen Verkehr in der Innenstadt-West. Die Fahrbahn ist eben mit glattem Untergrund ohne Schäden.

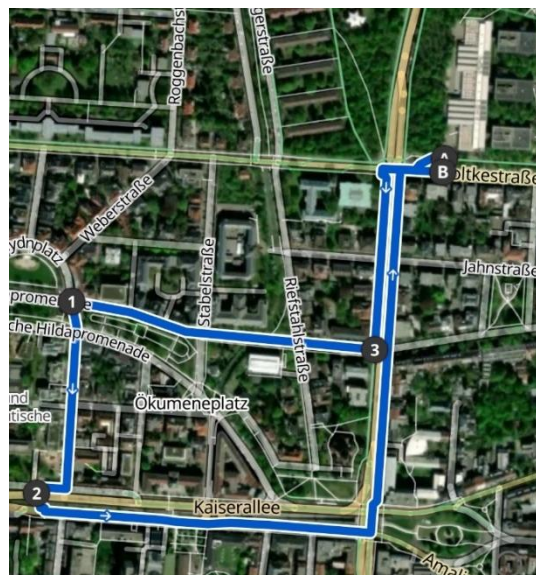


Abbildung 12: Route der Vergleichsstudie 2 in der Karlsruhe Innenstadt.

In der zweiten Vergleichsstudie wird untersucht, wie im Simulator Verkehrsszenarien wie die "Rechts-vor-Links"-Regel, das „Rechtsabbiegen“, das „Radfahren auf Gehwegen“ und „das Befahren von

Fahrradspuren“ nachbildet wird. In Studie 1 zeigte sich ein deutlicher Lerneffekt beim Fahren im Radsimulator. Daher wurden in Studie 2 Proband:innen aus der 1. Studie zu einem zweiten Durchlauf eingeladen. Damit soll die Bedeutung des Gewöhnungseffekt reduziert werden. Die Erhebung umfasst insgesamt 6 Teilnehmende. Aufgrund der geringen Anzahl von Teilnehmenden konzentriert sich die Auswertung auf ausgewählte Kennwerte.

Der MISC-Wert (subjektives Unwohlsein) wurde nach der VR-Fahrt erhoben und lag bei 1,86 (vergleichbar mit der Completed-Gruppe aus Studie 1: 1,94). Bei der untersuchten Personengruppe liegt damit eine Eingewöhnung an die VR-Simulation vor.

Die Situationszeit ist bei allen Situationen in der VR-Simulation deutlich größer als in der Realwelt. Die Situationszeiten sind damit nicht vergleichbar.

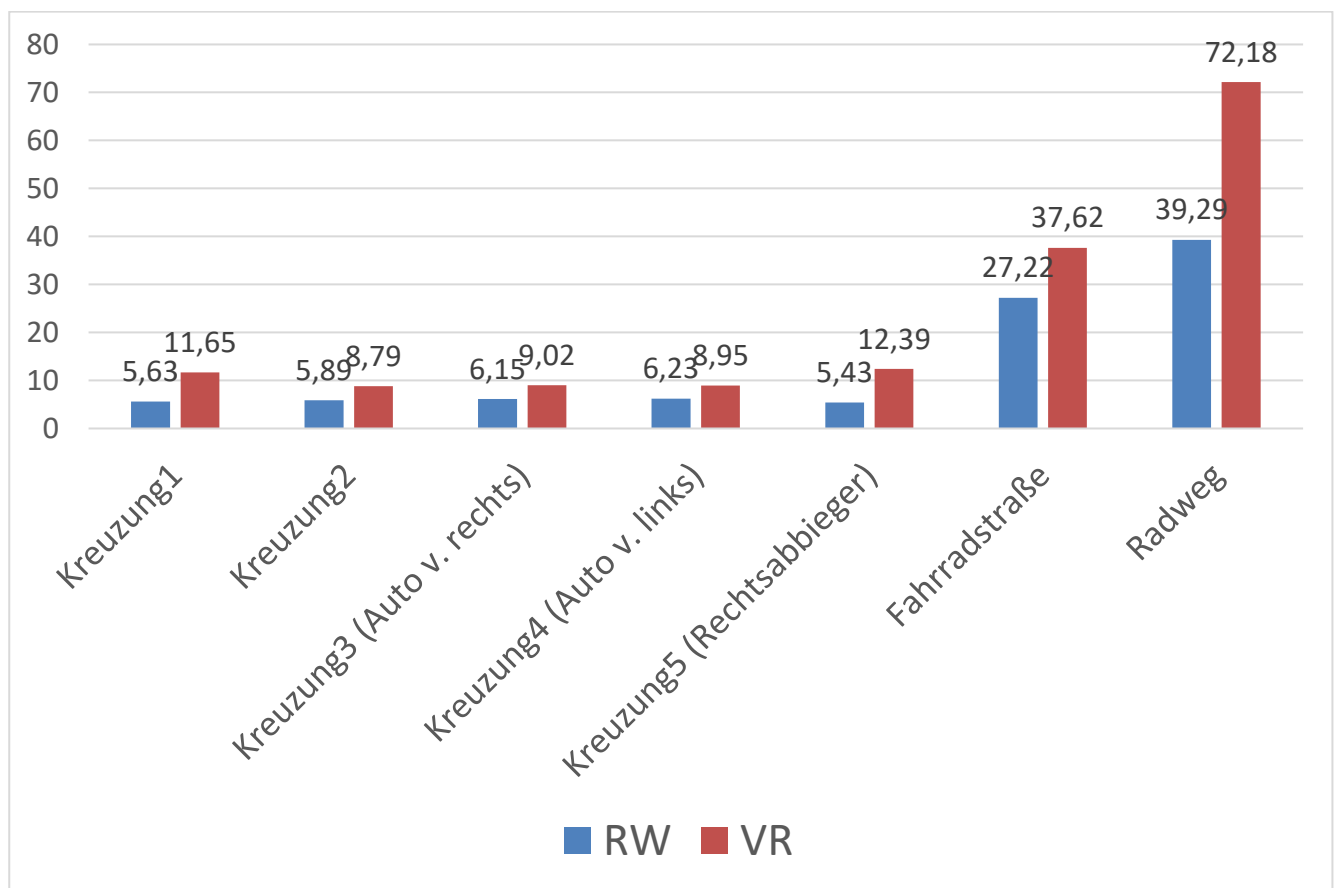


Abbildung 13: Zeiten [s] der einzelnen Situationen in RW und VR.

Das Blickverhalten wurde für die verschiedenen Verkehrsszenarien untersucht und im Folgenden beispielhaft für das Szenario „Rechts vor Links“ dargestellt. Die Blickverteilung in der Realwelt und der Virtual Reality folgt grundsätzlich dem erwarteten Vorfahrtsverhalten. In der Realwelt konzentrierten sich die Blickpunkte überwiegend auf die einmündenden Fahrtrichtungen Rechts und Links. Dies deutet auf eine antizipatorische Blickstrategie und eine effiziente visuelle Planung hin. Im Simulator hingegen

fixierten die Blicke häufiger auf die Mitte des Knotenpunktes, was auf eine verstärkte visuelle Überwachung und möglicherweise eine höhere kognitive Belastung hinweisen könnte.



Abbildung 14: Blickverhalten inkl. Heatmap für das Szenario "Rechts vo Links" in RW (links) und VR (rechts).

1.3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der beiden Studien

Die beiden Vergleichsstudien verdeutlichen die Unterschiede zwischen dem Radfahren in einem Simulator und in einer realen Umgebung, sowohl in Bezug auf das subjektive Unbehagen als auch auf objektive Leistungskennzahlen. Während Simulatoren ein wertvolles Werkzeug für Training und Experimente sind, stellt das Fehlen eines physischen Feedbacks eine Herausforderung dar, die vor allem in der Anfangsphase zu erhöhtem Unbehagen führen kann. Mit etwas Übung können sich die Benutzer jedoch an die Virtuell Reality anpassen, wodurch sich das Unbehagen verringert und die Leistung verbessert. Die Erkenntnisse zur Abbildung verschiedener Untersuchungsfragen des Radverkehrs im Vergleich Realwelt und Simulation durch Virtuelle Reality sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 8 Übersicht der Ergebnisse, Learnings und mögliche zukünftige Maßnahmen.

<u>Untersuchungsgegenstand</u>	Erkenntnis	Schlussfolgerung/Maßnahme	Realistisch?
Blickverhalten	Meist ähnlich, im Detail jedoch verschieden; einfachere Fahraufgaben kamen näher an RW-BV heran	Eingewöhnung einplanen; FPS erhöhen; Steuerung und Feedback verbessern	Teilweise
Fahrtzeiten	In anspruchsvollem Parkour sowie in VR-Stadtfahrt nicht vergleichbar	Längere Eingewöhnungsphase einplanen; Feedback über Bewegungsplattform einbauen	Nein
Trajektorien	In der Simulation geschehen mehr Fahrfehler als in der Realität	Eingewöhnung einplanen; (Fahrt-) Feedback verbessern	Teils, teils
<u>Skin Conductance</u>	Deutlich höher in der Simulation – hängt vermutlich mit Unwohlsein (siehe MISC) zusammen	Simulator <u>Sickness</u> muss perspektivisch komplett ausgeschlossen werden können.	Nein
<u>Wahrgenommene Präsenz</u>	Probanden, die die Studie abschließen bewerten Präsenz besser (Zusammenhang MISC)	Simulationsumgebungen weiter ausgestalten; FPS erhöhen; Auditives & haptisches Feedback einbauen	Probanden & MISC-abhängig

Diese Ergebnisse tragen zum Verständnis der Grenzen und des Potenzials von VR-Simulatoren für den Radverkehr bei und zeigen Wege für künftige Forschungen auf, die darauf abzielen, den Realismus und die Benutzererfahrung von Virtuell Reality für die Simulation zu verbessern.

Im Laufe dieser Studie haben wir wichtige Erfahrungen gesammelt, die in die zukünftige Forschung und Entwicklung einfließen werden. Die Erstellung eines Fahrradsimulators, die Sammlung und Ausgabe verschiedener Datenströme sowie die Synchronisierung und Auswertung der verschiedenen Sensorergebnisse stellten eine große technische Herausforderung dar. Insbesondere die Verwaltung solcher großer Datenmengen und die Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Integrität aller Sensoren erwiesen sich als komplex. Eine Herausforderung bei dieser Studie war der Datenverlust einzelner Sensoren, der bei Studien mit einer großen Anzahl von Datenströmen auftreten kann. Die Daten der Stressmessung wurden beispielsweise aufgrund von technischen Problemen und personalbedingten Fehlern während des Experiments nicht optimal aufgezeichnet.

Trotz dieser Herausforderungen zeigen die Experimente deutlich, dass solche Multisensor-Studien grundsätzlich durchführbar sind. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Verwendung von Multisensor-

Ansätzen eine nützliche Methode zur schrittweisen Bewertung und Verbesserung von Prototypen von Fahrradsimulatoren sein kann. Durch die Einbeziehung des Feedbacks von subjektiven (z.B. MISC und IPQ) und physiologischen (z.B. Hautleitwert) Messungen ist es möglich, die Simulatorsysteme so zu verfeinern, dass sie das reale Radfahrverhalten noch genauer nachbilden. Darüber hinaus lieferte die Integration von Eyetracking wertvolle Erkenntnisse über die visuelle Aufmerksamkeit und das Verhalten der Nutzer während des virtuellen Radfahrens. Langfristig wird dieser iterative Prozess zur Entwicklung effektiverer und realistischerer Radsimulatoren beitragen, so dass diese besser für Trainings- und Simulationszwecke geeignet sind.

1.4 AP5 Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Das Projektmanagement umfasste hauptsächlich die Planung und Durchführung von Besprechungen des Projektteams, die Kommunikation mit dem Projektträger, Berichtserstellung, sowie die kontinuierliche Kontrolle des Projektplans und dessen Anpassung bei möglichen Abweichungen. Auch Beschaffungsmaßnahmen und die Akquise neuer Projektmitarbeitenden waren in AP5 verortet. Im November 2023 wurde eine Auftaktveranstaltung mit Teilnehmenden des Projekts und dem Projektträger durchgeführt, im Mai 2025 gab es eine Projektabschlussveranstaltung mit weiteren Teilnehmenden Akteuren aus der Forschung. Auf der Konferenz „Mensch und Computer 2024“ in Karlsruhe wurden vorläufige Ergebnisse des Projekts vorgestellt, der Fahrradsimulator inkl. Simulationsumgebung wurde auf der POLIS Konferenz 2024 präsentiert. Zudem wurde das Projekt auf dem „Kolloquium Verkehrspsychologie“ vorgestellt sowie in einem Fernsehbeitrag der ARD „Der Kampf um die Fläche: Wie sollen Städte lebenswert werden?“, in diesem genauer die Methodik und Auswertemöglichkeiten von Blickverhalten und Stressmomenten während des Radfahrens beleuchtet wurden. Zudem erfolgte die Ausstellung des Radsimulators auf drei regionalen Veranstaltungen: EFFEKTE-Festival 2025 in Karlsruhe: <https://effekte.karlsruhe.de/wissenschaftsfestival-effekte/effekte-festival-2025>, Gartenschau Baiersbronn: <https://www.tal-x.de/> sowie der Polis-Konferenz am 27.-28. November 2024

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Hochschule Karlsruhe

Die für das Projekt geplanten Mittel wurden größtenteils wie geplant abgerufen und verwendet. Lediglich durch die kostenneutrale Verlängerung gab es zeitliche Verschiebungen bezüglich der Personalkosten. Die Mittel des Projekts wurden überwiegend für Personalkosten verwendet. Weitere Kostenpunkte waren die Beschaffung geeigneter Sensorik zur Datenerhebung innerhalb der Vergleichsstudien sowie Sensorik, Geräte und Material für den Bau und die Umsetzung des Fahrradsimulators und dessen Simulationsumgebung. Weitere Kosten fielen für Reisekosten zu Konferenzen und für Projekttreffen mit der Blickshift GmbH an. Die Budgetpositionen hinsichtlich Personalkosten, sonstigen allgemeinen Verwaltungsausgaben und Dienstreisen wurden nicht vollständig ausgeschöpft.

Blickshift GmbH

Die für das Projekt geplanten Mittel wurden wie geplant abgerufen und verwendet. Lediglich durch die kostenneutrale Verlängerung gab es zeitliche Verschiebungen bezüglich der Personalkosten. Die Mittel des Projekts wurden überwiegend für Personalkosten verwendet. Weitere Kostenpunkte waren die Beschaffung geeigneter Sensorik, einer VR-Brille, einer Unity-Lizenz während der Projektlaufzeit, sowie Dienstreisen nach Karlsruhe.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Da bisherige Studien meist nur isolierte Aspekte während des Radfahrens in Simulationen untersuchten, war das Ziel des Projekts eine hollistische multimodale Datenintegration zu generieren und diese mit Hilfe einer eigens dafür entwickelten Auswertemethodik zu den Unterschieden im Fahrverhalten von Radfahrenden zu analysieren. Hierfür war unter anderem diverses Equipment nötig, welches nicht aus eigenen Mittel der HKA oder der Blickshift GmbH gestellt werden konnte. Zudem waren zur Erreichung der oben genannten Ziele ein hoher personeller Arbeitsaufwand erforderlich, der ebenfalls ohne die Zuwendungen nicht aufgebracht hätte werden können. Die erhaltenen finanziellen Mittel konnten entsprechend zur Umsetzung der Projektziele angemessen genutzt werden.

4 Voraussichtlicher Nutzen der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnte die Zusammenführung unterschiedlicher Datenquellen wie Fahrparameter (Garmin und Unity), Stressindikatoren (Shimmer GSR+), Blickdaten (Pupil Labs Neon & Varjo Aero) sowie Trajektorien der Radfahrenden realisiert werden. Damit wurde ein direkter Vergleich zwischen dem Fahrverhalten von Radfahrenden während realer Fahrt und VR-Simulation möglich. Die im Projekt entwickelte Methodik und Infrastruktur zur Erhebung, Synchronisation und Auswertung verschiedener Datenströme bietet somit eine solide Grundlage für Folge- und themenverwandte Projekte.

Als Datenverwertung und – weitergabe der erhobenen Daten ist die Nutzung als hochwertiger Referenzdatensatz für weitere Forschungsprojekte denkbar. So können die Daten für die Validierung und Vergleich anderer Simulationsdaten und damit dem Benchmarking dienen. Daher ist für die Daten ein Transfer durch öffentlich zugängliche Formate wie die Bereitstellung der Daten auf mCLOUD zur freien Nachnutzung, die Veröffentlichung von Showcases und Anwendungsbeispielen oder die Verbreitung durch Webinare und Demos für Nutzende angedacht. Zudem wurden die Daten direkt durch den Projektpartner Blickshift zum Testen der im Projekt entwickelten Komponenten genutzt. Dies ermöglicht die weitere Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit und Aussagekraft der Blickverhaltensanalyse in Blickshift Analytics und Blickshift Recorder.

Im Rahmen von DataBikeSim wurden grundlegende Konzepte und technologische Bausteine für die realitätsnahe Simulation von Fahrraddaten in urbanen Mobilitätsszenarien entwickelt. Ergänzend dazu entstand eine Methodik zur Datenauswertung und die Software Blickshift Analytics wurde funktional erweitert. Um Radsimulatoren flächendeckend für Forschungseinrichtungen, Kommunen und Ingenieurbüros nutzbar zu machen, bedarf es einer iterativen Weiterentwicklung des Simulators –

insbesondere im Hinblick auf eine integrierte Bewegungsplattform und eine realitätsnähere Simulationsumgebung.

Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit zeigt sich durch das Potenzial, die entwickelten Modelle in zukünftige Forschungsprojekte zur Verkehrsplanung, Mensch-Maschine-Interaktion oder nachhaltigen Mobilität einzubinden. Wirtschaftlich bietet DataBikeSim ein hohes Innovationspotenzial durch die Übertragbarkeit auf Anwendungen wie digitale Zwillinge, datenbasierte Infrastrukturplanung oder Smart-Mobility-Dienste. In einer nächsten Phase sollen insbesondere Partnerschaften mit Kommunen, Verkehrsunternehmen und Technologieanbietern vertieft werden, um die Prototypen in skalierbare, marktfähige Lösungen zu überführen. So wird der Aufbau eines Anschlussprojekts (Förderlinie 2) mit weiteren Industrie- und Forschungspartnern geprüft. Ziel ist dabei die Erweiterung der VR-Analysemethoden und Transfer in neue Anwendungsfelder. Dies umfasst die Identifikation konkreter Anwendungsfälle mit potenziellen Kunden (z. B. Verkehrsplanung, Fahrradindustrie). Zudem erfolgt der Aufbau von Co-Creation-Projekten mit Interessenten aus der Automobil-, Mobilitäts- und UX-Forschung.

Die Verwertung des entwickelten Simulationsframeworks bieten unternehmerisches Potenzial für: VR-basierte Sicherheitstrainings und Schulungen für Stadtplanung, Infrastrukturtests, Mobilitätssimulation. Angedacht ist der Ausbau von Blickshift Analytics und Recorder mit Fokus auf: Automobilbranche, Usability- und Marktforschung sowie Gaming und immersive User Experience. Dabei werden direkte Synergien zu bestehenden Produkten von Blickshift genutzt. Ein Zukunftsszenario ist eine modular erweiterbare Plattform für verhaltensbasierte Mobilitätsforschung.

5 Fortschritt anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Projektlaufzeit wurden verschiedene Forschungsarbeiten zur Validierung von Fahrradsimulatoren durchgeführt, die wichtige Erkenntnisse zur Realitätsnähe solcher Systeme liefern. Besonders relevant ist jedoch die Erkenntnis, dass weiterhin keine Forschungsarbeit bekannt ist, die spezifisch das Blickverhalten von Radfahrenden in Fahrradsimulatoren validiert hat.

Eine Studie von (Hammami et al., 2025) beschäftigte sich mit der objektiven und subjektiven Bewertung der Realitätsnähe eines VR-basierten Fahrradsimulators der Universität Győr. Die Validierung erfolgte anhand von Geschwindigkeit und kumulativer Querposition sowie der wahrgenommenen Realitätsnähe durch die Nutzer. Die Ergebnisse zeigten, dass auf einem getrennten Radweg keine signifikanten Unterschiede zwischen realer Fahrt und Simulation bezüglich dieser Parameter bestehen. Bei Fahrten auf einem geteilten Fahrstreifen wurden zwar signifikante Abweichungen festgestellt, diese wurden jedoch von den Nutzerinnen und Nutzern kaum wahrgenommen. Die subjektive Bewertung der Realitätsnähe lag bei rund 58% und war unabhängig von Alter oder VR-Erfahrung. Weiterhin wurde der Simulator als sicher und komfortabel empfunden, mit nur geringen VR-bedingten Krankheitssymptomen. Einschränkungen ergaben sich vor allem durch die begrenzte Lenkmöglichkeit und das Fehlen physischer Bewegungen, die in einer neueren Version mittels Bewegungsplattform ausgeglichen werden sollen. Insgesamt eignet sich der Simulator gut für gerade Streckenabschnitte und stellt eine solide Basis für weitergehende Validierungen dar. Zudem wurde ein neuer Maßstab *Degree of Realism* eingeführt, der sowohl subjektive als auch objektive Realitätskriterien kombiniert.

Eine weitere wesentliche Validierungsstudie stammt von (Baldassa et al., 2025), die einen Fahrradsimulator evaluierten, der speziell zur Analyse des Verhaltens von Radfahrenden bei Interaktionen mit Fahrzeugen entwickelt wurde. Die Validierung erfolgte durch den Vergleich von kinematischen und verhaltensbezogenen Daten aus realen Verkehrssituationen in Padua, Italien, und entsprechenden Simulatorversuchen. Dabei zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der Streckenwahl am Kreisverkehr sowie beim Verhalten an einer T-Kreuzung, einschließlich der Wahl der Annäherungsposition und der Akzeptanz von Sicherheitsabständen gegenüber einmündendem Verkehr. Auch die mittleren Annäherungsgeschwindigkeiten an die T-Kreuzung wiesen eine hohe Übereinstimmung zwischen realer und simulierter Situation auf. Die Datenbasis umfasste 64 Teilnehmende, von denen nur zwei wegen Simulator-Krankheit abbrechen mussten; die virtuelle Nachbildung der Verkehrs- und Umgebungssituation war sehr detailgetreu und beinhaltete realistische Verkehrsdichten und Fahrzeugbewegungen. Die Studie bestätigt die hohe absolute Validität des Simulators für die Untersuchung des Fahrverhaltens von Radfahrenden und erklärt ihn zu einem zuverlässigen Instrument für verkehrsforschungsrelevante Analysen. Zukünftige Forschungsarbeiten sollen den Simulator in erweiterten Szenarien und für Gegenmaßnahmen einsetzen.

Zusammenfassend zeigen diese Studien, dass Fahrradsimulatoren mittlerweile ein hohes Maß an Realitätsnähe und Validität in Bezug auf Fahrverhalten und kinematische Parameter erreichen. Gleichwohl bestand eine Forschungslücke hinsichtlich der Validierung des Blickverhaltens von Radfahrenden im Simulator, die im vorliegenden Projekt durch den Einsatz von Eye-Tracking-Technologie adressiert wird. Diese ergänzende Validierungsdimension ist für ein umfassendes Verständnis der Nutzerinteraktion und der Akzeptanz von Fahrradsimulatoren im Forschungs- und Anwendungsbereich von großer Bedeutung.

6 Veröffentlichungen der Ergebnisse

- Auftaktveranstaltung “DataBikeSim – Datenbasierte Modelle für realistische Simulationsstudien in der Radverkehrsforschung” am 28.11.2023. Online unter: <https://www.bmv.de/Shared-Docs/DE/Anlage/DG/mFUND/databikesim.html?nn=76046>
- Prof. Dr. Jochen Eckart, Kolloquium Verkehrspsychologie – Universität Koblenz, 29.04.2025
- Mathias Trefzger, Michael Raschke, Michael Fath, and Jochen Eckart. 2024. What does it Take to Test a Bicycle Simulator for Realism? A Discussion of the Challenges and Possible Evaluation Methods. In Proceedings of Mensch und Computer 2024 (MuC '24). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 461–465. <https://doi.org/10.1145/3670653.3677491>
- Abschlussveranstaltung “DataBikeSim – Datenbasierte Modelle für realistische Simulationsstudien in der Radverkehrsforschung” am 21.05.2025.
- Fernsehbeitrag ARD „Der Kampf um die Fläche: Wie sollen Städte lebenswert werden?“ am 23.06.2025. Online unter: <https://www.ardmediathek.de/video/gut-zu-wissen/der-kampf-um-die-flaeche-wie-sollen-staedte-lebenswert-werden/br/Y3JpZDovL2JyLm-RIL2Jyb2FkY2FzdC9GMjAyM1dPMdIxMjQ0QTA>

- Eingereicht: Mathias Trefzger, Michael Raschke, Michael Fath, and Jochen Eckart. 2025. Bridging the Gap Between Virtual and Real Cycling: Results from a Multisensor Study. In Proceedings of Mensch und Computer 2025 (MuC '25).

Literaturverzeichnis

- Acerra, E.M., Shoman, M., Imine, H., Brasile, C., Lantieri, C., Vignali, V. (2023). „The Visual Behaviour of the Cyclist: Comparison between Simulated and Real Scenarios.“ *Infrastructures* 8, 5, 92.
- Ayad, L., Imine, H., De Crescenzo, F., Lantieri, C. (2024). Bicycle Simulator use to Evaluate Safety Risks and Perceptions for Enhanced Sustainable Urban Mobility. *Sustainability* 16 (22).
- Baldassa, A., Orsini, F., Bono, G., Tagliabue, M., Gastaldi, M., Rossi, R., 2025. Validation of a bicycle simulator for cyclist-vehicle interaction analysis. *Transp. Res. Procedia* 86, 24–31.
- Baumann, C., Dierkes, K. (2023). Neon Accuracy Report.
- Bimberg, P., Weissker, T., Kulik, A. (2020). On the Usage of the Simulator Sickness Questionnaire for Virtual Reality Research. In 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshop 8VRW), 464-467.
- Brown, H., Sun, C., Qing, Z. (2017). Investigation of Alternative Bicycle Pavement Markings with the Use of a Bicycle Simulator. *Transportation Research Record* 2662 (1), 143-151.
- Gay, N., Trefzger, M., Sawilla, S., Schlegl, T. (2023). How realistic is the gaze behaviour in a cycling simulator? A comparative study between lab and field. *Transportation Research Procedia*, 72, 1061-1068.
- Garcia, D.M., Gröne, K., Fischer, M., Zhao, M., Bergen, M. (2023). „Validation of a bicycle simulator based on objective criteria.“ *The Evolving Scholar - 5th Edition*.
- Hammami, A., Borsos, A., Sándor, Á.P., 2025. How realistic a bicycle simulator can be? - A validation study. *Multimodal Transp.* 4, 100193.
- Heinovsky, J., Stratmann, L., Buse, D.S., Klingler, F., Franke, M., Oczko, M.-C. H., Sommer, C., Scharlau, I., Dressler, F. (2019). Modeling Cycling Behaviour to Improve Bicyclists' Safety at Intersections - A Network Perspective. Proceedings of 20th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, Washington D.C.
- Kaths, H., Keler, A., Hosseini, S.A., Grigoropoulos, G., Kath, J. (2019). Fahrradsimulator - Anwendungsorientierter Erfahrungsbericht zu Aufbau und Nutzung. Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik.
- Kaths, H., Keler, A., Bogenberger, K. (2021). ICSC 2021 - 9th International Cycling Safety Conference.
- Kaths, H., Keler, A., Grigoropoulos, G., Hosseini, S.A. (2021). RASCH - RAdSCHnellwege: Gestaltung effizienter und sicherer Infrastruktur - Schnell zum Ziel auf dem Radweg von morgen.
- Matvienko, A., Hoxha, H., Mühlhäuser, M. (2023). What does it mean to cycle in Virtual Reality? Exploring Cycling Fidelity and Control of VR Bicycle Simulators. *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: is it indeed 90% visual? *Perception* 25, 9, 1081–1089.
- O'Hern, S., Oxley, J., Stevenson, M. (2017). „Validation of a bicycle simulator for road safety research.“ *Accident Analysis Prevention* 100, 53-58.
- Powell, J., Stroh, O., Thomas, G. (2018). Hardware Design for an Electro-Mechanical Bicycle Simulator in an Immersive Virtual Reality Environment. *International Journal of Virtual Reality*, 18 (10).
- Schubert, T., Friedmann, F., Regenbrecht, H. (2001). The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 10, 3 (06 2001), 266–281.
- Shoman, M. und Imine, H. (2021). Bicycle Simulator Improvement and Validation. IEEE Access PP 04.

Shoman, M. und Imine, H. (2020). Modelling and Simulation of Bicycle Dynamics.

Tran, T.Q., Langlotz, T., Young, J., Schubert, T.W., Regenbrecht, H. (2024). Classifying Presence Scores: Insights and Analysis from Two Decades of the Igroup Presence Questionnaire (IPQ). 31, 5.

Trefzger, M., Titov, W., Schlegl, T. (2020). Analysis and Comparison of the Gaze Behaviour of E-Scooter Drivers and Cyclists. *INFORMATIK*, 1163-1180.

Trefzger, M., Raschke, M., Fath, M., Eckart, J. (2024). What does it Take to Test a Bicycle Simulator for Realism? A Discussion of the Challenges and Possible Evaluation Methods. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA.

Vansteenkiste, P., Zeuwts, L., Cardon, G., Philippaerts, R., Lenoir, M. (2014). The implications of low quality bicycle paths on gaze behaviour of cyclists: A field test. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 23, 81-87.

Wintersberger, P., Matviienko, A., Schweidler, A., Michahelles, F. (2022). „Development and Evaluation of a Motion-based VR.“ *Issue MHCI*, 6, 1-19.

Online-Quellen:

BAS: <https://www.bast.de/DE/Verkehrssicherheit/Technik/Radsimulator.html>

WIVW: <https://wivw.de/hf-research/fahrrad/>, letzter Zugriff am 25.08.2025